

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EXPLORACIÓN RADICULAR PROFUNDA EN PLANTACIONES DE  
*Eucalyptus Grandis*: ESTUDIO DEL PERFIL CONTINUO SUELO-SAPROLITO-  
ROCA, SU INTERACCIÓN CON LAS RAÍCES Y APORTES  
SILVICULTURALES, AGRONÓMICOS Y ECOLÓGICOS

por

Sebastián Andrés MÁRMOL FERREIRA

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2021

Tesis aprobada por:

Director:

\_\_\_\_\_  
Lic. en Geología (PhD.) Gonzalo Blanco

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. (PhD.) Mario Pérez Bidegain

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. (MSc.) Andrés Hirigoyen

Fecha: 4 de marzo de 2021

Autor:

\_\_\_\_\_  
Sebastián Mármol

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los tutores de este trabajo por apoyar la propuesta, sus aportes y correcciones.

Se agradece particularmente al Ing. Agr. (MSc) Luis Bentancor por impulso en realizar este estudio, así como por su guía y apoyo en el trabajo de campo. Al Bach. Martin Francia y al Ing. Agr. Marcelo Pérez por su laboriosa ayuda en las salidas de campo y al Ing. Agr. Maximiliano Gonzáles en el laboratorio de suelos. A la Ing. Agr. Virginia Takata por su guía y ayuda para realizar los análisis de suelos. A la Dra. Gabriela Speroni para realizar los cortes histológicos. Se agradece al Ing. Agr. (PhD) Jorge Hernández por las discusiones del tema y a la Ing. Agr. (MSc) Raquel Hayashi por su ayuda en la logística. Se agradece a la Dra. Graciela Piñeiro y al Lic. en Geología (MSc) Pedro Xavier por sus enseñanzas en salidas de campo y discusiones. Se agradece a la Lic. Sully Toledo por su tiempo y atención en revisar el formato y presentación de este trabajo.

Al Grupo Disciplinario de Geología por todo su apoyo y compañerismo en todos estos años, y en particular a la Ing. Agr. (MSc) Antonella Celio por su gestión y dedicación para que este trabajo se realizará.

Se agradece a CSIC por su fundamental apoyo económico.

A la empresa UPM por permitir realizar el trabajo en sus plantaciones, brindar apoyo logístico y toda la información solicitada con la mejor de las disposiciones.

Por último, pero no menos agradecerle mi familia, en especial a mi madre, a la cual nunca le podre estar lo suficientemente agradecido por el sostén incondicional en todos estos años de estudios.

*Dedicada al Dr. Jorge Bossi, la persona que más ha influido en mi vida adulta.  
Gracias por su enorme generosidad, su ejemplo y por darme el orgullo de poder  
llamarlo jefe.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1 SISTEMA RADICULAR PROFUNDO EN PLANTACIONES DE <u>EUCALYPTUS</u> y OTROS SISTEMAS FORESTALES.....	2
2.1.1 <u>Generalidades del sistema radicular en árboles</u> .....	2
2.1.2 <u>El sistema radicular profundo: características, funciones e                 importancia</u> .....	4
2.1.3 <u>Estudios sobre la profundidad del sistema radicular en                 plantaciones de Eucalyptus</u> .....	7
2.1.4 <u>Almacenaje de carbono, uso del agua y nutrientes en                 plantaciones de Eucalyptus y efectos de la sustitución de                 pasturas por forestación</u> .....	11
2.2 ACCIÓN DE LAS RAÍCES DE LOS ÁRBOLES EN EL CONTINUO SUELO-SAPROLITO-ROCA.....	22
2.3 ENFOQUE COMPLETO DEL PERFIL DE SUELO A ROCA: SU DESCRIPCIÓN A CAMPO E IMPORTANCIA DEL SAPROLITO PARA LOS ÁRBOLES .....	27
2.3.1 <u>Descripción y clasificación del saprolito</u> .....	27
2.3.2 <u>La roca meteorizada (saprolito) como sustrato para los                 árboles</u> .....	31
2.4 SUELOS FORESTALES DEL URUGUAY .....	33
2.4.1 <u>Políticas ambientales referidas a las plantaciones                 forestales</u> .....	39
2.4.2 <u>Información relevante en investigación nacional sobre                 plantaciones de Eucalyptus y suelos</u> .....	42
2.5 GEOLOGÍA .....	46
2.5.1 <u>Cuenca Norte</u> .....	46
2.5.2 <u>Cuenca Paraná</u> .....	55
2.5.3 <u>Cuenca Chacoparanaense</u> .....	65



2.5.4	<u>Formación Yaguarí</u> .....	68
2.5.4.1	Generalidades de la Formación Yaguarí .....	68
2.5.4.2	Subdivisiones de la Formación Yaguarí.....	70
2.5.4.3	Paleontología y edad de la Formación Yaguarí .....	76
2.5.5	<u>Formación Rio do Rasto</u> .....	77
2.5.5.1	Generalidades de la Formación Rio Do Rasto.....	77
2.5.5.2	Subdivisiones de la Formación Rio do Rasto .....	82
2.5.5.3	Paleontología y edad de la Formación Rio do Rasto .....	84
2.5.6	<u>Formación Buena Vista</u> .....	85
2.5.6.1	Generalidades de la Formación Buena Vista.....	85
2.5.6.2	Subdivisiones de la Formación Buena Vista.....	91
2.5.6.3	Limite Permo-Triásico .....	93
2.5.6.4	Paleontología y edad de la Formación Buena Vista .....	95
2.5.7	<u>Formación Sanga do Cabral</u> .....	96
2.5.7.1	Generalidades de la Formación Sanga do Cabral .....	96
2.5.7.2	Paleontología y edad de la Formación Sanga do Cabral .....	102
2.5.8.	<u>Formación Talampaya</u> .....	103
2.5.8.1	Generalidades de la Formación Talampaya .....	103
2.5.8.2	Edad y paleontología de la Formación Talampaya.....	107
2.5.9	<u>Hidrogeología</u> .....	108
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	112
3.1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	112
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL SITIO.....	113
3.2.1	<u>Clima</u> .....	113
3.2.2	<u>Topografía</u> .....	113
3.2.3	<u>Hidrografía</u> .....	114
3.2.4	<u>Geología</u> .....	116
3.2.5	<u>Suelos</u> .....	118

3.2.5.1	Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay .....	118
3.2.5.2	Grupos de suelos CO.N.E.A.T .....	119
3.3	PLANTACIONES FORESTALES .....	121
3.4	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN .....	122
3.4.1	<u>Elección de la zona de estudio</u> .....	122
3.4.2	<u>Elección de sitios para calicatas profundas</u> .....	123
3.4.3	<u>Descripción de raíces en las calicatas profundas</u> .....	124
3.4.4	<u>Descripción del perfil suelo-saprolita-roca (SSR) en calicatas profundas</u> .....	124
3.4.5	<u>Análisis y estudios de laboratorio</u> .....	128
3.4.5.1	Análisis químicos y físicos del perfil suelo-saprolito-roca (SSR) .....	128
3.4.5.2	Observaciones de raíces, saprolita y rocas .....	129
3.4.6	<u>Definición de litofacies</u> .....	130
3.4.7	<u>Cartografía geológica y de suelos</u> .....	131
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	132
4.1	RESULTADOS DE GEOLOGÍA .....	132
4.1.1	<u>Litofacies</u> .....	132
4.1.1.1	Asociación de litofacies mfSh +Fm .....	133
4.1.1.2	Asociación de litofacies Fhf+vfShf+fmSr+vfSga.....	138
4.1.1.3	Asociación de Litofacies vfSp+fSt+cSGtie .....	141
4.1.1.4	Asociación de litofacies mfSf+Gi y asociación de litofacies Gtn+Ge .....	145
4.1.1.5	Puntos de campo complementarios.....	151
4.1.2	<u>Correlación entre litofacies y formaciones geológicas</u> .....	155
4.1.2.1	Asociación de litofacies mfShc+Fm .....	155
4.1.2.2	Asociación de litofacies Fhf+vfShf +fmSr+vfSga.....	156
4.1.2.3	Asociación de Litofacies vfSp+fSt + cSGtie, mfSf+Gi, Gtn+Ge y litofacies Gtn.....	157
4.1.2.4	Puntos de campo complementarios.....	160

4.1.3 <u>Mapa geológico</u> .....	160
4.1.4 <u>Discusiones y resultados de geología</u> .....	162
4.2 CALICATAS PROFUNDAS .....	164
4.2.1 <u>Descripciones cualitativas macroscópicas de los SSR</u> .....	167
4.2.1.1 Perfil SSR PFYC-01 .....	167
4.2.1.2 Perfil SSR PFYC-02.....	168
4.2.1.3 Perfil SSR PFYC-03.....	169
4.2.1.4 Discusión sobre los perfiles SSR obtenidos .....	170
4.2.2 <u>Descripciones macroscópicas de raíces en los perfiles SSR</u> .....	171
4.2.2.1 Perfil SSR PFYC-01 .....	171
4.2.2.2 Perfil SSR PFYC-02.....	178
4.2.2.3 Perfil SSR PFYC-03.....	186
4.2.2.4 Discusión sobre las descripciones de raíces obtenidas .....	194
4.2.3 <u>Descripciones microscópicas de las raíces obtenidas de los perfiles SSR</u> .....	198
4.2.3.1 Perfil SSR PFYC-01.....	198
4.2.3.2 Perfil SSR PFYC-02.....	200
4.2.3.3 Perfil SSR PFYC-03.....	202
4.2.3.4 Discusión de las observaciones microscópicas de los perfiles SSR .....	208
4.2.4 <u>Análisis físicos y químicos de los perfiles SSR</u> .....	210
4.2.4.1 Resultados de la calicata PFYC-01 .....	210
4.2.4.2 Resultados de la calicata PFYC-02 .....	214
4.2.4.3 Resultados de la calicata PFYC-03 .....	216
4.2.4.4 Discusión de los resultados de análisis físicos y químicos .....	219
4.2.5 <u>Discusión de la relación entre los SSR, el sistema radicular profundo y su aplicación agronómica</u> .....	221
4.3 SITIO FORESTAL .....	230
4.3.1 <u>Perfiles de SSR asociados a litofacies vfSp+fst+cSGtie</u> ...	234

4.3.2 <u>Perfiles de SSR asociados a litofacies mfSf+Gi y Gtn+Ge</u> .....	236
4.3.3 <u>Discusión de los posibles aportes a la caracterización del sitio forestal</u> .....	241
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	246
6. <u>RESUMEN</u> .....	249
7. <u>SUMMARY</u> .....	250
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	251
9. <u>ANEXOS</u> .....	263

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Unificación de las clases de meteorización para basaltos y rolitas de la Formación Serra Geral y areniscas de la Formación Caturrita .....	29
2. Grados de meteorización según propiedades macroscópicas .....	31
3. Superficie de prioridad forestal por zona CO.N.E.A.T .....	36
4. Tabla hidrogeológica .....	110
5. Atributos de las plantaciones .....	122
6. Descripción cualitativa macroscópica para horizontes y capas profundas del suelo, saprolito y roca (SSR) .....	127
7. Códigos de litofacies definidas para este trabajo .....	131
8. Litofacies definidas para este trabajo y su descripción resumida .....	133
9. Ubicación y características relevantes de las plantaciones en las calicatas profundas .....	164
10. Descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-01 .....	167
11. Descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-02 .....	168
12. Descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-03 .....	169
13. Propiedades físicas de la calicata PFYC-01 .....	211
14. Propiedades químicas de la calicata PFYC-01 .....	212
15. Propiedades físicas de la calicata PFYC-02 .....	214
16. Propiedades químicas de la calicata PFYC-02 .....	215
17. Propiedades físicas de la calicata PFYC-03 .....	217
18. Propiedades químicas de la calicata PFYC-03 .....	218
19. Potencial de las capas saprolíticas respecto a la oferta de los horizontes superficiales .....	220

Figura No.

1. Clasificaciones de raíces finas.....	3
2. Secciones transversales de raíces de <i>Acer plantanoides</i> .....	4
3. Series de tiempo de precipitación diaria, temperatura del aire, presión de déficit de vapor, área de índice foliar, densidad de largo de raíz, transpiración del dosel y evapotranspiración simuladas .....	17
4. Visiones conceptuales diferentes de varios aspectos del sistema radicular de los árboles en su impacto en el suelo, regolito y roca .....	23
5. Modelo conceptual de la meteorización biológica.....	25
6. Relación entre las clases de meteorización e la resistencia a la excavación por el método de penetrómetro de impacto .....	30
7. Carta de suelos de prioridad forestal 2010 .....	36
8. Mapa de la cuenca Paraná en sentido amplio .....	46
9. Mapa geológico esquemático de Uruguay con detalle de las unidades de la Cuenca Norte .....	47
10. Columna estratigráfica de la Cuenca Norte .....	48
11. Distribución de los 4 ciclos que componen la mega secuencia Permo-Carbonífera .....	50
12. Asociaciones de facies y facies del ciclo marino a transicional (Pérmico temprano alto) .....	51
13. Resumen de las asociaciones de facies y facies presentes en el ciclo fluvio-eólico (Pérmico tardío).....	52
14. Estructuración de la Cuenca Norte en el sector Noroeste .....	53
15. Mapa y estratigrafía simplificada de la Cuenca Paraná .....	56
16. Tabla estratigráfica detallada de la Supersecuencia Gondwana I.....	57
17. Representación del Gondwana Sur-occidental .....	58
18. Mapa estructural de la Cuenca Paraná.....	59
19. Principales estructuras geológicas del basamento de la Cuenca Paraná .....	61
20. Ubicación de la Cuenca de Paraná en América del Sur .....	64
21. Ubicación de la región Chacopampeana .....	65

22. Isopáquico del Paleozoico superior .....	67
23. Rasgos tectónicos del relleno sedimentario en el borde Norte de las Sierras Pampeanas Orientales .....	67
24. Diagrama de bloques del modelo de evolución sedimentaria de la Formación Rio do Rasto .....	80
25. Paleogeografía del Pérmico tardío.....	81
26. Modelo paleogeográfico, indicadores litológicos, y estratigrafía del periodo semiárido (Guadalupiano tardío Lopingiano) .....	82
27. Morfología de los clastos en el nivel inferior de la cantera de arroyo Zapallar .....	86
28. Perfiles de las Formaciones Yaguarí y Buena Vista .....	89
29. Mapa de América del Sur con la posición del orógeno Gondwanides .....	99
30. Mapa paleogeográfico del SW de Gondwana durante el triásico temprano.....	100
31. Mapa geológico del área de Cuesta Miranda y locación de la sección estudiada en Bordo Atravesado .....	104
32. Mapa paleogeográfico esquemático durante el limite permotriásico .....	108
33. Ubicación del sitio de estudio.....	112
34. Mapa de relieve y elementos geográficos.....	114
35. Mapa de desagües .....	115
36. Llanura con migraciones de cursos, estanques y zonas húmedas .....	115
37. Carta geológica a escala 1/300.000.....	116
38. Carta de reconocimientos de suelos a escala 1:1.000.000.....	119
39. Grupos de suelos CO.N.E.A.T .....	120
40. Mapa de plantaciones .....	122
41. Punto de campo PMZ-026 .....	134
42. Fósiles de <i>Glossopteris</i> .....	135
43. Fósiles <i>Pecopteris</i> .....	136
44. Punto de campo PMZ-027 .....	137
45. Punto de campo PFY-140.....	138

46. Puntos de campo PFY-119 (A) y PFY-152 (B).....	139
47. Puntos de campo PFY-104 (A), 120(B) y 116 (C).....	140
48. Puntos de campo PFYS 118 (A), 121(B), 154(C) y 155(D).....	141
49. Punto de campo PFY-112.....	142
50. Punto de campo PFY-105.....	143
51. Punto de campo PFY 106 (A) y 107 (B,C y D).....	144
52. Bosquejo geológico del perfil de la cantera PFYC-02.....	145
53. Sección SB del punto de campo PFY-023.....	146
54. Sección SA del punto de campo PFY-023.....	147
55. Sección SD del punto de campo PFY-023.....	148
56. Clastos del punto de campo PFY-023 .....	149
57. Concreciones posiblemente de hierro y manganeso .....	150
58. Punto de campo PFY-108.....	151
59. Punto de campo PFY-145.....	152
60. Punto de campo PMZ-035 .....	153
61. Punto de campo PFY-162.....	153
62. Punto de campo PFY-162.2.....	155
63. Mapa geológico.....	161
64. Ubicación de las calicatas profundas .....	164
65. Imágenes panorámicas de las calicatas .....	165
66. Raíces en 0-25 cm (horizontes Ap y AB) en PFYC-01 .....	173
67. Raíces en 25-50 cm (horizonte Bt1) en PFYC-01 .....	174
68. Raíces en 50-100 cm (horizonte Bt2) en PFYC-01 .....	175
69. Raíces en 100-140 cm (horizonte C) en PFYC-01.....	176
70. Raíces en 140-200 cm (capa CrR) en PFYC-01 .....	177
71. Raíces en 0-30 cm (horizontes Ap y AB) en PFYC-02 .....	180
72. Raíces en 30-62 cm (horizonte Bt) en PFYC-02.....	181
73. Raíces en 62-85 cm (horizonte C) en PFYC-02.....	182
74. Raíces en 85-120 cm (capa CrR) en PFYC-02.....	183
75. Raíces en 85-120 cm (capa CrR) en PFYC-02.....	184
76. Raíces en 130-170 cm (capa Rr) en PFYC-02 .....	185



77. Raíces en 0-15 cm (horizonte Ap) en PFYC-03.....	188
78. Raíces en 15-30 cm (horizonte AB) en PFYC-03 .....	189
79. Raíces en 30-45 cm (horizonte Bt1) en PFYC-03.....	190
80. Raíces en 45-90 cm (horizonte Bt2) en PFYC-03.....	191
81. Raíces en 90-100 cm (horizonte C) en PFYC-03.....	192
82. Raíces en 100-115 cm (capa Cr) en PFYC-03 .....	193
83. Raíces en 115-160 cm (capa CrR y R) en PFYC-03 .....	194
84. Raíces observadas por lupa y microscopia electrónica en calicata PFYC-01 .....	199
85. Microscopia electrónica del horizonte C en PFYC-02.....	200
86. Microscopia electrónica de la capa Rr en PFYC-02.....	201
87. Corte transversal de raíz de 2 mm del horizonte Ap en PFYC-03 .....	202
88. Corte transversal de raíz de 1 mm de la capa CrR/R en PFYC-03 .....	203
89. Cortes transversales sin tinción de raíces aplanadas en la capa CrR/R en PFYC-03.....	204
90. Microscopia electrónica de la capa Cr (1) en PFYC-03 .....	205
91. Microscopia electrónica de la capa Cr (2) en PFYC-03 .....	206
92. Microscopia electrónica de la capa CrR/R en PFYC-03 .....	207
93. Geología y plantaciones forestales .....	232
94. Ubicación de perfiles de suelos en base geológica .....	233
95. Perfiles de suelos asociados a litofacies vfSp+fst+cSGtie .....	234
96. Diagrama a escala de los perfiles de suelos asociados a litofacies vfSp+fst+cSGtie .....	235
97. Perfil de la cantera de referencia de la calicata PFYC-01.....	236
98. Perfiles de suelos asociados a litofacies mfSf+Gi.....	237
99. Diagrama a escala de los perfiles de suelos asociados a litofacies mfSf+Gi .....	238
100. Perfil de la cantera de referencia de la calicata PFYC-02.....	239
101. Perfiles de suelos asociados a litofacies Gtn+Ge .....	240

102. Diagrama a escala de los perfiles de suelos asociados a litofacies Gtn+Ge .....	241
103. Corte topográfico con perfiles SSR.....	243

## 1. INTRODUCCIÓN

Estudios de suelos, fertilidad e hídricos, entre otros, se basan en criterios agronómicos tradicionales que implican analizar, describir y priorizar los primeros centímetros del suelo o los primeros horizontes genéticos del mismo. Este es un paradigma que, además de la tradicional discusión de hasta dónde llega el suelo o que es el horizonte “C”, en la actualidad está cambiando hacia un concepto de suelo que abarque más allá de la visión pedogenética tradicional. Este nuevo concepto implica la interrelación de disciplinas, como la agronomía, geología, e hidrología, para cubrir necesidades o políticas no solo agronómicas, tales como políticas de conservación del agua, cambio climático, biodiversidad, recursos energéticos y culturales, entre otros. El desarrollo sostenible es la primera meta de este nuevo enfoque y el caso de la forestación comercial extensiva es un ejemplo útil y práctico de estas necesidades.

En plantaciones forestales, los estudios relacionados a los suelos y todo lo vinculado a ellos, se enfoca generalmente en los primeros horizontes genéticos, primeros centímetros, o en la superficie del mismo. A nivel internacional desde el año 2000, explicado principalmente por las diferencias en los sitios y condiciones de las plantaciones forestales, se ha comenzado a estudiar los suelos a varios metros de profundidad, alcanzando el orden de las decenas. Si bien en Uruguay ya se ha postulado la importancia de expandir el horizonte de estudio a mayor profundidad para las plantaciones de *Eucalyptus*, no se ha desarrollado con la magnitud ni impulsado lo necesario.

En el presente trabajo se plantea generar los primeros aportes preliminares de Uruguay para fomentar el estudio en las plantaciones de *Eucalyptus* en cuanto a su desarrollo radicular profundo y su interacción con el suelo, saprolito (material alterado) y roca. Para esto, se propone que un estudio geológico detallado permitirá extrapolar información fundamental e integral de los suelos para las plantaciones a una extensa área, además de caracterizar a las rocas como un medio potencial de desarrollo radicular profundo. Como objetivos secundarios, con este nuevo enfoque interrelacionado del “suelo”, se buscará generar aportes modestos para los criterios de sitio forestal y otros aspectos relacionados, como el ciclo de nutrientes, del agua, del carbono, modificaciones en la génesis del suelo y sostenibilidad del sistema productivo.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SISTEMA RADICULAR PROFUNDO EN PLANTACIONES DE *EUCALYPTUS* Y OTROS SISTEMAS FORESTALES. ESTUDIOS A NIVEL INTERNACIONAL

#### 2.1.1 Generalidades del sistema radicular en árboles

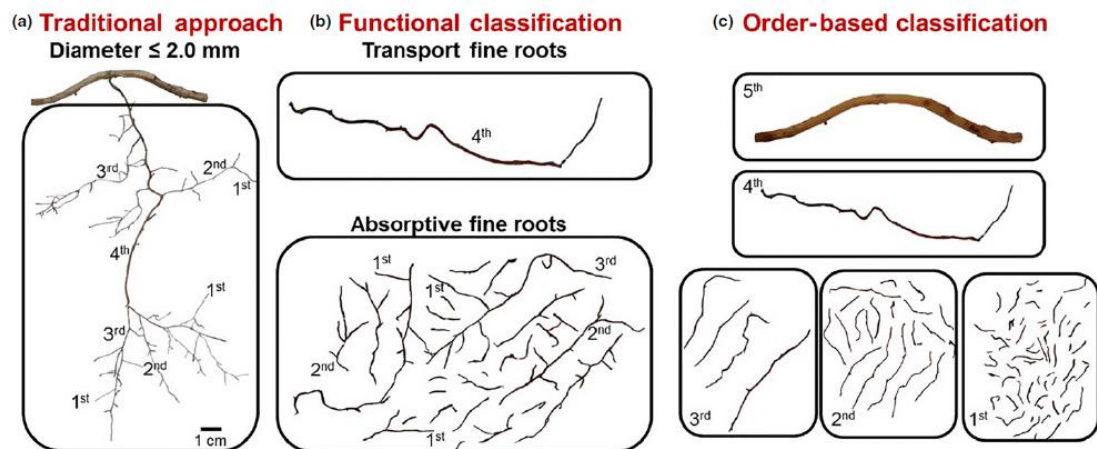
El conocimiento detallado de la arquitectura del sistema radicular es esencial, dado que juega un rol mayor en los ciclos biogeoquímicos globales (Pierrete et al., Radville et al., citados por Lambais et al., 2017), así como un importante rol en mejorar la estructura del suelo (Jama et al., citados por Bouillet et al., 2002), en el anclaje (Coutts y Ennos et al., Fitter, citados por Bouillet et al., 2002) y en la contribución de las raíces al ciclo del nitrógeno (Hendricks et al., Ruess et al., citados por Bouillet et al., 2002). Las raíces son frecuentemente omitidas en las estimaciones de secuestro de carbono, dadas las dificultades y costos asociados con su medición (Herrero et al., 2014). Toda esta información puede ser también utilizada para asistir decisiones de manejo, tales como control de malezas, fertilización y para asegurar el uso más eficiente del agua y de los nutrientes (Nambiar, citado por Bouillet et al., 2002).

Las raíces de los árboles usualmente están concentradas en las capas superficiales del suelo (Jackson et al., Eamus et al., Brassard, Chen y Bergeron, citados por da Silva et al., 2011), encontrándose gruesas raíces de anclaje y transporte, y finas raíces absorbentes y de transporte. Pero, algunas especies de árboles pueden desarrollar sistemas radiculares a decenas de metros en profundidad (Canadell et al., Casper y Jackson, Feikema, Morris y Connell, citados por da Silva et al., 2011), siendo pobremente comprendidos los factores que controlan los crecimientos y mortalidades para estos sistemas radiculares profundos (Pierrete et al., Radville et al., citados por Lambais et al., 2017).

Las raíces finas se definen comúnmente como las raíces menores o iguales a 2 mm de diámetro, y convencionalmente han sido pensadas como el conducto del agua y nutrientes para ser adsorbidos por las plantas, análogas al rol que juegan las hojas en la absorción de carbono y energía (Jackson et al., Pregitzer et al., citados por Butler et al., 2010). Por lo tanto, una medición precisa y fisiológicamente significativa del índice de área radicular es de importancia fundamental para establecer un entendimiento funcional del intercambio de energía y ciclado de nutrientes (Butler et al., 2010). A pesar del rol fundamental de las raíces en el ciclo biogeoquímico global, son pobremente representadas en modelos globales en relación a su contrapartida foliar (Woodward y Osborne, citados por Butler et al., 2010). El área foliar facilita una simulación precisa de la ganancia en carbono y energía en modelos terrestres, y en una manera similar, el área radicular puede proveer información fisiología significativa para simular la utilización del recurso suelo (Butler et al., 2010).

Este único pool de raíces finas, al que históricamente se asignan todas las raíces menores a 2 mm en diámetro, tiene como premisa que todas las raíces tienen una función similar. Estudios recientes han asignado menores diámetros dentro de las raíces finas, con el fin de resaltar a las raíces más finas y absorbentes (McCormack et al., 2015) y otros estudios recientes basados en raíces extirpadas bajo condiciones estandarizadas, mostraron diferencias fisiológicas y funcionales entre raíces profundas y raíces superficiales (Göransson et al., Göransson, Fransson y Jönsson-Belyazid, citados por da Silva et al., 2011). McCormack et al. (2015) proponen dividir en categorías a las raíces finas, clasificándolas por su función. Las raíces finas absorbentes son principalmente responsables de la adquisición de los recursos, mientras que las raíces finas de transporte tienen una reducida capacidad de adquisición de recursos, participando principalmente como conductoras o de transporte de recursos hacia los tejidos superiores (Figura 1).

Figura 1. Clasificaciones de raíces finas



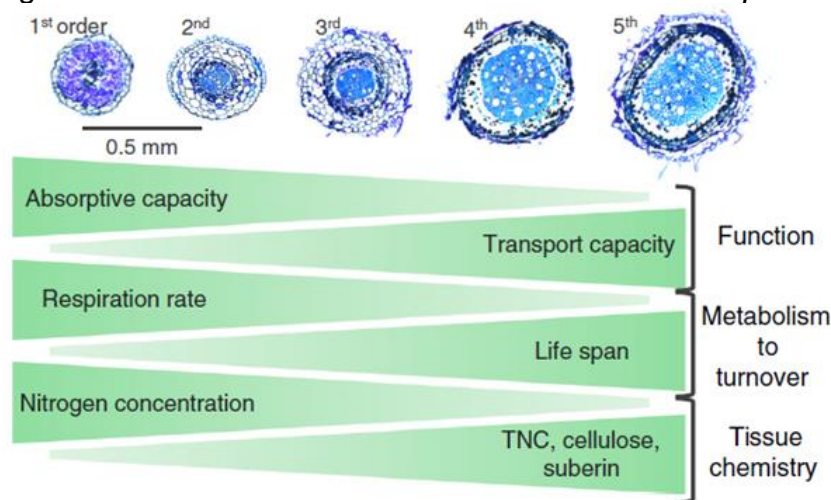
(a) Imagen mostrando una ramificación de raíz intacta de *Liriodendron tulipifera* con todas las raíces finas definidas de forma tradicional como poseedoras de menos de 2 mm de diámetro; (b) la misma ramificación de (a) separada en raíces finas de transporte, y absorbentes de acuerdo a la clasificación funcional; (c) la misma rama de (a) separada en órdenes individuales de raíces. En adición a todas las raíces disectadas por órdenes en (c), ejemplos de órdenes individuales son indicados en (a) y en (b).

Fuente: tomado de McCormack et al. (2015).

Estas variaciones funcionales de las raíces finas se justifican por la transición asociada con la ontogenia, y el desarrollo secundario dentro de la raíz, dado que los tejidos primarios -incluido el córtex- senescen, mientras se desarrolla una peridermia de corcho, las paredes celulares se engrosan y se deposita suberina adicional dentro de la raíz (Figura 2). Estos cambios reducen el movimiento del agua y de los iones de manera radial dentro de la raíz y a

medida que el desarrollo secundario se incrementa, la capacidad de transporte también se incrementa, debido a la construcción de conductos mayores en diámetro por el xilema secundario. El gran potencial en absorción y la mayor colonización de micorrizas en las raíces más finas, las hacen las principales raíces absorbentes. En contraste, las raíces con mayor tejido secundario desarrollado y la mayor tasa de máxima conductancia de las raíces más gruesas las hacen las más importantes en el transporte (McCormack et al., 2015). En la Figura 2 se muestra el típico patrón de incremento de diámetro y desarrollo secundario con el respectivo incremento en orden. Las raíces de primer y segundo orden tienen poco o nada de desarrollo secundario y las raíces de primer a tercer orden todavía poseen células corticales intactas, mientras que la cuarta y la quinta han perdido todo el córtex y en cambio poseen xilema secundario desarrollado dentro.

Figura 2. Secciones transversales de raíces de *Acer plantanoides*



Los triángulos representan de forma simplificada los patrones de las funciones radiculares (absorción y capacidad de transporte) y características de las raíces (tasa de respiración de la raíz  $g^{-1}$ , tiempo de vida, carbohidratos no estructurales totales (TNC) y otros aspectos de la química del tejido) con el incremento del orden. Dependiendo de las características de la especie, el cambio con el orden de la raíz puede no ser lineal. También vale la pena señalar que, a pesar de su importancia reconocida para la función de la raíz, muchos aspectos de la química de los tejidos, incluyendo la celulosa, suberina y contenido fenólico, no están bien estudiados y los patrones con los diferentes órdenes de raíces pueden variar entre especies.

Fuente: tomado de McCormack et al. (2015).

### 2.1.2 El sistema radicular profundo: características, funciones e importancia

El importante rol de las raíces profundas en el ciclo del carbono y del agua ha sido descrito hace varias décadas en ecosistemas forestales tropicales

(Nepstad et al., citados por Laclau et al., 2013), aunque todavía hay pocos estudios que traten sobre el desarrollo de raíces a profundidades mayores a los 5 m (Schenk y Jackson, Christina et al., citados por Laclau et al., 2013). El enraizado profundo es una cuestión funcional importante en ecosistemas terrestres, encontrándose que el desarrollo radicular profundo en los árboles es mayor que en arbustos y pasturas, y que el máximo en desarrollo radicular profundo es mayor en regiones ecuatoriales que en regiones boreales (Jackson et al., Schenk y Jackson, citados por Laclau et al., 2013) pudiendo tener un costo metabólico importante para las plantas (Iversen, citado por Pinheiro et al., 2016).

La dinámica del frente de desarrollo de raíces en capas muy profundas de suelos no ha sido investigada durante el crecimiento del árbol en regiones tropicales y subtropicales. Tal información se está volviendo especial en el contexto del cambio climático y la acelerada conversión de uso de la tierra entre bosque nativo, pasturas, cultivos y plantaciones forestales de rápido crecimiento, dado que, entre otras cuestiones, las plantas con raíces profundas pueden contribuir significativamente al ciclo hidrológico en biomas nativos (Olivera et al., citados por Christina et al., 2011). Aunque los modelos basados en procesos son altamente dependientes de estimaciones de disponibilidad de agua, la habilidad de los árboles de tomar agua en capas muy profundas de suelo durante su desarrollo es aun pobremente conocida (Jackson et al., Tatarinov y Cienciala, citados por Christina et al., 2011). Por otro lado, evidencia experimental de un juego de ecosistemas forestales, muestran que el aumento en concentración de CO<sup>2</sup> atmosférico puede llevar a distribuciones más profundas del enraizado (Iversen, citado por Christina et al., 2011). El crecimiento de raíces finas a profundidad es probable que incremente la resiliencia de los bosques frente al cambio climático, proveyendo acceso a pools de agua almacenada en capas profundas del suelo durante las temporadas de lluvia.

Una tendencia general hacia al sincronidad en la acumulación de biomasa entre la parte aérea y la subsuperficial durante el desarrollo de las plantas es bien documentada (Gedroc et al., Cairns et al., citados por Christina et al., 2011). Sin embargo, poca atención se le ha puesto a la relación entre la extensión vertical de ramas y raíces durante el crecimiento de la planta. Este patrón refleja la estrategia de la planta en explorar su ambiente y es dependiente del desarrollo de raíces finas, que representan una fracción muy baja del total de biomasa de la planta. Basándose en una recopilación de la literatura disponible, se han encontrado que al menos 22 especies de árboles desarrollan raíces a más de 10 m de profundidad, con el record de profundidad de 60 m para *Juniperus monosperma* y *Eucalyptus spp.* (Stone y Kalisz, citados por Christina et al., 2011).

El agua es requerida para movilizar los nutrientes dentro del suelo y para suministrar esos nutrientes a las raíces por medio de flujo de masa o difusión (Nye y Tinker, citados por McCuelley et al., 2004). De haber estrés hídrico, las respuestas de las plantas al mismo involucran cambios morfológicos y bioquímicos, que llevan primero a la aclimatación y luego, a medida que el estrés es más severo, a daños funcionales y a la pérdida de partes de la planta (Chaves et al., citados por Costa e Silva et al., 2004). Durante la etapa de aclimatación, el estrés hídrico resulta típicamente en tasas de crecimiento menores, dado la inhibición de la expansión celular y la reducción de la asimilación de carbono (Osório et al., citados por Costa e Silva et al., 2004). El crecimiento aéreo de las plantas puede ser luego disminuido por cambios en la partición de carbono, que favorezcan el desarrollo radicular (Sharp y Davies, citados por Costa e Silva et al., 2004) principalmente porque el crecimiento radicular es menos afectado por la sequía que el crecimiento de ramas (Sharp, Hsiao y Xi, citados por Costa e Silva et al., 2004). Entonces las respuestas de las plantas a las sequías dependen fuertemente del balance raíz-ramas, sin embargo, hojas y ramas han sido mucho más estudiadas en detalle que las raíces (Costa e Silva et al., 2004).

Existen varios procesos o mecanismos de adaptación de los árboles frente al estrés hídrico que deben ser considerados. Según Caldwell (1997) el ascenso hidráulico (“hydraulic lift”) es el proceso del movimiento de agua desde capas del suelo relativamente húmedas a capas secas, por medio del sistema radicular como conducto y el agua en fase líquida. El agua es liberada desde las raíces, durante periodos donde la transpiración cesa (usualmente por la noche) hacia las capas superiores del suelo, donde es entonces absorbida al día siguiente y transpirada. Periodos secos, aunque sean cortos, son característicos de la mayoría de los biomas, y el necesario gradiente en potencial gravitacional para el ascenso hidráulico pueden existir esporádicamente o regularmente en muchos suelos durante la etapa de crecimiento. Un número incremental de estudios muestran que, el ascenso hidráulico puede ser un fenómeno general en el sistema radicular, ampliamente difundido en diferentes taxas y ecosistemas. Hay muchos factores indirectos a considerar sobre el ascenso hidráulico, incluyendo el beneficio de plantas vecinas, la adquisición de nutrientes, procesos biogeoquímicos en el ciclado de nutrientes y crecimiento y persistencia radicular en suelos secos. Estas consecuencias indirectas son, probablemente, las más significativas ecológicamente, y pueden ser la razón de su evolución en las plantas.

Otro mecanismo en sentido opuesto, es el proceso de transferencia de agua hacia capas profundas del suelo, llamado ascenso hidráulico inverso (Schulze et al., citados por Burgess et al., 2000). Se ha demostrado el ascenso hidráulico invertido en arena muy seca, durante un periodo corto de tiempo (3



días) y se interpreta la importancia de este fenómeno principalmente para permitir el crecimiento de raíces en ambientes donde el agua es limitante para penetrar capas secas del suelo y lograr alcanzar fuentes profundas de humedad (Schulze et al., citados por Burgess et al., 2000). Se realizaron estimaciones en proporción de agua diaria tomada por raíces laterales y trasferidas hacia capas profundas de suelo, siendo de un 26%, lo que sugiere que este proceso puede ser un componente substancial del balance de agua en el suelo (Smith et al., citados por Burgess et al., 2000).

Estudios recientes sugieren que la redistribución hidráulica y la recarga de agua del suelo, representan un posible beneficio de las raíces profundas en ecosistemas áridos (Burgess et al., Jackson et al., Richards y Caldwell, Ryel et al., Smith et al., citados por McCulley et al., 2004). Estos estudios muestran que hay movimientos pasivos de agua a través de las raíces de las plantas, entre capas profundas y superficiales de suelo, por medio de gradientes de potenciales de agua. Estos mecanismos pueden resultar en agua moviéndose hacia arriba o hacia abajo, dentro del perfil, dependiendo de las condiciones ambientales (McCulley et al., 2004). Aunque la redistribución hidráulica ha sido probada para más de 50 especies globalmente, la estacionalidad y los beneficios para plantaciones comerciales son poco claros (Hultine et al., Moreira et al., citados por McCulley et al., 2004).

### 2.1.3 Estudios sobre la profundidad del sistema radicular en plantaciones de *Eucalyptus*

El estudio del sistema radicular en las plantaciones de *Eucalyptus* tienen como justificación productiva, que fuertes relaciones entre biomasa aérea y biomasa de raíces finas han sido mostradas durante las primeras etapas del crecimiento de plantaciones de *Eucalyptus globulus* (O'Grady et al., citados por Pinheiro et al., 2016) y en *Eucalyptus grandis* (Laclau et al., citados por Pinheiro et al., 2016).

Laclau et al. (2001) estudiaron plantaciones de *Eucalyptus* en el Congo, donde observaron alta heterogeneidad espacial en la distribución de raíces de *Eucalyptus*, y un decrecimiento en la densidad con la profundidad del suelo. A su vez los autores encontraron que las raíces de *Eucalyptus* pudieron crecer en suelos compactados (resistencias mayores de 6000 KPa), sin embargo, durante la temporada húmeda, todo el suelo es humedecido y su resistencia permaneció por debajo de los 3000 KPa sin importar la profundidad, por lo que la presencia de raíces finas en suelos secos que exhiben alta resistencia puede estar asociado con exploración del suelo por raíces durante la época húmeda. Laclau et al. (2001) observaron que las raíces exploraron preferencialmente el

suelo por debajo del tocón, pero la densidad de raíces decreció rápidamente por debajo de los 50 cm del tocón.

Bouillet et al. (2002) estudiaron en plantaciones de *Eucalyptus* en el Congo la distribución espacial de las raíces en función de la edad. Los autores detallan que los clones pueden rápidamente desarrollar su sistema radicular, observándose raíces de tamaños medios a 1,5 m de distancia lateral desde el tronco a 3 meses después de plantado, y las raíces logran explorar al menos hasta 3 m en profundidad en la plantación de 1 año. Estos resultados muestran que la tasa de crecimiento de las raíces de tamaño medio en las capas superiores de suelo fue de al menos 1,6 cm por día (promedio sobre un periodo de 3 meses) y 0,8 cm por día aproximadamente (promedio sobre un periodo de 1 año) en los horizontes profundos. Estos datos indican que, después de unos pocos meses, el desarrollo radicular no fue limitado a las áreas cercanas al tronco, sino a todo el sitio. Bouillet et al. (2002) señalan que estos resultados son similares a los confirmados para *Eucalyptus* en Kenya, donde plantaciones de 11 meses desarrollaron raíces a 4 m de profundidad (Jama et al., citados por Bouillet et al., 2002) y a los resultados observados en Brasil para plantaciones de *Eucalyptus* de 8 meses y 2 años con raíces a 3,9 m y 6,2 m de profundidad respectivamente (Pacheco y Louzada, citados por Bouillet et al., 2002). La frecuencia de intersección de raíces decrece rápidamente después de los 2 m, independientemente de la edad de la plantación, sin embargo, estas escasas raíces profundas juegan un rol crucial en el consumo de agua durante la temporada seca, cuando las capas superficiales de suelo se encuentran cercanas al punto de marchitez (Laclau et al., citados por Bouillet et al., 2002). Bouillet et al. (2002) observaron un gran incremento en biomasa aérea en los dos primeros años que coincide con un gran incremento en la densidad de raíces. Esto es coincidente con lo que otros autores reportaron para etapas tempranas de crecimiento, donde observaron una cercana relación entre el incremento corriente anual en biomasa aérea y la biomasa de raíces finas (Misra et al., citados por Bouillet et al., 2002) o con raíces de tamaño medio (Fabiao et al., Misra et al., citados por Bouillet et al., 2002). En el estudio realizado por Bouillet et al. (2002), esta relación también se observó en etapas avanzadas, cuando un descenso en la densidad de raíces en capas profundas entre 6,5 y 9 años de edad se correspondieron con un marcado decrecimiento aéreo (Mabounou et al., citados por Bouillet et al., 2000).

Laclau et al. (2010) mencionan que para plantaciones de *Eucalyptus* en el Congo y Brasil, la biomasa foliar alcanza su máximo cerca de los 2 años, y el desarrollo radicular de raíces finas pasa los 3 m de profundidad en el primer año de plantación. Estos autores manifiestan que el crecimiento rápido es una característica general para los *Eucalyptus* intensamente manejados, llevando a

un agudo incremento en requerimientos de nutrientes para el establecimiento de la copa desde los 6 meses de plantación.

Christina et al. (2011) estudiaron en el estado de San Pablo, Brasil, plantaciones de *Eucalyptus* en ferralesoles profundos. Los investigadores observaron que el crecimiento vertical temprano de los árboles fue rápido, por arriba y debajo del suelo, alcanzando 10,4 m en altura y 9,2 m en profundidad a la edad de 1,5 años, y 19,2 m en altura y 15,8 m en profundidad a la edad de 3,5 años. El frente radicular, al igual que el crecimiento en altura, siguió un patrón similar hasta los 3,5 años de edad. Desde los 3,5 años en adelante, la profundidad radicular no se incrementó, siendo el frente de desarrollo radicular un 85% de la altura del árbol hasta la altura promedio de 20 m, dado que las raíces finas alcanzaron la cercanía de la napa freática y la relación en crecimiento subterráneo y aéreo ya no fue válida. Los datos sugieren una exploración uniforme del suelo por parte de las raíces finas, y un movimiento descendente del frente de raíces a la misma velocidad, cualquiera sea la distancia del árbol. Aunque las profundidades mayores de 10 m ya fueron exploradas por raíces finas a los 2,5 años, la profundidad radicular correspondiente al 95% de la masa de las raíces finas permaneció a profundidades menores de 5 m durante todo el crecimiento y sin importar la edad, las raíces por debajo de los 3 m representan menos del 10% del total de raíces finas. Por lo tanto, los árboles de *Eucalyptus grandis* rápidamente exploran un volumen considerable de suelo a un limitado costo de carbono y el crecimiento radicular profundo en capas muy profundas del suelo desde el primer año de plantación, sugiere que hay una fuerte determinación ontogénica de la exploración profunda del suelo. La hipótesis del equilibrio funcional según la cual las plantas adaptan sus estrategias de asignación de biomasa en profundidad a las variaciones edáficas y climáticas no parece aplicarse en estas plantaciones tropicales de rápido crecimiento (Christina et al., 2011). Una ocupación rápida del espacio puede llevar a una ventaja en la competencia en ambientes con diferentes especies con limitados recursos y los *Eucalyptus*, en su ambiente natural, están entre las especies dominantes establecidas en suelos profundos y bien drenados (Boland, citado por Christina et al., 2011), explorando rápidamente capas profundas del suelo para acceder al agua por debajo de la capacidad de carga del suelo superficial (Christina et al., 2011). De hecho, según Adams (1996) la distribución natural a través de Australia del género *Eucalyptus* es determinada por una variedad de factores ambientales, pero particularmente por la disponibilidad de agua, la cual es fuertemente influenciada por las formas del relieve. En síntesis, Christina et al., (2011) observaron una extensión vertical área y subsuperficial casi simétrica. El factor comúnmente usado de que el 95% de raíces en profundidad (Cornillessen et al., Schenk y Jackson, citados por Christina et al., 2011) permanece dentro de los primeros 5 m del suelo, no parece acorde para representar la importancia

funcional de las escasas raíces muy profundas durante déficits de agua en las capas superficiales del suelo.

Laclau et al. (2013) estudiaron plantaciones de *E. grandis* sobre ferralsoles profundos (mayores a 10 m) durante toda la rotación en el Congo. Obtuvieron valores para el desarrollo radicular profundo, los cuales mostraron tasas de elongación descendente cercanas a 2 cm día<sup>-1</sup>, que fueron similares a la tasa media de crecimiento en altura dentro de los dos primeros años de la plantación. La velocidad media del frente radicular al primer año de plantación es cercana a los valores más altos reportados para especies freatofitas (Laclau et al., 2013). La mayoría del volumen del suelo fue explorado por raíces finas en los primeros 3 m de suelo, desde el 1 año de plantado en adelante (Laclau et al., 2013). La ocupación del espacio del suelo por las raíces finas fue isotrópica por debajo de los 60 cm (Maurice et al., citados por Laclau et al., 2013) mientras que tanto anisotropía como isotropía se puede encontrar representando menos del 20% del total de intersecciones de raíces fina a una profundidad de 10 m para todas las edades de plantación. Las estimaciones del frente radicular mediante diferentes enfoques realizadas por estos investigadores son consistentes y confirman una sincronidad con la extensión vertical aérea mostrada por Christina et al. (2011) en plantaciones de *E. grandis*.

Herrero et al. (2014) estudiaron el sistema radicular de *E. globulus*, comparando plantaciones y rebrotes en el Norte de España. Los resultados indican que la biomasa radicular contabiliza el 15% y el 35% del total de la biomasa en montes plantados y en rebrotes respectivamente, a una edad de ramas igual de 9 años. También se encontró que el tipo de monte, el tipo y la edad de plantación influyen en el número de raíces por sistema de raíz, el volumen del sistema de raíces y el largo de raíz. Los resultados en valores de extensión y máximo de profundidad están dentro del rango identificado por otros autores (Laclau et al., Szota et al., citados por Herrero et al., 2014). Los montes de rebrotes poseen cerca del doble de parte aérea y cuatro veces la biomasa subterránea respecto a los montes plantados, a una edad igual de ramas de 9 años. Los montes de rebrotes presentan un mayor número de raíces y un mayor volumen del sistema radicular, pero menor largo radicular. Por esto, se concluye que el largo radicular es influenciado por factores distintos al tiempo desde el establecimiento de la plantación. Este trabajo dirige la atención a la acumulación de carbono en el sistema radicular de *Eucalyptus globulus*, particularmente en rebrotes, donde esta fracción representa el 35% del total de la biomasa y puede almacenar carbono durante varias décadas.

Pinheiro et al. (2016) estudiaron la exploración radicular profunda de *Eucalyptus* en el estado de San Pablo, Brasil, discriminando ente árboles provenientes de semillas y clónales. Las distribuciones en largo de las raíces

finas a través del perfil del suelo fueron similares, tanto para las plantaciones de semillas como para las clonales, con aproximadamente el 50 % del total del largo de raíces finas en los 2 primeros metros del suelo y menos del 5 % del total del largo de raíces finas por debajo de los 8 m. Este estudio también muestra una rápida exploración de las capas del suelo profundo por raíces finas para la mayoría de los árboles de origen de semilla y clones productivos comerciales de las plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil, con profundidades del frente de enraizamiento correspondientes a aproximadamente la altura media del monte, acorde a la sincronización área y subsuperficial ya mencionada. Los autores remarcan que esta relación entre la altura del árbol y el frente radicular, es probablemente solo válida en ausencia de barreras físicas o químicas en el suelo.

Pinheiro et al. (2016) proponen, según sus resultados, la confirmación de que un muestreo preciso de las capas profundas del suelo es una prioridad en plantaciones de *Eucalyptus* de 2 años de edad establecidos en suelos ferralesoles. De hecho, según lo encontrado por estos investigadores, las raíces finas en los 0-0,5 m del suelo contabilizaron solamente el 23-39% del total en largo de las raíces finas hasta el final inferior del frente de enraizamiento, remarcando que un excepcional esfuerzo de muestreo en capas profundas del suelo es más relevante que una alta intensidad de muestreo en la parte superior del suelo para estimar adecuadamente el total de biomasa de raíces finas, largo de raíces finas y área de raíces finas.

Otros estudios sugieren que la variación espacial en la capa superior del suelo es relativamente baja en plantaciones tropicales de *Eucalyptus*, y que las capas mayores a 1 m de profundidad contienen una porción grande del total de biomasa radicular (Bouillet et al., Laclau et al., citados por Pinheiro et al. 2016). En sintonía con la prioridad en el muestreo de raíces profundas, Pinheiro et al., (2016) sugieren que, dada la variación en la profundidad del frente de enraizamiento y la gran variación en biomasa radicular fina dependiente del genotipo, sería un interesante criterio de selección a ser considerado, antes de plantar nuevas especies de clones a gran escala. Encontrar genotipos que maximicen el largo de raíces finas y el área de raíces finas por medio de un determinado gasto en biomasa subterránea, seguramente mejore la adquisición de agua y nutrientes.

#### 2.1.4 Almacenaje de carbono, uso del agua y nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus* y efectos de la sustitución de pasturas por forestación

Goya et al. (1997) proponen que los principales aspectos a considerar en la forestación son la protección de la fertilidad de los suelos, manejarse

dentro de límites conocidos de resiliencia del sitio considerando en forma racional la interrupción de los ciclos hidrológicos y de nutrientes, y, por último, el impacto sobre la productividad del sitio debe ser controlado a través del mejoramiento de las prácticas silviculturales.

Las plantaciones de *Eucalyptus spp.* son establecidas para proveer una parte de las crecientes necesidades madereras a futuro, ayudando a reducir la presión sobre los bosques nativos. Sin embargo, la consecuencia de grandes plantaciones comerciales en la hidrología natural y el secuestro de carbono permanecen controversiales (Cossalter y Pye-Smith, Jackson et al., Vanclay, citados por Christina et al., 2011), además de que hay poca información sobre las consecuencias de la forestación con plantaciones de *Eucalyptus spp.* en tierras de pasturas previas, en cuanto al almacenamiento de carbono y al uso de agua y nutrientes en las nuevas capas profundas del suelo potencialmente alcanzables por el cambio de vegetación (Laclau et al., 2013).

Introducir vegetación con exploración radicular profunda en sistemas de exploración radicular superficial, puede generar el almacenamiento de carbono en profundidad (Jobbágy y Jackson, citados por Christina et al., 2011). Una renovación de raíces finas en un volumen de suelo considerable, así como cosechas y replantaciones de árboles cada 6-7 años en plantaciones de rotaciones rápidas, como las de *Eucalyptus spp.*, puede llevar a la liberación de cantidades considerables de carbono fresco en capas profundas del suelo (Christina et al., 2011).

Es bien conocido que *Eucalyptus spp.* puede acceder a agua en capas profundas del suelo y puede agotar agua subterránea en cuencas por extender raíces a la napa de agua (Cohen et al., Le Maitre y Versfeld, citados por Laclau et al., 2001).

Burgess et al. (2000) utilizaron el “heat ratio method” (HRM), que mide el flujo de sabia en raíces leñosas, indicando la cantidad de agua redistribuida hacia capas profundas de suelo por dos árboles de *Eucalyptus spp.*. Estos autores encontraron que las raíces transfieren cantidades significativas de agua hacia abajo, a las capas secas de suelo, cuando las capas superficiales del suelo se humedecen luego de la lluvia. En sentido inverso, la capacidad de redistribuir agua entre las capas de suelo por ascenso hidráulico es probable que tenga influencia en la performance del cultivo y en las interacciones planta-planta (Dawson, citado por Christina et al., 2011). La capacidad adecuada de los modelos hídricos para estimar el estatus y flujos hídricos y de nutrientes en el suelo, dependen fuertemente de una descripción realista de la distribución de las raíces en el suelo (Bruckler et al., Habib et al., Lafolie et al., Molz, Nouvellon et al., citados por Bouillet et al., 2002).

Grandes demandas de agua por parte de las plantaciones de *Eucalyptus spp.* en relación a las pasturas que reemplazan, puede estar fuertemente involucradas en la reducción de los flujos de corrientes ampliamente observadas luego de la forestación (Jackson et al., citados Christina et al., 2011) y puede estar influyendo en la humedad atmosférica (Vanclay et al., citados por Christina et al., 2011). El rápido crecimiento profundo de raíces puede ser un factor importante que lleva a altas tasas de evapotranspiración durante el desarrollo de estas plantaciones. También, las raíces profundas de los *Eucalyptus spp.* provén acceso a grandes cantidades de agua almacenadas en capas muy profundas del suelo durante las épocas lluviosas, pudiendo contribuir a reducir la recarga de las napas freáticas (Christina et al., 2011) en comparación con una pastura previa caracterizada por menores demandas y sistemas radicales superficiales (Nepstad et al., citados por Christina et al., 2011). A escala regional, las consecuencias de grandes áreas de bosques plantados en el ciclo del agua y los patrones de circulación de la humedad atmosférica, pueden ser significativas (van Dijk y Keenan, citados por Christina et al., 2017). Algunas investigaciones concluyen que grandes áreas de pasturas forestadas probablemente disminuyan su temperatura cerca de la superficie y los flujos de vapor de agua se incrementen a la atmosfera (Bruijnzeel, Pielke et al., Alkama y Cescatti, citados por Christina et al., 2017), lo que puede generar mayores tasas de precipitación (Hoffmann y Jackson, Spracklen et al., citados por Christina et al., 2017).

El hecho de que los bosques plantados de *Eucalyptus spp.* reciclen la mayoría del agua de lluvia en la atmosfera, es comparable a la humedad de los bosques tropicales, dado que “la extracción del agua del suelo por las raíces de los árboles a 10 m de profundidad, vuelve a la atmosfera (un servicio de transpiración), es quizás el más importante servicio ecosistémico regional” (Malhi et al., citados por Christina et al., 2017).

La preocupación de que los bosques plantados de rápido crecimiento puedan afectar los flujos de los cursos de agua es creciente (Scott y Prinsloo, Malmer et al., citados por Christina et al., 2017). En concordancia con el monitoreo de largo plazo en plantaciones de *Eucalyptus spp.* en Brasil (Almeida et al., citados por Christina et al., 2017) los resultados sugieren que los manejos de grandes áreas de estas plantaciones pueden afectar el recurso hidrológico (Christina et al., 2017). Un análisis global de más de 500 cuencas, mostro que los flujos de los cursos disminuyen dramáticamente dentro de pocos años después de la plantación de los bosques, en promedio 227 mm/año (Jackson et al., citados por Christina et al., 2017). Aunque, esta tendencia general negativa en el recurso de agua en el suelo es altamente dependiente de las condiciones locales (Christina et al., 2017).

Dye (1996) observó que, *E. grandis* de 3 años de edad fueron capaces de extraer agua desde una profundidad de 8 m, mientras que *E. grandis* de 9 años de edad obtenían la mayor parte del agua de profundidades por debajo de los 8 m. El autor plantea problemas para modelar el balance de agua en zonas profundas dado la incertidumbre sobre la profundidad a la que llegan las raíces, el mecanismo de recarga del agua del suelo y las características de retención de agua por parte de los estratos profundos del subsuelo. El autor plantea que los déficits de agua en el suelo no causaron estrés severo en los árboles en ningún sitio, aun cuando el estudio comenzó después de una particular sequía de verano. La carencia de respuesta a la falta de agua en el suelo puede ser atribuida a la habilidad de los árboles de extraer agua del suelo a profundidades de al menos 8 m. Para los árboles de 3 años de edad, Dye (1996) encontró que la extracción de agua del suelo a profundidades de entre 1 y 8 m fue estimada en 183 mm (14% del flujo de sabia medido), indicando que la mayoría del agua fue obtenida de profundidades mayores a 8 m. Para los árboles de 9 años, se encontró que la extracción de agua entre 1 y 8 m fue estimada en solamente 4,5 mm (1,6% del flujo de sabia) y que perforaciones profundas revelaron raíces vivas a 28 m por debajo de la superficie. El autor plantea, dada la importancia del agua profunda en el perfil de suelo, la importante pregunta de que si el agua puede ser recargada durante el cultivo continuo de *Eucalyptus spp.*. A su vez, enmarca que, si bien la ganancia neta de agua por el suelo puede ser anticipada en los primeros 12-18 meses luego de la plantación antes que las copas cierren y se alcance el máximo de área foliar, a largo plazo parece probable que la extracción sea mayor a la recarga en las situaciones del estudio, donde unas infiltraciones netas de 1000 mm solamente llevarían a capacidad de campo 8 m de un perfil seco. Sin embargo, la posibilidad de una infiltración no uniforme hacia lo profundo del perfil, particularmente por medio de viejos o actuales canales de raíces, podrían llevar a una rápida recarga del subsuelo profundo en la presencia de árboles (Dell et al., citados por Dye et al., 1996).

Laclau et al. (2001) describen que la habilidad de las raíces finas de *Eucalyptus spp.* de concentrarse debajo de áreas de infiltración preferencial puede explicar tanto la distribución de raíces, como el rápido desecamiento del suelo en áreas de drenaje preferente. Altas densidades de raíces finas en canales de drenaje preferentes pueden resultar de la baja fuerza del suelo en áreas húmedas y de la alta concentración de nutrientes lixiviados, representando una alta porción de nutrientes disponibles en la plantación estudiada. La canalización preferencial en el suelo arenoso estudiado, puede resultar de la hidrofobicidad en la superficie del suelo.

Debajo del suelo superficial, Bouillet et al. (2002) encontraron áreas donde las raíces se agrupaban y áreas donde no había ninguna, lo que está en



intonía con lo propuesto por Laclau et al. (2001), argumentando que este patrón de distribución puede estar explicado por la existencia preferencial de caminos de infiltración del agua, resultado de la severa hidrofobicidad de la superficie del suelo y acumulación de nutrientes.

Según lo observado por Christina et al. (2011), la extracción activa de agua por parte de los *Eucalyptus spp.* se extendió a una profundidad de 3 m durante los periodos secos, comenzando al segundo año de plantación, encontrándose una reducción del contenido de agua a la profundidad de 10 m desde los 3.5 años a los 4,6 años, indicando que el agua fue extraída al final de la rotación.

Laclau et al. (2013) encontraron que el contenido volumétrico de agua en el suelo a una profundidad de 6-7 m en plantaciones de *Eucalyptus spp.* con aproximadamente 1 año de edad, fue similar a los valores al final de la temporada seca antes de la cosecha (6 años), lo que solo puede ser explicado por una extracción de agua substancial. A pesar de la tendencia hacia la aglomeración de raíces finas en las capas profundas del suelo, el contenido volumétrico de agua del suelo indica que escasas densidades de raíces finas tienen la capacidad de extraer grandes cantidades de agua. Laclau et al. (2013) reflexionan sobre que estos resultados sugieren que el rol funcional de raíces profundas no ha sido tomado en cuenta lo suficiente por parte de los productores forestales.

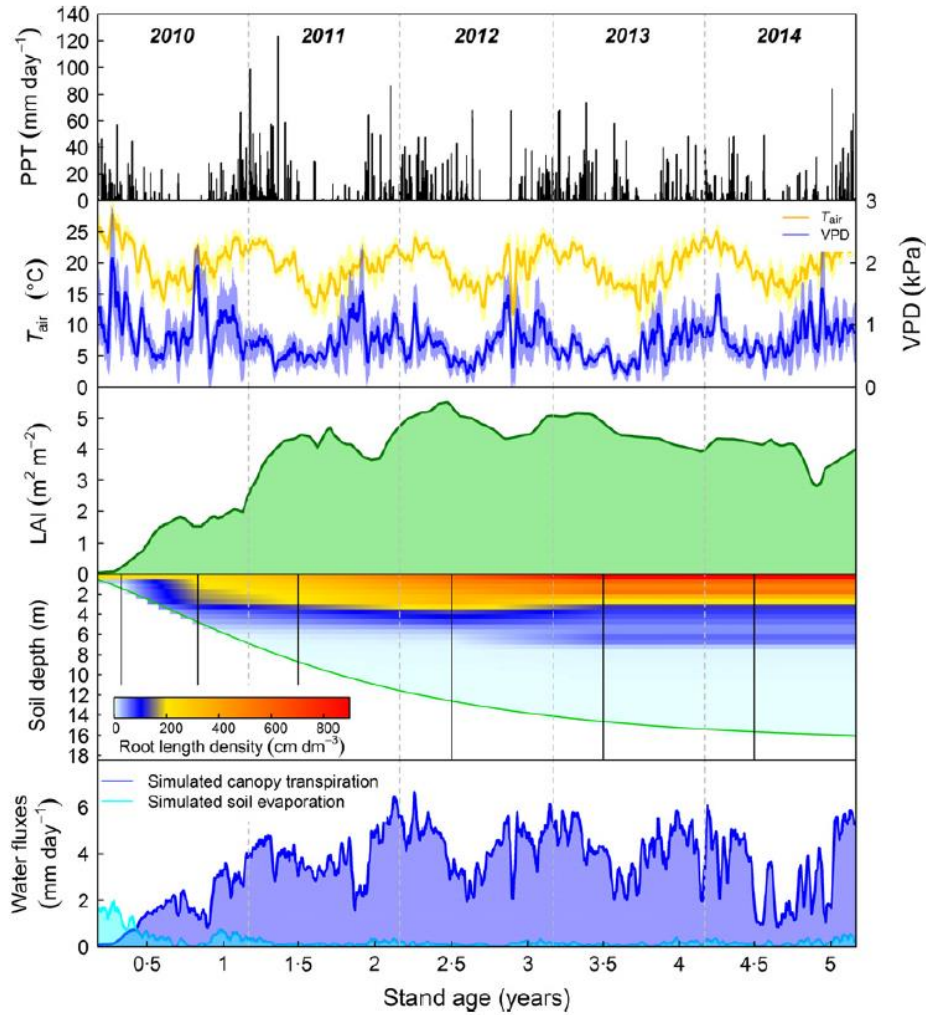
En consonancia con la reflexión de Laclau et al. (2013), Marsden et al. (2013) manifiestan que grandes diferencias en la productividad han sido observadas entre plantaciones vecinas de *Eucalyptus spp.* en Brasil, que no pueden ser explicadas por el clima, y muy poco probablemente que sean solamente por prácticas de manejo diferentes. Modelos ecofisiológicos actuales, usados por compañías forestales para simular el desarrollo del cultivo en grandes áreas de plantación, recaen en índices empíricos de fertilidad del sitio (representando disponibilidad de agua y nutrientes) para capturar la variación espacial en las tasas de crecimientos. Marsden et al. (2013) presentan una versión modificada que implica un intermedio en detalle entre el modelo original G´DAY y el modelo más detallado CABALA (Battaglia et al., citados por Laclau et al., 2013). El modelo capturo el 96% de la variabilidad en la biomasa de tallos medida en fechas de inventarios. En estas simulaciones, el único parámetro que varía entre las plantaciones fue la capacidad de retención de agua por el suelo, obteniéndose estos resultados sin requerir ninguna información empírica de clasificación en índices de fertilidad. Modelos previos en estudios en Brasil, para plantaciones de *Eucalyptus spp.* son limitadas a la extracción de agua a profundidades de 2-2,5 m (Soares y Almeida, Almeida et al., Stape et al., citados por Laclau et al., 2013). Las medidas de contenido de humedad a profundidades de 5 m mostraron variaciones temporales considerables, lo que

indica la necesidad de considerar el agua profunda almacenada en el suelo. Mardsen et al. (2013) concluyen que más allá de la relativamente alta lluvia observada en el área de estudio (Brasil), y el rápido desarrollo radicular (mayor a 10 m), la disponibilidad de agua parece ser el factor principal limitante en la productividad en estas plantaciones fertilizadas. En síntesis, el modelado para la respuesta al crecimiento tiene como características cruciales la humedad del suelo y la capacidad de retención de agua del mismo para lograr simulaciones precisas para las plantaciones productivas.

Por su parte Pinheiro et al. (2016) consideran que la velocidad del frente de raíces puede ser un factor importante a considerar en programas de mejoramiento genético de esta especie dado que un eventual acceso a la napa freática puede explicar crecimientos y tasas de sobrevivencia diferentes entre clones en periodos excepcionalmente secos (Harper et al., Decker et al., Poot y Veneklaas, Matusick et al., Zolfaghar et al., citados por Pinheiro et al., 2016).

Chritina et al. (2017) enfatizan la importancia del uso de agua profunda por parte de *Eucalyptus spp.* en clima tropical. En este estudio marcan la alta variabilidad temporal de la disponibilidad de agua en plantaciones de *Eucalyptus spp.* creciendo en suelos tropicales. La exploración radicular profunda es un mecanismo clave para evitar la sequias en plantaciones altamente productivas. El crecimiento rápido descendente de las raíces provee acceso a grandes cantidades de agua almacenadas en capas profundas del suelo durante temporadas húmedas, lo que amortigua la variabilidad intra anual de las precipitaciones y sustenta el crecimiento de los árboles durante los periodos secos. Las raíces profundas pueden alcanzar casi 20 m de profundidad en una rotación de 5-7 años en *Eucalyptus spp.* plantados, dando acceso a grandes volúmenes almacenados de agua (Figura 3). La alta dinámica en la toma de agua en todas las capas del suelo para suministrar la demanda de agua durante el crecimiento sugiere que será esencial para ganar visión en las estrategias especie-dependiente en el enraizado profundo para mejorar los actuales modelos ecohidrológicos en bosques tropicales.

Figura 3. Series de tiempo de precipitación diaria, temperatura del aire, presión de déficit de vapor, área de índice foliar, densidad de largo de raíz, transpiración del dosel y evapotranspiración simuladas



Precipitación diaria (PPT, mm día<sup>-1</sup>), temperatura del aire ( $T_{air}$ , °C), presión de déficit de vapor (VPD, KPa), área de índice foliar (LAI, m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup>), densidad de largo de raíz (RLD, cm dm<sup>-3</sup>) y transpiración del dosel y evapotranspiración simuladas (mm día<sup>-1</sup>) durante 5 años después de la plantación de Eucalyptus. Las líneas verticales en la figura de densidad de largo de raíz indican las fechas donde los perfiles de raíces fueron medidos, y la línea verde es el máximo medido en profundidad radicular.

Fuente: tomado de Christina et al. (2017).

Christina et al. (2017) plantean dos etapas de crecimiento correspondientes a los diferentes pools de agua disponible para las raíces de

los árboles pueden ser distinguidos, los dos enfatizando las diferentes ventajas de las raíces profundas. En la etapa temprana de crecimiento, antes que las copas cierren a los 2 años, un rápido crecimiento descendente de las raíces provee acceso a grandes cantidades de agua almacenada en capas profundas del suelo, luego de la corta del monte anterior. Es apreciable que, durante el primer mes de vida, se observa un rápido crecimiento de raíces en profundidad aun habiendo suficiente agua disponible en las capas superficiales del suelo para mantener la demanda de agua del monte. Las raíces alcanzan 10 m de profundidad después de los 2 años. Esta estrategia de rápida colonización de capas profundas de suelo para evitar la sequía le da acceso a grandes cantidades de agua durante las primeras etapas de crecimiento, lo cual probablemente sea un factor clave para alcanzar los picos de producción de biomasa generalmente observados después de los 2 años en las plantaciones de Brasil (Stape et al., citados por Christina et al., 2017). Esto también es consistente con la baja sensibilidades de las plantaciones de *E. grandis* a la sequía antes de que las copas cierren (Battie-Laclau et al., citados por Christina et al., 2017).

En una segunda etapa de crecimiento, después del cierre de las copas, los árboles de *Eucalyptus spp.* toman ventaja de su sistema radicular dual (Canadell y Zedler, Fan, citados por Christina et al., 2017), donde, con el sistema radicular superficial utilizan la lluvia de la temporada, mientras que, en las épocas secas, los árboles utilizan su sistema radicular profundo para toma agua almacenada en el suelo durante temporadas húmedas previas y durante los primeros meses luego de la cosecha del monte anterior (agua por debajo de los 10 m, incluyendo napas freáticas). Durante la segunda etapa, después del cierre de copas, se muestra que los árboles pueden también tomar agua que viene de la franja capilar, y, por lo tanto, la zona saturada actúa como otro pool de agua. Sin embargo, durante esta etapa de crecimiento la cantidad anual de agua transpirada por los árboles es principalmente dependiente de la lluvia anual.

Lambais et al. (2017) muestran que la estacionalidad en el crecimiento de las raíces finas es mucho más marcada en profundidad que en la superficie del suelo. La tasa de crecimiento en capas profundas puede estar controlada por procesos fisiológicos a escala de toda la planta, y en particular en respuesta a la disminución en la disponibilidad de agua en las partes superiores del suelo. Los valores medios y máximos en la velocidad de elongación de raíces finas se incrementan con la profundidad. No se observó un decrecimiento exponencial con el aumento en la profundidad hasta los 6 m, las raíces finas alcanzaron profundidades de 10 m y 14 m en el segundo y cuarto año de plantación.

Poco es conocido acerca del rol de las raíces profundas en el consumo de nutrientes en los bosques (Buxbaum, Nowak y White, Brassard, Chen y

Bergeron, citados por da Silva et al., 2011). La concentración de cationes intercambiables usualmente decrece marcadamente con la profundidad (Jackson et al., Krishnaswamy y Richter, citados por da Silva et al., 2011) y un decrecimiento en el consumo de nutrientes con la profundidad del suelo ha sido mostrado para bosques templados (Burton, Pregitzer y Hendricks, Benett, Andrew y Prescott, Göransson, Ingerslev y Wallander, citados por da Silva et al., 2011) y sistemas agroforestales tropicales (Lehmann y Muraoka, Lehmann, citados por da Silva et al., 2011). Sin embargo, una concentración mayor de nutrientes puede ser encontrada en profundidad en algunos casos específicos (Stone y Kalisz, Moroni, Smethurst y Holz, citados por da Silva et al., 2011), y el subsuelo puede contener temporalmente una proporción significativa de nutrientes disponibles, cuando bajos contenidos de humedad en la superficie limitan el consumo (Lehmann, citado por da Silva et al., 2011), o cuando la redistribución hidráulica y la recarga del agua del suelo ocurre a profundidad (McCulley et al., citados por da Silva et al., 2011). Las raíces profundas también actúan a modo de una red de seguridad, tomando los nutrientes lixiviados desde la superficie del suelo y transfiriéndolos desde la profundidad a capas superficiales del suelo (Allen et al., Jobbágy y Jackson, Mulia y Dupraz, citados por da Silva et al., 2011).

Ganar conocimiento en el proceso que maneja los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes en las plantaciones tropicales es esencial para coordinar regímenes de fertilización y requerimientos de los árboles, tomando en cuenta las dinámicas de las disponibilidades de los nutrientes en el suelo (Laclau et al., 2010). Grandes cantidades de fertilizantes han sido aplicadas en las últimas décadas en plantaciones intensamente manejadas (Herbert, Gonçalves et al., Smethurst et al., citados por Laclau et al., 2010) pero limitaciones estrictas de aplicación de fertilizantes se están volviendo esenciales tanto por razones económicas como ambientales (Laclau et al., 2010).

El incremento del porcentaje de raíces superficiales con la edad en *Eucalyptus spp.* fue consistente con los cambios en el ciclado de nutrientes en el ecosistema (Bouillet et al., 2002), dado que el incremento en la densidad de raíces en la superficie del suelo puede resultar por el incremento en la concentración de nutrientes en la solución en la parte superficial del suelo, debido a la descomposición de la hojarasca (Laclau et al., citados por Bouillet et al., 2002). El ciclo biológico se vuelve más y más activo con el tiempo, permitiendo a los árboles alimentarse principalmente de las capas superficiales en suelos pobres, mientras que, en las etapas juveniles, las capas profundas del suelo pueden ser proporcionalmente más exploradas por las raíces y suministrar los nutrientes requeridos por el cultivo.

Grove, citado por Bentancor (2017), indica que “en las primeras etapas de crecimiento de una plantación de *Eucalyptus spp.* (0 a 4 años), existe una

*gran concentración de nutrientes para la producción primaria, la redistribución de nutrientes dentro del árbol es casi inexistente, hay una gran proporción de nutrientes retenidos dentro del árbol, y el crecimiento es caracterizado por el incremento en la tasa de acumulación de nutrientes y limitado por la oferta de nutrientes desde el suelo*". Además, Grove et al. (1996) mencionan que el crecimiento del árbol en esta etapa es probablemente limitado por el suministro de nutrientes, y porque las raíces no han alcanzado la exploración completa del suelo.

De acuerdo a Santana et al. (2008) en los *Eucalyptus spp.* la mayor proporción de los nutrientes (63 a 69%) en la biomasa se acumulan hasta la edad de 4,5 años, considerándose un ciclo de 6,5 años, siendo el crecimiento en biomasa y el contenido de nutrientes en el suelo positivamente relacionados entre sí, pero siendo menores en las regiones con menor disponibilidad de agua.

Los regímenes de fertilización son diseñados para suministrar los requerimientos nutricionales a los árboles en plantaciones comerciales de *Eucalyptus spp.*, y la productividad es generalmente limitada por la disponibilidad de agua (di Toit et al., Stape et al., citados por Pinheiro et al., 2016). Se ha mostrado que para plantaciones de *Eucalyptus spp.* en Brasil, la típica práctica de fertilización no alcanza las tasas máximas de producción, contrario a la creencia de las empresas (Stape et al., citados por Laclau et al., 2013). Estudios recientes en *Eucalyptus spp.* han mostrado que no hay efecto de la fertilización en la tasa fotosintética en condiciones de saturación lumínica (Close et al., Turnbull et al., citados por Laclau et al., 2013). Además, en las plantaciones de *Eucalyptus spp.* de Sudáfrica se ha demostrado que la fertilización nitrogenada afecta la tasa inicial de establecimiento del área foliar en lugar de la eficiencia del uso de la luz (du Toit, citado por Laclau et al., 2013), y en Brasil solo aumentó el crecimiento durante los primeros 2 años después de la siembra y más nada en adelante (Laclau et al., citados por Laclau et al., 2013).

La habilidad propuesta por Laclau et al. (2001) de las raíces finas de *Eucalyptus spp.* de concentrarse debajo de áreas de infiltración preferencial tiene efectos en los nutrientes disponibles para los árboles. Según los autores, esta habilidad puede estar explicando la rápida utilización de nutrientes observada en la solución del suelo, lo cual ayudaría a reducir pérdidas de nutrientes causadas por el drenaje profundo. Esta distribución de raíces permite una alta producción de madera en un suelo pobre, por lo que estas plantaciones juegan un importante rol en las dinámicas de nutrientes en estos suelos.

Según Bouillet et al. (2002) las plantaciones de *Eucalyptus spp.* sustraen agua y nutrientes rápidamente, lo que ha sido demostrado al comparar

los cambios en las concentraciones de calcio entre las aplicaciones y la solución de suelo. El desarrollo de un sistema radicular profundo puede explicar que el fósforo no sea un factor limitante para el crecimiento de plantaciones de *Eucalyptus spp.* en la región de Pointe Noire (Safou-Matondo y Bouillet, citados por Bouillet et al., 2002) y la baja eficiencia en el uso de este nutriente (Laclau et al., citados por Bouillet et al., 2002). La concentración de este nutriente es baja en los sitios estudiados por Bouillet et al. (2002), pero constante hasta una profundidad de 6 m, siendo grande la cantidad de fósforo dado el considerable volumen de suelo que las raíces exploran. El desarrollo radicular profundo debe ser considerado en la dinámica de nutrientes, dado que algunos de los nutrientes tomados por los árboles desde las capas profundas del suelo pueden ser reciclados por mineralización en el suelo forestal (Bouillet et al., 2002).

En el estudio realizado por Christina et al. (2011), grandes cantidades de nutrientes fueron aplicadas en la superficie del suelo, y el desarrollo de raíces hasta los 9 m de profundidad a los 1,5 años de edad no puede ser explicada por faltantes de agua o fertilizante en la capa superficial del suelo. La absorción de cationes desde capas profundas del suelo en algunos ecosistemas forestales (McCulley et al., 2004) puede también estar involucrada en la ventaja competitiva dada por un rápido crecimiento vertical de raíces finas (Jackson et al., citados por Christina et al., 2011).

da Silva et al. (2011) estudiaron, para el Sur de Brasil, el acceso potencial de consumo de N, K y Ca por árboles de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, en función de la profundidad del suelo, textura y contenido de agua. Inyectaron marcadores de NO<sub>3</sub>-15N, Rb<sup>+</sup> y Sr<sup>2+</sup> simultáneamente, cercanos a diferentes árboles y a diferentes profundidades, alcanzando los 3 m, tanto en suelos arenosos como arcillosos, donde el contenido de agua fue monitoreado. El NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es más móvil en el suelo que el K<sup>+</sup> (y su análogo Rb<sup>+</sup>) y el Ca<sup>2+</sup> (y su análogo Sr<sup>2+</sup>, (Barber, citado por da Silva et al., 1995). Los autores encontraron que el potencial relativo de consumo en la superficie del suelo es significativamente superior para el NO<sub>3</sub>-15N que para el Rb<sup>+</sup> (K<sup>+</sup>) y el Sr<sup>2+</sup>(Ca<sup>2+</sup>). El decrecimiento en el consumo potencial relativo con la profundidad del suelo, ocurrió para los tres marcadores, pero fue mucho mayor para el NO<sub>3</sub> que para los análogos del K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>. Este comportamiento contrastante para los marcadores inyectados simultáneamente, en la misma locación, sugiere una especialización funcional de las raíces finas del *E. grandis* en relación a la profundidad del suelo. El marcado descenso en la densidad del largo de raíces con la profundidad del suelo es observado en rotaciones de *Eucalyptus spp.* (Bouillet et al., Maurice et al., citados por da Silva et al., 2011), pero las distribuciones en el potencial relativo de consumo indica que este decrecimiento radicular con la profundidad por sí solo, puede no estar reflejando de forma precisa la capacidad de consumo de ciertos nutrientes, y que la distribución y

consumo de nutrientes en distribución vertical es altamente dependiente de la dinámica de agua en el suelo (da Silva et al., 2011).

## 2.2 ACCIÓN DE LAS RAÍCES DE LOS ÁRBOLES EN EL CONTINUO SUELO-SAPROLITO-ROCA

Los árboles son poderosos actores geomorfológicos pedogénicos y ecológicos (Šamonil et al., Pawlik, Sullivan et al., Brantley et al., Hasenmueller et al., citados por Pawlik y Kasprzak 2018).

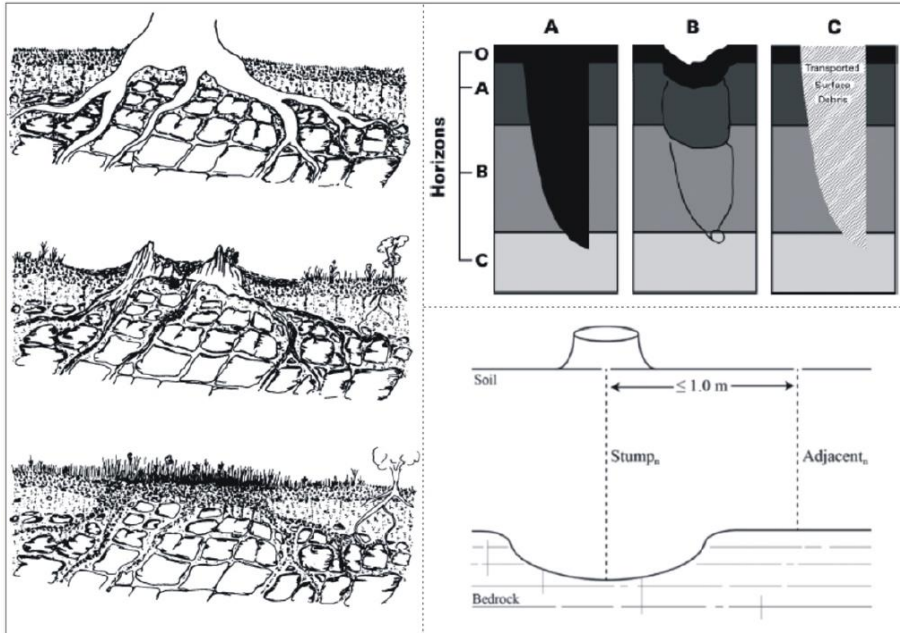
Las raíces de los árboles y su impacto en los procesos de la meteorización y producción de suelo han sido incorporadas en la hipótesis de las plantas devónicas, y las evidencias dejadas por las raíces de los árboles sirvieron como evidencia clave de reconocimiento de los suelos pasados en la geología, sedimentología y paleopedología (Pawlik et al., 2016).

Muchos efectos potenciales de los árboles y su sistema radicular han sido reconocidos, pero su monitoreo y documentación es todavía limitada, especialmente en el caso de las raíces (Gregory, citado por Pawlik y Kasprzak 2018). Estudios biogeomorfológicos y pedológicos en décadas recientes, han resaltado la importancia del enraizamiento de los árboles, el cual juega un rol primario en el desarrollo del suelo, perturbación del regolito y minado de las rocas. Otras importantes funciones de las raíces han sido reconocidas: desplazamiento del suelo por crecimiento de las raíces, relleno de las cavidades de los tocones y cavidades radicales, desarrollo de surcos por raíces, efectos directos e indirectos toman lugar en la rizosfera y la micorrizosfera (principalmente meteorización bioquímica de minerales, llevada a cabo por comunidades microbianas y hongos simbióticos) y cambios en la porosidad, permeabilidad e hidrología de suelos en la zona radicular (Pawlik et al., 2016).

Pawlik y Kasprzak (2018) argumentan que los árboles, por medio de la acción de sus raíces, pueden cambiar las características físicas y químicas del suelo y el regolito, y pueden tener una influencia repetida en la misma porción del substrato y de la roca madre, lo que subsecuentemente lleva a una profundización del suelo, como se muestra en la Figura 4, donde se muestra que las raíces por medio de su crecimiento y penetración del suelo hacen espacio para sí mismas, el cual es relleno por escombros transportados de la superficie después de que las raíces se han deteriorado completamente. Esto puede afectar a la próxima generación de árboles, dado que esos micro sitios son ricos en materia orgánica y materiales nuevos. También son sitios de menor densidad (Zinke, Limbrey, Wood y Johnson, Phillips y Marion, Phillips, Shouse y Phillips, citados por Pawlik y Kasprzak 2018).



Figura 4. Visiones conceptuales diferentes de varios aspectos del sistema radicular de los árboles en su impacto en el suelo, regolito y roca



La figura de la izquierda ilustra la formación de moldes de raíces, indicando también el rol de la estructura de la roca madre. En la parte superior derecha, las raíces operan dentro de los horizontes del suelo y no penetran en la roca. En la derecha inferior, el caso más extremo, demostrando que el sistema radicular es capaz de meteorizar la roca y por lo tanto extender hacia abajo el espesor del suelo.

Fuente: tomado de Pawlik y Kasprzak (2018).

Recientemente se han realizado varios estudios enfocados en los efectos biomecánicos del sistema radicular de los árboles, sin embargo, no se conoce exactamente como los árboles interactúan con la roca o el regolito, y cuál es la tasa de meteorización bioquímica o biofísica (Pawlik y Kasprzak, 2018). Basándose en estudios con ERT (tomógrafo de resistividad eléctrica) en bosques, Pawlik y Kasprzak (2018) concluyen que las raíces de los árboles modifican las propiedades del suelo durante varias décadas, posiblemente por más de un siglo.

Hasenmueller et al., (2017) estudiaron la interacción entre las raíces y las rocas que, por el proceso de meteorización, lleva a la generación de regolito. Los autores midieron una variedad de propiedades biológicas, físicas y químicas de todos los componentes actuantes. En este estudio observaron la esperada reducción de la densidad radicular en profundidad, sin embargo, las

raíces finas fueron encontradas en las fracturas de las rocas, incluso en las más profundas muestreadas (180 cm). Hasenmueller et al., (2017) estudiaron las fracturas en pelitas laminadas donde habían raíces, encontrando que en estas fracturas el relleno era similar, mineralógica y geoquímicamente, al horizonte más bajo de suelo con respecto a la composición de las arcillas, movilidad de los elementos, C orgánico disuelto extraíble (DOC) y especies nitrogenadas inorgánicas; mientras que C y N potencialmente mineralizable y los valores de C total y el N total para las fracturas fueron similares a los de la roca. Además, los autores sugieren que en general, el relleno con raíces en las fracturas de las lutitas laminadas a 180 cm de profundidad, son cualitativamente similares a lo encontrado en los horizontes superficiales, indicando tales similitudes que el relleno de las fracturas es probablemente resultado de procesos pedogenéticos más que por translocaciones. Las raíces en las fracturas, que fueron observadas por Hasenmueller et al. (2017) en todos los sitios, cualitativamente, tienden a ser más finas y aplanadas que las raíces localizadas en las capas superiores del suelo, donde al no estar confinadas mantienen una forma redondeada. Los autores estudiaron la morfología de las fracturas por medio de imágenes SEM (corroborando lo observado en láminas delgadas), observado que las raíces estaban presentes solamente en fracturas >50 µm de ancho. Además, las raíces estuvieron siempre asociadas a fracturas que contenían relleno, encontrándose raíces en todas las fracturas rellenas observadas con SEM (n=9). Hasenmueller et al. (2017) concluyen que las fracturas en las rocas son formadas in situ, que las raíces de los árboles mejoran la meteorización de las rocas por medio de las fracturas en las lutitas laminadas en clima templado y que las raíces toman ventaja de la mayor concentración de nutrientes disponible en las fracturas de estas rocas, infiriendo por los datos geoquímicos obtenidos que las raíces penetran la roca para acceder a nutrientes profundos que no son abundantes o disponibles en el suelo.

Pawlik y Kasprzak (2018) distinguen 4 campos de interés relacionados al rol de los árboles y sus raíces en aspectos geomorfológicos y pedogenéticos:

1. Meteorización biomecánica y bioquímica (Figura 5) a través de plantas vasculares de raíces profundas.

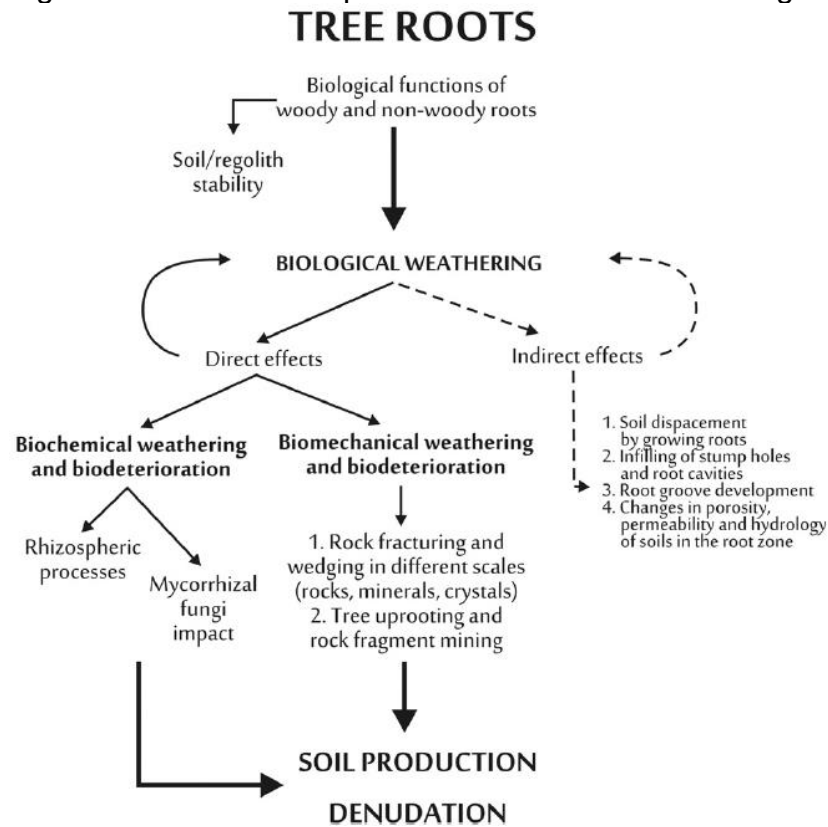
2. Bioprotección, la cual es actualmente considerada como una de las funciones más importantes de los árboles. Involucra la protección de suelo contra la erosión, lavado de la superficie y desgaste masivo, por lo que contribuyen a la estabilización de superficies de laderas. La bioprotección es importante en términos de peligros geológicos y en la geomorfología aplicada.

3. Complejidad espacial del suelo como resultado de retroalimentaciones entre el árbol y el suelo. Los árboles son capaces de modificar la estructura del suelo y el regolito por desplazamiento del material

por el crecimiento de sus raíces (Phillips y Marion, Pawlik, citados por Pawlik y Kasprzak 2018) así como otros aspectos físicos y químicos.

4. Circulación de materia y energía. Al ingresar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> atmosférico a su organismo y liberar exudados radiculares, enzimas y otros ácidos debajo del suelo, los árboles modifican la circulación de materia y energía.

Figura 5. Modelo conceptual de la meteorización biológica



Modelo de meteorización biológica causada por las raíces de los árboles y sus efectos directos e indirectos en la producción y denudación. Las flechas punteadas indican meteorización biológica *sensu lato*.

Fuente: tomado de Pawlik et al. (2016)

La meteorización biomecánica es considerada por Pawlik y Kasprzak (2018) como el factor primario de cambio en el suelo y el regolito, factor que incluye: 1) crecimiento radicular en la roca (en fisuras y aperturas de la roca) y el regolito (Phillips et al., citados por Pawlik y Kasprzak, 2018), 2) material del suelo empujado por el crecimiento radicular donde a veces montículos de raíces se forman (Hoffman y Anderson, citados por Pawlik y Kasprzak 2018). Otros impactos por parte de las raíces pueden mencionarse: 1) contenido de agua

dado el flujo por el tallo y la conductividad del agua por medio de los canales radiculares (Phillips et al., citados por Pawlik y Kasprzak, 2018) y 2) contenido de materia orgánica en el suelo proveniente de la muerte y renovación de las raíces finas, micorriza y microorganismos en la rizosfera.

Considerando otro actor de la rizosfera, Van Breemen et al. (2000) presentan resultados de la directa evidencia de que el micelio es capaz de penetrar, y muy probablemente, crear micro sitios que son inaccesibles para las raíces de las plantas y aislados de los fenómenos de la solución del suelo. Es virtualmente imposible rastrear las hifas que penetran las raíces, hasta una ectomicorriza, dadas las diferencias en escala entre las micorrizas (mm) y las hifas individuales que entran en los poros de los minerales ( $\mu\text{m}$ ), o al denso enredo de hifas, por lo que no puede ser excluida la participación de otro hongo. La actividad de micorrizas “devoradoras de rocas” debe ser considerada en el contexto de una posible asociación microbiana conducida por simbiosis de hongos micorríticos. Las hifas de las micorrizas pueden tomar nutrientes liberados por la meteorización y servir como conductos que suministran nutrientes a las plantas (Smith y Read, Finlay, citados por Van Breemen et al., 2000). Los poros en los minerales creados por las hifas proveen un acceso más directo de las plantas a los nutrientes minerales, comparado a la vía tradicional postulada por medio de la solución del suelo (Van Breemen et al., 2000).

Para el caso específico de los *Eucalyptus spp.*, Grove et al. (1996) plantean que un mecanismo importante que contribuye al consumo eficiente de nutrientes por estos árboles, es el de la simbiosis de las raíces finas con un amplio rango ectomicorrizas, las cuales pueden ocupar diferentes nichos, siendo particularmente importante para el aprovechamiento de nutrientes no móviles como el fósforo. Las micorrizas son muy efectivas en aumentar el crecimiento de los *Eucalyptus spp.* en suelos que son deficientes en fósforo y nitrógeno (Bougher et al., Grove et al., citados por Grove et al., 1996). Hay dos tipos principales de micorrizas: micorrizas vesiculares-arbusculares (AV), en las cuales la penetración del hongo en la raíz forma estructuras intracelulares que tienen poco efecto en la apariencia externa de las raíces finas (Harley y Smith, citados por Grove et al., 1996) y ectomicorrizas, en las cuales los tejidos del hongo forman una envoltura alrededor de la raíz fina, resultando en una raíz engrosada lateralmente con un hábito pinnado distintivo (Chilvers y Pryor, citados por Grove et al., 1996). Las ectomicorrizas son las dominantes, pero las AV se pueden desarrollar en plántulas siendo poco comunes en árboles viejos, por lo que las VA pueden estar ayudando en el establecimiento (Grove et al., 1996).

## 2.3 ENFOQUE COMPLETO DEL PERFIL DE SUELO A ROCA: SU DESCRIPCIÓN A CAMPO E IMPORTANCIA DEL SAPROLITO PARA LOS ÁRBOLES

### 2.3.1 Descripción y clasificación del saprolito

Pedron et al. (2009) estudiaron la definición morfológica de los contactos entre suelo, saprolito y roca en Neosoles derivados de rocas volcánicas de la Formación (Fm.) Serra Geral con vegetación gramínea en Rio Grande del Sur. Pedron et al. (2010) probaron y modificaron lo planteado por Pedron et al. (2009) para adaptar las propuestas para Neosoles desarrollados sobre areniscas derivadas de la Formación Caturrita en Rio Grande del Sur.

Existe una dificultad de interpretación del horizonte C y de la capa Cr (saprolito muy alterado) en la descripción de suelos a campo (Tandarich et al., Azevedo y Vidal-Torrado, citados por Pedron et al., 2009). En su estudio, Pedron et al. (2009) utilizan las siguientes denominaciones para designar al saprolito:

- el “horizonte C” es definido cuando predomina la estructura del suelo,
- la “capa Cr”, cuando se mantiene la estructura de la roca, pero que puede ser excavada con una pala (Santos et al., citados por Pedron et al., 2009);
- cuando el saprolito no puede ser excavado con una pala, pero difiere de la roca no meteorizada (R), se utilizan las denominaciones RCr y CrR (EMBRAPA, citado por Pedron et al., 2009).

El contacto lítico se considera cuando se encuentra a la roca moderadamente alterada, esto se debe a que el contacto lítico no es marcado por el grado de alteración mineralógica, sino por la resistencia mecánica a la excavación impuesta a las raíces. A partir del contacto lítico, las capas más profundas se simbolizan con la letra “R” mayúscula. Cuando el material rocoso en estas capas ya presenta señales de alteración meteórica, incluso con presencia de tierra fina y raíces en las fracturas, se utiliza la simbología “RCr” (EMBRAPA, citado por Pedron et al., 2009). Dado que las raíces a más de 70 cm fueron encontradas en todos los perfiles estudiados, y las mismas penetraban por las fracturas de las capas Cr, CrR y RCr, es importante indicar el grado de fracturación de los materiales.

El material saprolítico pasaría a ser considerado horizonte cuando no ofrece resistencia a la excavación manual con una pala recta y presenta predominio de estructura de suelo, con evidencias significativas de pedogénesis, siendo simbolizado con la letra “C” mayúscula. Mientras el material mantenga la estructura de la roca, sería designado como capa, indicada con la simbología “Cr” (EMBRAPA, Buol, Santos et al., citados por Pedron et al., 2005).

Pedron et al. (2009) encuentran la dificultad de enmarcar contactos entre el suelo y el saprolito, dado que encuentran frecuentes situaciones que no corresponden a las presentes en la segunda edición del SiBCS (sistema brasileiro de classificação de solos), por lo que proponen nuevos contactos entre capas. El contacto saprolítico ocurre en diferentes condiciones, dependiendo del estado de meteorización entre los horizontes A o C y el saprolito (capa Cr o CrR), donde la dureza del material permite la excavación manual con pala recta, pero no la penetración de raíces, a excepción de la penetración por las fracturas. El contacto hipersaprolítico ocurre entre los horizontes A o C y la capa Cr, donde el elevado grado de alteración del material saprolítico permite la excavación manual con pala recta y la libre penetración de raíces.

Los contactos saprolíticos fragmentarios e hipersaprolítico, son importantes, porque distinguen materiales en cuanto a la resistencia impuesta por el saprolito a la penetración de las raíces, además de separar materiales con densidades de fracturas distintas, las cuales restringen la penetración de raíces cuando la dureza del saprolito es restrictiva en el caso de contacto saprolítico. En perfiles más desarrollados, donde el saprolito se encuentra más alterado, los atributos referentes a los contactos saprolítico propuestos indican y proporcionan informaciones importantes para el cultivo de vegetales y potencialidades para construcciones.

Pedron et al. (2010) propusieron diferentes clases de meteorización que buscan facilitar la identificación de los contactos entre el suelo, saprolito y roca a campo (Cuadro 1). Estas clases de meteorización son basadas en la morfología de los horizontes y las capas del perfil y en su resistencia a la excavación determinada por la prueba de la pala recta (Soil Survey Staff, citado por Pedron et al., 2010). Sin embargo, la inherente subjetividad de la prueba de pala recta, impone una dificultad en su aplicación estandarizada a campo. En este caso, el uso de un penetrómetro de impacto es sugerido para la calibración de esta prueba (Machado, citado por Pedron et al., 2010). Pedron et al. (2010) indican que, para los materiales encontrados, derivados de areniscas finas a medias (cuarzosas, con considerable feldespato, de matriz arcillosa con comportamiento de acuífero), las raíces se encontraban en casi todos los horizontes/capas, ingresando por las fracturas. La reducción en profundidad de las raíces se debe también a la fisiología y morfología natural de la vegetación gramínea predominante en las áreas estudiadas. Si bien las raíces disminuyen en profundidad, Pedron et al. (2010) resaltan que estos pequeños volúmenes de raíces pueden jugar un rol fundamental en la obtención de agua para las plantas, hecho que puede potenciarse debido a que las areniscas de la Fm. Caturrita tiene comportamiento de acuífero (Soares et al., citados por Pedron et al., 2010).

Cuadro 1. Unificación de las clases de meteorización para basaltos y rolitas de la formación Serra Geral y areniscas de la Formación Caturrita

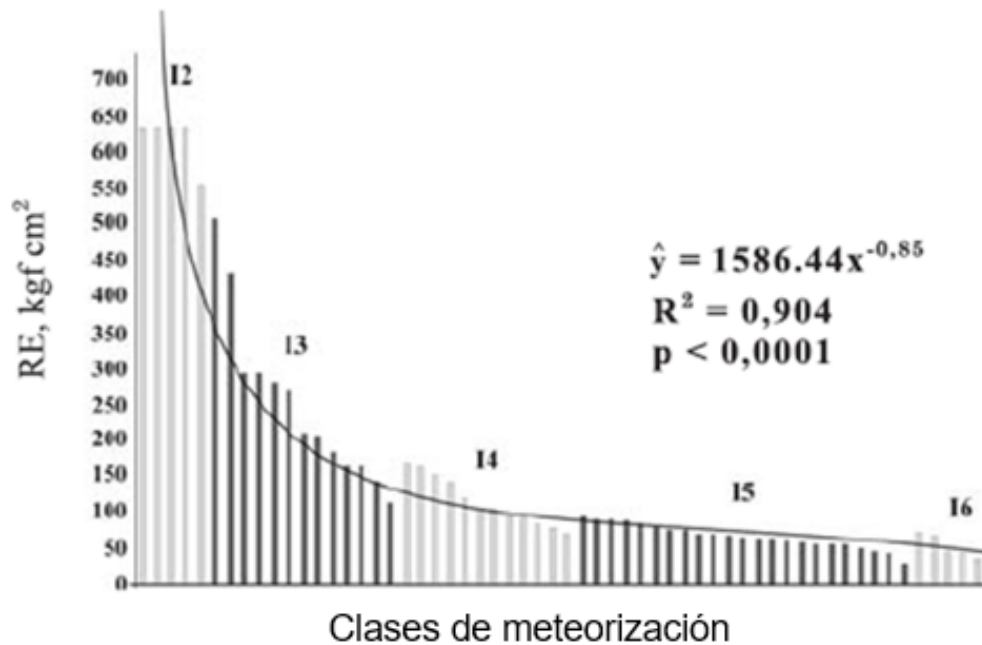
Clase	Palabra clave	Descripción	Capa u horizonte	Clase	Palabra clave	Descripción	Capa u horizonte	
11	Roca alterada (Contacto lítico)	Sonido metálico con golpes de martillo;	Capa R	13	Roca moderadamente alterada (contacto lítico)	El material mantiene la estructura de roca;	Capa RCr	
		Cuando existen fracturas presentan cruces angulares;				Generalmente puede ser excavado con pico con moderada dificultad, pero se inhabilita la excavación con pala recta.		
		El material no puede ser excavado manualmente;				Golpes con martillo pedológico y pico rompen bloques grandes y pequeños;		
		No hay penetración de raíces, excepto por las fracturas, que generalmente ocurren con distancias superiores a 10 cm.				Las raíces no penetran en el material, solamente en las fracturas;		
		<b>Material volcánico</b>				<b>Material volcánico</b>		
		Coloración metálica o férrica;				Presentan juntas angulares y distintas;		
		<b>Material sedimentario</b>				La coloración es clara, pudiendo pudiendo presentar el interior metálico semejante al color de la roca inalterada.		
		La coloración es generalmente clara, característico de las areniscas;				<b>Material sedimentario</b>		
		Presenta fracturas con juntas distintas y angulares;				La coloración es generalmente clara, tanto internamente como externamente;		
		La dificultad en la excavación manual inhabilita la misma, aunque puede ser parcialmente excavada con pico.				El aspecto metálico todavía persiste, pero, el material es más fracturado;		
12	Roca poco alterada (contacto lítico)	El material no es cortado con el pico, sino fragmentado en bloques.	Capa RCr	14	Saprolito alterado (Contacto saprolítico)	El material mantiene la estructura de roca;	Capa Cr	
		No hay penetración de raíces, excepto por las fracturas, que generalmente ocurren con distancias superiores a 10 cm.				El golpe con pico corta el material, que puede también ser excavado con la pala recta.		
		<b>Material volcánico</b>				Las raíces no penetran en el material, solamente en las fracturas;		
		Presenta sonido metálico con el golpe de martillo;				Presentan juntas angulares y distintas;		
		Coloración metálica o más clara;				La coloración es generalmente clara.		
		<b>Material sedimentario</b>				<b>Material volcánico</b>		
		La coloración es generalmente clara, tanto internamente como externamente;				No puede ser quebrado con las manos, pero sí con la pala de corte, martillo o pico, rompiendo en bloques grandes y pequeños;		
		Generalmente presenta fracturamiento, teniendo un aspecto metálico.				<b>Material sedimentario</b>		
		Puede ser quebrado con las manos en bloques medios a pequeños;				Puede ser quebrado con las manos en bloques medios a pequeños;		
		17				Saprolito completamente alterado (solo)		El material volcánico o el sedimentario se asemejan mucho a las características evaluadas
Puede ser quebrado con las manos sin dificultad, dividiéndose en fragmentos grandes y pequeños;	Puede ser quebrado con la pala recta sin dificultad, pero no permite la penetración de las raíces;							
Puede no ser fríasil y no es plástico;	Puede presentar canales biológicos y juntas angulares y subangulares;							
16	Saprolito severamente alterado (contacto saprolítico)	El material volcánico o el sedimentario se asemejan mucho a las características evaluadas	Capa Cr	16	Saprolito severamente alterado (contacto saprolítico)	El material mantiene la estructura de roca;	Capa Cr	
						Puede ser quebrado con la mano, pulverizándose o dividiéndose en fragmentos pequeños;		No ofrece resistencia a la penetración de raíces;
						Puede presentar canales biológicos y juntas angulares y subangulares;		Puede presentar canales biológicos y juntas angulares y subangulares;
15	Saprolito muy alterado (contacto saprolítico)	El material volcánico o el sedimentario se asemejan mucho a las características evaluadas	Capa Cr	15	Saprolito muy alterado (contacto saprolítico)	Generalmente presenta estructura metálica, dificultando la observación de fracturas	Capa Cr	
						El material se encuentra consolidado, con señales de inicio de procesos pedogenéticos y presencia de estructura de suelo, incluso en etapa incipiente.		El material volcánico o el sedimentario se asemejan mucho a las características evaluadas
						El material volcánico o el sedimentario se asemejan mucho a las características evaluadas		El material volcánico o el sedimentario se asemejan mucho a las características evaluadas

Fuente: adaptado de Pedron et al. (2010)

En la Figura 6 se presenta la relación entre las clases de meteorización y la resistencia de excavación (kgf cm<sup>-2</sup>) por el método de penetrómetro de impacto, para las capas saprolíticas de los perfiles evaluados. Existe una relación entre las variables consideradas (coeficiente de determinación de la ecuación de la curva R<sup>2</sup>=0,904 y una significancia < 0,0001). Si bien solo se

analizaron las capas saprolíticas, se sugiere que las capas sobrepuestas al saprolito con valores menores de 50 kgf cm<sup>-2</sup> pueden ser consideradas material inconsolidado con inicio de alteración pedogenética (clase 17).

Figura 6. Relación entre las clases de meteorización y la resistencia a la excavación por el método de penetrómetro de impacto para las capas saprolíticas de Neosoles Litolíticos y Neosoles Regolíticos derivados de areniscas de la Formación Caturrita



Fuente: tomado de Pedron et al. (2010).

Otra forma de caracterizar los estados de meteorización utilizada en Uruguay (Cuadro 2) es la propuesta por el MGAP. DGRN (2014), la cual se basa en Daerman.



Cuadro 2. Grados de meteorización según propiedades macroscópicas

Criterio	Código	Descripción
Suelo	V	Suelo formado in situ. La estructura y textura de la roca completamente destruida. El material es generalmente limoso o arcilloso y de colores homogéneos.
	V Me	
Roca completamente meteorizada	IV	Roca completamente meteorizada. Textura original parcialmente preservada. El material es arenoso y friable si se moja con agua.
	IV Me	
Roca altamente meteorizada	III	La roca se encuentra es un estado transicional para forma suelo. Materiales tanto de suelo como de roca. El material está completamente descolorido, la "fabrica" está completamente preservada. La estructura original parcialmente presente.
	III Sa	
Roca moderadamente meteorizada	II	El material rocoso muestra decoloración parcial. La estructura y textura completamente preservada. La discontinuidad es comúnmente llenada con material rico en hierro. Puede extraerse fragmentos con la mano.
	II Sa	
Roca ligeramente meteorizada	I Sa	Poca decoloración a lo largo de las discontinuidades y puede haber partes de material rocoso. El material es generalmente débil, los fragmentos no se pueden extraer con la mano.
Roca fresca	0	No hay signos visibles de material en descomposición. Alguna leve decoloración en las superficies mayores de discontinuidades.

Fuente: MGAP. DGRN (2014).

### 2.3.2 La roca meteorizada (saprolito) como sustrato para los árboles

Rose et al. (2003) evaluaron las fuentes de agua para *Pinus jeffreyi* y para *Arctostaphylos patula*, en el Sur de Sierra Nevada, California, Estados Unidos. En esta locación, los suelos solo promedian los 75 cm de espesor, pero sobreyacen a una base de granito meteorizado. Los investigadores encontraron que el uso predominante del agua, fue inicialmente de la superficie del suelo. Progresivamente, fuentes de agua más profundas, incluyendo la roca meteorizada a una profundidad de varios metros, fueron explotadas a medida que la temporada progresaba y el suelo suprayacente bajaba su humedad. El agua contenida dentro de las rocas fue esencial para mantener los requerimientos de transpiración durante la sequía de verano. Rose et al. (2003) mencionan que, estas dos especies de hojas perennes y tolerantes a la sequía, poseen un patrón de enraizamiento dimórfico, con raíces superficiales que contemplan la mayor masa (Hanes, Strong y la Roi, citados por Rose et al.,

2003), pero con algunas raíces que se extienden a varios metros en profundidad (Hellmers et al., Hanes, Stone y Kalisz, Hubbert et al., citados por Rose et al., 2003). Este estudio brinda más evidencias de que hay similitudes hidrológicas entre el suelo y la roca meteorizada. Estudios de balances hídricos que no consideren la capacidad de almacenar agua por parte de capas profundas de roca meteorizada, pueden estar sobreestimando la naturaleza xerica del sistema suelo/roca, en el cual plantas con raíces profundas pueden acceder al agua almacenada dentro de la roca y, por lo tanto, disminuir los efectos del estrés hídrico. Rose et al. (2003) finalizan con la reflexión de que existe la necesidad de redefinir el concepto de suelo, para poder incluir la zona de roca meteorizada que soporta crecimiento radicular, la cual subyace en muchas áreas forestales.

Witty et al. (2003) estudiaron capas de granitos meteorizados Sierra Nevada, California, Estados Unidos. Los autores indican que este medio tiene capacidades de agua disponible (0,12 cm agua/cm roca) que se aproximan a la de los suelos (0,2 cm agua/cm suelo), siendo esta capa para la zona de estudio, de varios metros más de espesor que el suelo. La capa de roca meteorizada todavía conserva la estructura de la roca y conserva minerales primarios no completamente alterados a arcilla (no se considera saprolito), y es penetrada por las raíces de *Pinus ponderosa* dentro de los 2 primeros años en muchos sitios. El acceso de las raíces es restringido a las fracturas, separadas a 50 cm promedio, y el agua se extrae de la matriz de roca a través del flujo insaturado hacia la mata de la raíz en las fracturas y por hifas micorríticas de hongos que penetran en la matriz de roca. En el estudio realizado por Witty et al. (2003) la capa meteorizada de roca suministra al menos el 70% del agua utilizada por los árboles durante la temporada de crecimiento.

La habilidad de promover la actividad biológica es un componente mayor de la calidad del suelo (Doran y Parkin, citados por Rosa et al., 2003).

La roca meteorizada contiene agua disponible para las plantas, hospeda raíces de las plantas, y puede jugar un rol crítico en mantener coníferas en ambientes de veranos secos (Arkley, Anderson et al., Zwieniecki y Newton, Hubbert et al., citados por Witty et al., 2003).

Se sugiere que, para ser realistas, los substratos de los bosques en ambientes de veranos secos deben ser considerados a una extensión mucho más profunda, y a la roca meteorizada, más que estar limitados al suelo o a un límite artificial de 2 m (Soil Survey Staff, citado por Witty et al., 2003). La roca meteorizada mejora la productividad del sitio y es esencial para la sobrevivencia de comunidades de bosques (Witty et al., 2003).

El saprolito es el material formado por una extensiva meteorización in situ de una roca madre existente, y que todavía retiene características de la roca madre (Bates y Jackson, citados por McKay et al., 2005). Además de las características de la roca madre, como las estructuras sedimentarias y las fracturas, el saprolito frecuentemente contiene características del suelo como porosidad alta en la matriz, arcillas traslocadas o iluviales, minerales arcillosos neoformados, óxidos de Fe/Mn y marcas de bioturbación (Dreier et al., Hatcher et al., Buol et al., Graham et al., Stolt y Baker, Richter y Markewitz, Driese et al., citados por McKay et al., 2005). En la práctica, materiales que contienen incluso un moderado grado de características de la roca madre es considerado como saprolito. Aunque el saprolito es ampliamente distribuido en climas húmedos, las características químicas y físicas derivadas de rocas sedimentarias no han sido extensamente estudiadas (Stolt y Baker, Driese et al., citados por McKay et al., 2005). Como consecuencia, la hidrología de este tipo de subsuelo es pobremente comprendida, haciendo que las predicciones de infiltración, retención de agua, escorrentía en superficie, recarga de acuíferos y transporte de contaminantes se inciertas (McKay et al., 2005). El flujo del agua subterránea en saprolitos de rocas sedimentarias, y en suelos derivados de este material, es fuertemente influenciado por la estratificación sedimentaria y las fracturas heredadas de la roca madre. Variaciones en la conductividad hidráulica no siempre se corresponde a cambios en la litología, sugiriendo que la conductividad hidráulica es resultado de una compleja interacción de muchos factores, incluyendo la roca madre y el grado de relleno de los macro poros. El relleno de los macro poros juega un rol importante en el control hidráulico y el flujo de agua subterránea para una variedad de diferentes tipos de rocas madre (McKay et al., 2005).

## 2.4 SUELOS FORESTALES DEL URUGUAY

Los árboles son cultivos que utilizan el ambiente donde son plantados por un periodo prolongado, en relación a otros usos de la tierra, pueden provocar un impacto más intenso o de mayor duración sobre el ambiente, lo que exige una planificación más cuidadosa en esta producción. La correcta selección del sitio donde se desarrolla la actividad forestal se vuelve más necesaria, particularmente con el objetivo de lograr una producción sostenible y ambientalmente correcta. La utilización inadecuada de los recursos naturales es comparativamente más grave que en otros rubros, dada la mayor ocupación en tiempo del espacio (Califra y Durán, 2010).

Según Califra y Durán (2010) la utilización de los suelos en Uruguay para la forestación se basa en dos conceptos, el de aptitud forestal (definición técnica) y el de prioridad forestal (definición política o administrativa).

El concepto de aptitud refiere a la productividad de un cultivo en determinado sitio según las condiciones de ese sitio, mientras que el concepto de prioridad forestal tiene más que ver con la disposición política y jurídica, donde se incorporan los criterios de aptitud forestal y otros, como ser la baja aptitud para otros usos de la tierra (Duran y García, 2007).

El primer antecedente significativo respecto a la evaluación de la aptitud forestal de los suelos, fue el formulado por la CIDE en 1967, siendo un aporte breve de recomendaciones. Consideraban tierras forestales a las dunas arenosas, áreas serranas de suelos muy profundos con perfil poco diferenciado y buen drenaje, tierras muy arenosas con horizonte A muy profundo y tierras bajas con drenaje muy pobre. Con excepciones respecto a cuestiones del monte indígena, las recomendaciones futuras no se alejan mucho de las de la CIDE, lo cual se puede apreciar en documentos cartográficos, dado que los suelos ahora considerados de prioridad forestal son virtualmente los que definió la CIDE (Durán y García, 2007).

Sganga, citado por Durán y García (2007), por medio de la Dirección de Suelos y Fertilizantes del MGAP, propuso una contribución importante en la definición de aptitud forestal de los suelos del país, en la cual se plantea que el crecimiento de un árbol es el resultado de la interacción del suelo, clima y factores bióticos, integrándose como “el sitio forestal”. La calidad del sitio se basa en el crecimiento de los árboles, su productividad resultante y que estos sitios tengan poca aptitud para otros usos. Además, se propone que al árbol cumpla funciones sobre el medio, como estabilización del paisaje, regulación del escurrimiento, aceleración de la edafogénesis, y facilitación de la penetración del agua en el suelo hacia estratos profundos. Durán y García (2007) indican que en esta etapa no se avanzó en la medición cuantitativa de los índices de calidad del sitio, pero si se manifestó su importancia, además de hacer énfasis en el suelo, pero no como en el único factor importante, influyendo también en la determinación del valor de un sitio otros como el relieve (altitud y exposición) y la geología (naturaleza física, litológica y mineralógica del sustrato).

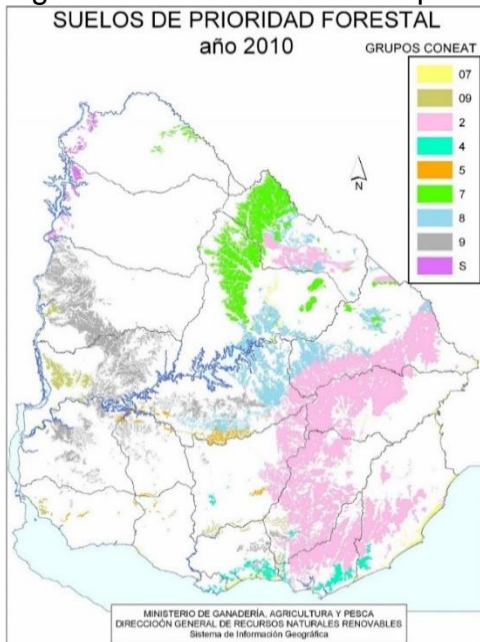
Según Durán y García (2007), Sganga señala que las especies forestales (coníferas y latifoliadas) se desarrollan naturalmente en suelos de textura generalmente gruesa, desaturados en bases, y, por lo tanto, de reacción acida, siendo entonces condiciones recomendables para instalar un monte. Además, para la definición de la calidad del sitio, el agua disponible es muy importante, en la cual influye tanto la capacidad de retención de agua del suelo y subsuelo como la facilidad para el enraizamiento que permita al árbol acceder al agua, aun en capas profundas. Según Durán y García (2007) estas propiedades se incluyeron en la definición de “aptitud forestal” de los suelos que se incluyó en la Ley Forestal, además de un “drenaje adecuado” para la especie

en cuestión. Sganga propone 5 clases, que van desde la clase 1 -muy apta- a la clase 5 -poco apta-. En dichas clases, las propiedades más aptas (para la productividad) se refieren a tipos de suelos adecuados, las propiedades menos aptas hacen referencia a pedregosidad, pendientes fuertes, exceso de agua, suelos delgados, salinidad o alcalinidad sódica o por presencia de carbonato de calcio, textura fina en todo el perfil u horizonte A de textura adecuada, pero de menos de 25 cm de espesor sobre un horizonte B arcilloso. Esta clasificación, por lo tanto, se enfoca centralmente en el tipo de suelo, dejando las otras características implícitas o no desarrolladas ni caracterizadas para la definición de la calidad de sitio forestal planteado por Sganga.

El Decreto 452/988 establece que son suelos de aptitud forestal aquellos que por sus condiciones permiten un buen crecimiento de los bosques, con buena capacidad de enraizamiento, adecuado drenaje y baja fertilidad natural. La normativa vigente también establece los grupos de suelos CO.N.E.A.T. de prioridad forestal, conforme con la definición de terrenos forestales (inadecuados para otra explotación permanente y provechosa o de aptitud forestal), poseen aptitud agrícola y ganadera baja o media a lo sumo, lo que indica un índice de productividad menor de 100 (Califra y Durán, 2010).

La distribución de los suelos de prioridad forestal con asociación a los grupos de suelos CO.N.E.A.T., cartografía más corrientemente utilizada hoy día, se muestra en la Figura 7 y la superficie que ocupa cada uno en el Cuadro 3.

Figura 7. Carta de suelos de prioridad forestal 2010



Fuente: tomado de MGAP. DGRN (2010).

Cuadro 3. Superficie de prioridad forestal por zona CO.N.E.A.T.

ZONA	Superficie (ha)	%
S09	45.625	1
5	56.198	1
4	95.852	2
07	122.766	3
09	185.526	4
7	494.314	12
8	505.211	12
9	660.507	15
2	2.122.961	49
<b>Total</b>	<b>4.288.961</b>	<b>100</b>

Fuente: tomado de MGAP. OPYPA (2016).

Todos los suelos de prioridad forestal tienen similares incentivos para ser utilizados con forestación, pero hay diferencias notorias de uso forestal entre zonas. Estas diferencias son por diversos factores, siendo el potencial productivo de los suelos uno de relevancia particular (MGAP. OPYPA, 2016).

Cualquiera sea la clasificación previa considerada, el criterio de evaluación de suelo forestal fue siempre la interpretación de las propiedades morfológicas, físicas y químicas, y las características asociadas como

pendiente, rocosidad y pedregosidad (Durán, citado por Durán y García 2007). Sin embargo, Durán y García (2007) mencionan que no se había realizado investigación que permita desarrollar criterios más precisos, basados en la medición del crecimiento o productividad forestal bajo condiciones controladas, y relacionar el crecimiento con propiedades mensurables en los suelos y su entorno geomorfológico y climático.

Los suelos de prioridad forestal más comunes se clasifican a nivel de gran grupo como Luvisoles, Acrisoles, Brunosoles y Argisoles, perteneciendo estos dos últimos a las clases Dística y Subéfrica mayoritariamente. Los Inceptisoles son otros suelos de menor extensión, de la región sedimentaria Noreste y en las sierras cristalinas (Califra y Durán, 2010).

La expresión de la producción forestal en determinado sitio se realiza habitualmente como índice de sitio, o como alguna otra medida del volumen de madera producida anualmente. El índice de sitio es, por lo tanto, la altura promedio de árboles dominantes y codominantes de una especie, a una edad determinada. La medición del índice de sitio para un suelo determinado se extrapola en otros suelos similares para los cuales no se dispone de datos (Durán y García, 2007).

Durán y García (2007) citan la experiencia de Herbert en el 2005, sobre estudios específicos de índices de sitio para la zona litoral Oeste del país. El propósito de estos estudios es el de obtener el conocimiento básico para guiar la toma de decisiones en materia de producción forestal, utilizando los suelos de mejor aptitud, con las especies y variedades más adaptadas, para la producción deseada, con el nivel tecnológico más adecuado, dentro del marco legal en cuanto a las definiciones de aptitud y prioridad forestal de los suelos. Herbert, citado por Durán y García (2007) desarrolló un índice de sitio para la evaluación de la calidad de sitio en la zona litoral Oeste, tomando en consideración todos los factores ambientales de importancia para definir la aptitud forestal de la tierra, siendo las exigencias de los árboles en materia de sitio:

- Temperatura: actividad fisiológica, fotosíntesis; daños por heladas
- Nutrición: desarrollo vegetal (generalmente no es crítica en Uruguay)
- Agua: evaporación; desarrollo del área foliar; demanda vs. suministro
- Estabilidad mecánica: profundidad de arraigamiento, anclaje

Las exigencias o requisitos importantes de los árboles en Uruguay se relacionan con la disponibilidad de agua y adecuado arraigamiento (Herbert, citado por Durán y García 2007). Según Durán y García (2007) los principales parámetros que inciden en la calidad del sitio son los que afectan más a dichos requisitos:

- Profundidad efectiva de arraigamiento
- Textura del suelo: capacidad de retención de agua del material
- Naturaleza de la saprolita (horizonte C del suelo): capacidad de retención de agua del suelo; friabilidad o consistencia (volumen de arraigamiento)
- Clase de drenaje natural:  $O_2$  para un enraizamiento intenso y rápido
- Contenido de carbono orgánico: N, P, consistencia, estabilidad de los agregados.

La litología del sustrato es importante para evaluar la calidad de sitio, siendo las propiedades que influyen decisivamente sobre el potencial de enraizamiento -que determina el anclaje y la exploración por el agua- el espesor de los sedimentos, la profundidad de meteorización, el drenaje interno, la dureza, cementación y el tipo de arcilla (Durán y García, 2007). Teniendo en cuenta lo anterior, Herbert, citado por Durán y García (2007), considerando la posibilidad mayor o menor de penetrabilidad de las raíces, evaluó la calidad de las litologías de su estudio, clasificándolas en tres clases (buena, moderada y pobre), siendo la “buena” caracterizada como profunda, blanda, grano fino, porosa, y la “pobre” como superficial, dura, grosera, masiva.

Según Durán y García (2007), los parámetros del suelo más relevantes para Herbert a efectos de definir índices de calidad de sitio son:

- Profundidad y textura del suelo: capacidad de retención de agua
- Naturaleza de la saprolita (horizonte C del suelo): friabilidad (volumen de arraigamiento); estructura (dureza, penetrabilidad); drenaje natural; profundidad (acceso al agua almacenada en horizontes profundos).

Los resultados de Herbert indican que los mayores crecimientos se obtienen en los suelos profundos, sin horizontes limitantes para el desarrollo de las raíces, horizonte C meteorizado y fácilmente penetrables por las raíces para obtener agua disponible en los estratos profundos. En el extremo contrario, los peores crecimientos se obtienen en los suelos con contacto lítico a escasa profundidad y/o con pedregosidad o rocosidad asociadas que limitan severamente la implantación y el crecimiento de los árboles (Herbert, citado por Durán y García 2007).

El subsuelo posee una influencia decisiva sobre la penetración de las raíces en búsqueda de agua, pero la condición física del horizonte B determina la primera barrera, donde si el horizonte B es argilúvico de textura fina y estructura gruesa y compacta, puede presentar una penetrabilidad muy restringida y el horizonte C situado por debajo no será fácilmente accesible a las raíces (Durán y García, 2007).



La precipitación también influye de manera decisiva, por lo que cuando el suelo pose una buena profundidad efectiva de arraigamiento se logra mayor almacenamiento de agua en la zona explorable por las raíces, lo que contribuye a compensar deficiencias hídricas durante los periodos secos (Herbert, citado por Durán y García 2007). Por lo tanto, las propiedades del horizonte B y del horizonte C juegan un rol clave en la elección de un sitio de buena aptitud, dado que condicionan en gran medida la facilidad de la penetración de las raíces y del agua que agua de lluvia y su almacenamiento (Durán y García, 2007).

#### 2.4.1 Políticas ambientales referidas a las plantaciones forestales

Como principio prioritario previsto por la Ley No. 17.283, la política ambiental nacional debe basarse en la prevención de los efectos perjudiciales de las actividades sobre el ambiente (ley general de protección del ambiente). La evaluación de impacto ambiental cumple un importante rol en ese sentido, pero su adecuación, junto con la creación de nuevos instrumentos de gestión ambiental, son elementos fundamentales para la articulación de la política ambiental y de las políticas de desarrollo productivo y social, tendientes a propiciar un modelo de desarrollo sostenible. Considerando lo anteriormente mencionado, el decreto No. 349/005 establece en su artículo 2 que se requerirá autorización ambiental previa (AAP) a las nuevas plantaciones forestales de más de 100 hectáreas en un establecimiento o unidad productiva. En el artículo 4 del mismo decreto se establece que se debe presentar “la localización y descripción del área de ejecución e influencia del proyecto, incluyendo la localización del proyecto en la cartografía oficial del servicio geográfico militar; la descripción del proyecto y del entorno, conteniendo todos los elementos necesarios para su correcta consideración; el detalle de los posibles impactos ambientales que pudieran producirse, indicando para los impactos negativos o nocivos, las medidas de prevención, mitigación o corrección previstas”. Además, según el artículo 5, se establece que “todo proyecto deberá ser clasificado en:

Categoría "A": incluye aquellos proyectos de actividades, construcciones u obras, cuya ejecución sólo presentaría impactos ambientales negativos no significativos, dentro de lo tolerado y previsto por las normas vigentes. Categoría "B": incluye aquellos proyectos de actividades, construcciones u obras, cuya ejecución pueda tener impactos ambientales significativos moderados, cuyos efectos negativos pueden ser eliminados o minimizados mediante la adopción de medidas bien conocidas y fácilmente aplicables. En estos casos, deberá realizarse un estudio de impacto ambiental sectorial. Categoría "C": incluye aquellos proyectos de actividades, construcciones u obras, cuya ejecución pueda producir impactos ambientales negativos significativos, se encuentren o no previstas medidas de prevención o mitigación.

Dichos proyectos requerirán un estudio de impacto ambiental completo. El artículo 11 establece que *“el estudio de impacto ambiental debe abarcar el proyecto y su posible área de influencia, incluyendo un encuadre general macroambiental: realizándose una comparación objetiva entre las condiciones anteriores y posteriores a la ejecución del proyecto, en sus etapas de construcción, operación y abandono”*. A su vez el artículo 12 indica que *“el resultado del estudio de impacto ambiental debe contener como mínimo: Parte I (características del ambiente receptor): en la que se describirán las principales características del entorno, se evaluarán las afectaciones ya existentes y se identificarán las áreas sensibles o de riesgo; todo ello en tres aspectos:*

- a) *Medio físico: agua, aire, suelo, paisaje, etc.*
- b) *Medio biótico: fauna, flora, biota acuática, etc.*
- c) *Medio antrópico: población, salud, actividades, usos del suelo, sitios de interés histórico y cultural, etc.*

*Parte II (Identificación y evaluación de impactos): en la que se identificarán y evaluarán los impactos ambientales tanto negativos como positivos, debiéndose considerar los siguientes aspectos:*

- a) *Previsión de impactos directos e indirectos, simples y acumulativos; así como la evaluación de los riesgos derivados de la situación ambiental resultante de la ejecución del proyecto.*
- b) *Predicción de la evolución de los impactos ambientales negativos, comparando la situación del ambiente con y sin la ejecución del proyecto.*
- c) *Cuantificación de los impactos ambientales identificados, tanto geográfica como temporalmente.*
- d) *Comparación de los resultados con la situación actual y con los estándares admitidos.*

*Parte III (determinación de las medidas de mitigación): en la que se identificarán y desarrollarán las medidas de mitigación a ser adoptadas y se presentará el cálculo de impacto ambiental residual, en caso que las medidas se adoptasen. Se deberán considerar los siguientes aspectos:*

- a) *las medidas de mitigación que se deberán aplicar para disminuir los impactos ambientales identificados;*
- b) *los planes de prevención de riesgos y de contingencias;*
- c) *las medidas compensatorias o restauradoras que será necesario adoptar;*
- d) *los planes de gestión ambiental del proyecto; y*
- e) *los programas de abandono que será necesario adoptar.”*

Según el reglamento de evaluación de impacto ambiental y autorizaciones ambientales (decreto No. 349/005) el titular de cada proyecto forestal debe implementar un plan de gestión ambiental, así como un plan de

monitoreo sobre los factores ambientales relevantes dentro del área de influencia del referido proyecto. La resolución ministerial No. 1355/2016 se aprueba la guía “pautas para la gestión forestal”, la cual establece el seguimiento y monitoreo ambiental de los proyectos forestales deberá ser planificado y ejecutado a través de un plan de gestión ambiental forestal (PGAF), “que comprenda todas las plantaciones de un mismo titular sujetas a AAP, localizadas en una cuenca hidrográfica”

La guía “pautas para la gestión ambiental forestal” (MVOTMA, 2016) tiene como objetivo brindar las pautas para la adecuada gestión ambiental y definir los requisitos mínimos para efectuar el seguimiento ambiental de las plantaciones forestales sujetas a autorización ambiental previa (AAP). Asimismo, propone que el programa de seguimiento y monitoreo ambiental sea planificado y ejecutado a través de un PGAF, que comprenda a todas las plantaciones de un mismo titular sujetas a AAP, localizadas en una única cuenca hidrográfica. De esta forma se busca relevar el conjunto de variables que permitan monitorear las eventuales modificaciones ambientales derivadas del efecto acumulativo de las plantaciones forestales, optimizando los esfuerzos del monitoreo ambiental. *“El PGAD integrado por unidad de cuenca, fue diseñado de forma que pueda ser aplicado a los proyectos forestales sujetos a AAP, cuya área destinada a la actividad forestal por un mismo titular, en una cuenca de nivel 2, sea superior a 5.000 hectáreas”.* En la guía pautas para la gestión ambiental forestal *“se presentan las medidas para la gestión de aquellos aspectos ambientales relevantes de la actividad forestal, que interactúen con el medio físico, biótico y antrópico, como el suelo, el agua, el aire, la biodiversidad, los valores culturales, entre otros; de forma de prevenir la generación de impactos ambientales negativos”.* En cuanto al suelo se busca *“prevenir la contaminación y la erosión, y minimizar la compactación del suelo en todas las etapas del proyecto, desde las actividades preparatorias hasta la etapa de abandono del mismo”* y se deberá considerar:

- a) Preparación del área a plantar: aplicación localizada y que respete la normativa nacional en actividades de control de malezas e insectos y no realizar quemas.
- b) Laboreo: se deberá realizar cuando el suelo este seco o friable, priorizando el laboreo en la fila y perpendicular a la pendiente de manera de seguir el trazado de curvas de nivel según la topografía y dejando entre filas empastadas.
- c) Plantación: la fertilización se deberá realizar acorde a los resultados de los análisis de suelo obtenidos, previniendo la generación de excesos de nutrientes en el sistema y minimizar su arrastre a hacia cuerpos de agua.
- d) Cosecha: minimización de compactación del suelo. Planificación de caminería, zonas de acopio para minimizar el trazado de caminos.
- e) Abandono: finalizados los ciclos productivos, se deberá prever la gestión de

los tocones para que los suelos puedan tener otros usos. De ser necesario se deberán adoptar otras medidas adicionales para restablecer la aptitud original del suelo del uso forestal.

El monitoreo de suelos, con el fin de realizar el seguimiento ambiental de la calidad del suelo, se deberá implementar en las propiedades físicas y químicas del mismo. “*Se recomienda monitorear los grupos de suelos más representativos de la unidad de cuenca ocupados por la forestación y aquellos grupos con Índice CO.N.E.A.T. más altos; así como realizar el seguimiento de las zonas con signos de erosión*”. Los parámetros recomendados para monitorear son: pH, carbono orgánico, materia orgánica, nitrato, fósforo-Bray, potasio, calcio, magnesio, sodio y aluminio intercambiable. En cuanto la biodiversidad, para prevenir la alteración de los ecosistemas naturales, en la etapa de planificación y diseño de ella se deberán considerar medidas para la conservación teniendo en cuenta el valor natural del sitio de implantación.

#### 2.4.2 Información relevante en investigación nacional sobre plantaciones de *Eucalyptus* y suelos

Zamalvide y Ferrando (2010a) resumen que los suelos del Uruguay declarados de prioridad forestal se encuentran entre los de menor fertilidad natural, marcada por un bajo nivel de bases de intercambio, bajo pH, frecuente presencia de Al intercambiable, mineralogías asociadas a alta meteorización y formas “frágiles” de su materia orgánica. Cuando estos suelos se comparan con los de otros países, las diferencias son notorias. Un primer elemento es que los suelos en el Uruguay se desarrollan sobre vegetación natural de praderas, situación poco frecuente en otras zonas forestales, y que en términos generales están asociados a una mayor fertilidad natural. Si se comparan con los suelos forestales de Brasil, los suelos de Uruguay, si bien son de los de menor fertilidad nacional, son notoriamente más fértiles, con niveles de bases intercambiables del orden de 10 veces mayores y la saturación en bases del orden de 5 veces mayor. Por lo tanto, en términos generales, en Uruguay se espera un número de nutrientes limitantes menor, y cuando esto suceda, se observará una respuesta a fertilizantes en dosis menores.

Hernández (2010) indica que los suelos destinados para la producción forestal en Uruguay presentan una gran aptitud para el desarrollo de especies como *Eucalyptus spp.* y *Pinus spp.*. Estos suelos son considerados marginales para la producción agrícola, debido principalmente a su baja fertilidad, rocosidad o pedregosidad asociada. Químicamente, se tratan de suelos ácidos a muy ácidos, con bajos niveles de bases, texturas medias a livianas y bajos contenidos de materia orgánica. Estos suelos por lo tanto presentan una baja disponibilidad de nutrientes, que se contrapone con una relativamente alta

demanda por parte de las especies, lo cual puede estar generando cambios en las propiedades químicas del suelo. Hernández (2010) concluye que se ha constatado un proceso de acidificación de los suelos bajo plantaciones forestales (*Eucalyptus spp.* y *Pinus spp.*), dada la reducción en el pH y aumento de la acidez intercambiable del suelo. Este proceso está asociado al cambio en el uso del suelo, pero no se descarta la contribución realizada por el laboreo del suelo. La acidificación se encuentra asociada a una disminución en el contenido de bases del suelo, principalmente Ca y Mg. Dicho efecto ha sido constatado particularmente en especies del género *Eucalyptus spp.* Las bases de intercambio se estratifican, con una mayor acumulación de ellas en los primeros estratos del suelo, principalmente Ca y Mg. Dicho efecto se debe al reciclaje de las bases por la descomposición del mantillo. Se aprecian cambios de tendencia incierta en los patrones de distribución de materia orgánica del suelo en profundidad. La constatación de cambios en las propiedades químicas del suelo por las plantaciones forestales de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*, conduce a la necesidad de realizar un plan de monitoreo de los suelos, para cuantificar la intensidad de dichos cambios y realizar las medidas correctivas necesarias para mantener la productividad del suelo y cumplir con las normas de certificación de los productos obtenidos (Hernández, 2010).

Según Ferrando y Zamalvide (2010) en Uruguay los *Eucalyptus spp.* han presentado un buen crecimiento y adaptación a las condiciones edafoclimáticas del país, destacando situaciones particulares donde se han observado síntomas de deficiencias de boro, situaciones que se dan especialmente en suelos desarrollados sobre basamento cristalino, areniscas cretácicas y areniscas de Tacuarembó.

Perdomo y Crucci (2010) afirman que, en su estudio en los sitios identificados como deficientes en nitrógeno, luego de una fertilización nitrogenada las deficiencias desaparecen mayormente, observándose además que los rodales de *Eucalyptus* se encontraban más balanceados. En los rodales destinados a producción de madera o pulpa, Perdomo y Crucci (2010) no observaron respuesta al agregado de N cuando se analizó cada sitio en forma individual o agrupados, a excepción de un sitio, en el cual la fertilización tuvo un efecto depresivo de los rendimientos.

Zamalvide y Ferrando (2010b) en sus conclusiones generales preliminares, en cuanto a la respuesta de fertilización fosfatada en *Eucalyptus*, señalan que, para sus sitios estudiados, existe una alta probabilidad de obtenerse una respuesta al agregado de P en la instalación de plantaciones, incrementándose entre el 10% al 20% los máximos en altura en los primeros años. Además, indican que a los 18 meses los análisis foliares no suelen mostrar deficiencias claras de P ni diferencias entre estados nutricionales entre

tratamientos (con y sin fertilización), lo cual indicaría que en esos estadios el aporte de P del suelo cubriría los requerimientos de las plantas.

Bentancor et al. (2017) reafirman que, aunque la forestación comercial en Uruguay es llevada a cabo en los suelos de menor fertilidad natural, en comparación con el promedio del país, es importante resaltar que estos suelos tienen una fertilidad más alta que los suelos en otras partes del mundo donde se plantan *Eucalyptus*. Los autores ejemplifica esta situación, comparando los valores más bajos encontrados de Ca, Mg y K intercambiables encontrados en su estudio, con el estudio realizado por Santana en suelos de Brasil, donde se observan valores de Ca, Mg y K intercambiables 24, 9 y 5 veces menores. Además, si bien en otros países se ha visto el efecto de la relación positiva entre la producción de biomasa y el contenido de nutrientes en el suelo, estos resultados pueden estar mostrando que, para esas condiciones, como por ejemplo las de Brasil, donde la fertilidad es muy baja, hay una correspondencia entre el contenido de nutrientes en el suelo y la producción. Pero, Bentancor et al. (2017) hipotetizan que los suelos utilizados en Uruguay para forestar (si bien son los de menor fertilidad promedio nacional) tienen la disponibilidad nutricional suficiente para expresar el máximo potencial de la especie; aunque esto no solo depende de los nutrientes, sino también de otros factores muy importantes como son el agua, la luz, la temperatura y el material genético, entre otros. A su vez, Bentancor et al. (2017) señalan que, según Ericsson, esta situación también se puede explicar dado que normalmente en los árboles, grandes fracciones de los nutrientes requeridos para el crecimiento de nuevos tejidos se pueden cumplir por el ciclado interno de nutrientes, especialmente cuando el rodal se aproxima al cierre de copas. Estos autores también proponen que, los árboles se pueden encontrar en la segunda etapa de crecimiento propuesta por Attiwill y Adams. En dicha etapa, los árboles a los 4 años de edad, entre otras cosas, poseen una acumulación decreciente de nutrientes y el ciclado de nutrientes se desarrolla por completo. Los autores remarcan que por este motivo puede ser que, aunque la situación nutricional de los suelos estudiados por ellos fueron diferentes, no hubo diferencias estadísticas significativas en el total de la biomasa en diferentes zonas. Además, Bentancor et al. (2017) señalan que los valores de concentraciones de nutrientes a la edad de 4 años encontrados por ellos, son proporcionalmente distribuidos en los componentes del árbol de manera similar a lo encontrado por Hernández et al. para edades de 9 años. Según Bentancor et al. (2017) sus resultados muestran que el stock de Ca, Mg y K en el suelo no tienen efecto en la concentración o lo absorbido por los árboles, pero es claro que se espera que, a más alta producción de biomasa, más cantidades de nutrientes absorbidos.

Por otra parte, Ualde (2015) estudio la extracción de nutrientes por plantaciones de *Eucalyptus globulus* con 5, 7, 9 y 12 años de edad, en el departamento de Rocha, sobre suelos de los grupos CO.N.E.A.T. 2.11a y 2.12 (Inceptisoles melánicos, Acrisoles ócricos, Luvisoles ócricos). El autor resume que la cantidad de nutrientes en la biomasa aérea, para todas las fracciones del árbol, fue mayor a medida que aumentó la edad del rodal, y que la tasa de acumulación de nutrientes en biomasa aérea fue menor en el rodal de 5 años, y a partir de los 7 años estas se mantienen de forma similar hasta los 12 años, excepto para el fósforo, el cual registra aumento hasta los 9 años de edad. Ualde (2015) concluye que esta tasa de suministro de nutrientes relativamente constante a lo largo de la vida de los árboles estaría indicando que no existen limitantes por parte de los suelos para el suministro de nutrientes. Además, el autor resalta la relación entre los contenidos de Ca, K y Mg en los horizontes A, con las concentraciones de esos mismos nutrientes en la fracción madera y hoja de los árboles, lo que significa, según el autor, que, a mayor contenido de nutrientes en el suelo, habrá mayor concentración de cationes en las fracciones, que no se traduce en una mayor producción de la fracción biomasa (lo que denomina como “consumo de lujo”).

En el estudio realizado por Pérez Bidegain et al. (2010) indican que el contenido de agua en el suelo bajo cultivos de *Eucalyptus* fue menor que bajo a campo natural, y que el suelo retiene menos agua a capacidad de campo, tanto para la profundidad de 5 cm como para el horizonte Bt. Esta observación de menor retención de agua en los primeros 5 cm de suelo bajo *Eucalyptus* ya había sido observada (Bidegain et al., citados por Pérez Bidegain et al., 2010). Los autores concluyen que el cambio de uso del suelo de campo natural a forestación, el tipo de laboreo empleado, así como el suelo en donde se realiza, afecta la dinámica del agua.

Pérez Bidegain et al. (2010) indican que según la bibliografía nacional (García Préchac et al., Pérez Bidegain et al., Resquin et al.) e internacional (Schönau et al., Norris y Stuart, Madeira et al.) sobre la intensidad de laboreo para plantaciones forestales presenta conclusiones contradictorias en cuanto a sus efectos sobre la producción de madera. Los autores estudiaron el efecto de intensidades de laboreo para la implantación de *Eucalyptus grandis* sobre un Acrisol ócrico ubicado en el departamento de Rivera, donde los usos anteriores del suelo eran de campo natural y chacra. Los autores concluyen que la calidad del sitio tuvo un impacto significativo en los parámetros de crecimiento (altura y DAP) del monte a los 8 años de su instalación, sin embargo, la intensidad de laboreo no los afectó.

## 2.5 GEOLOGÍA

### 2.5.1 Cuenca Norte

La Cuenca Norte representa en el territorio uruguayo, un sector del ambiente de sedimentación mayor que es la Cuenca Paraná (Figura 8).

Figura 8. Mapa de la Cuenca Paraná en sentido amplio

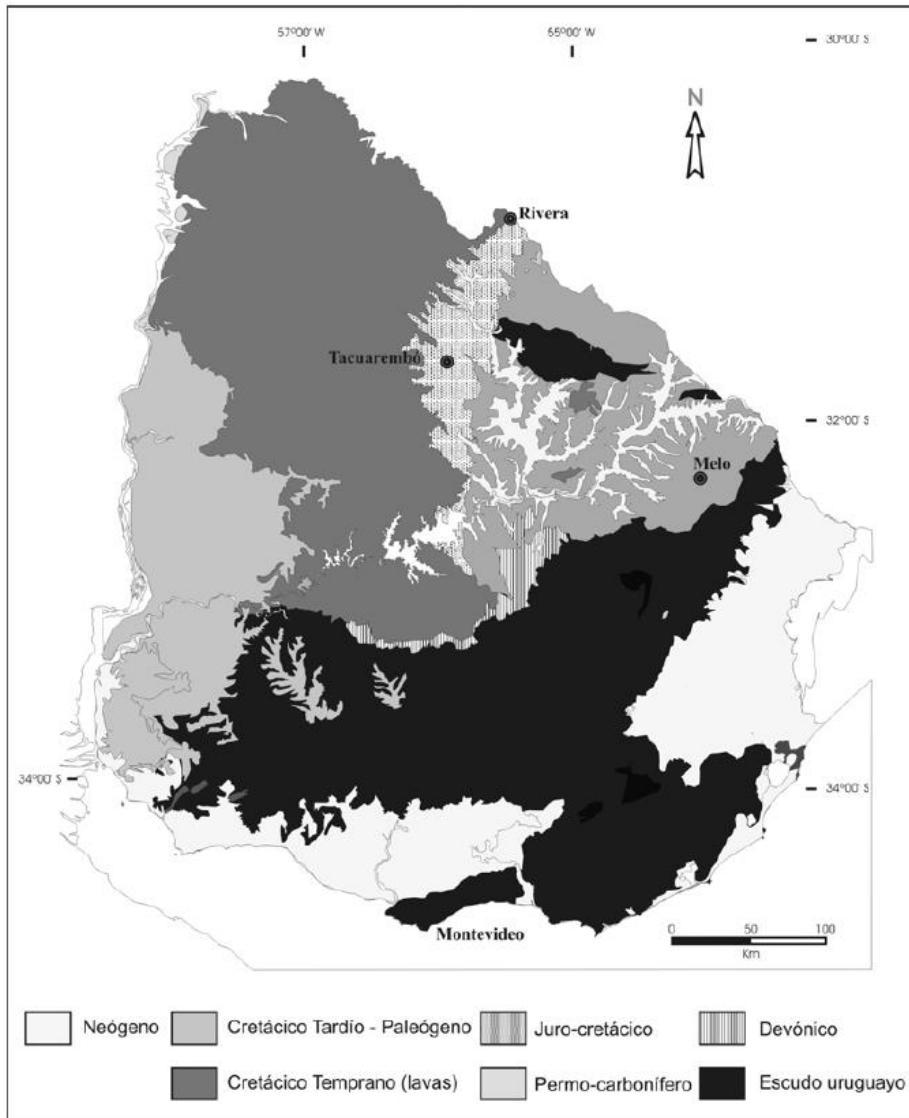


Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

Según de Santana et al. (2006b) la Cuenca Norte abarca un área aproximada de 90.000 Km<sup>2</sup> (Figura 9), donde se han superpuesto cuencas desde el Devónico al Cretácico tardío, que evolucionaron con geometrías, estilos tectónicos y rellenos sedimentarios distintos (Figura 10).

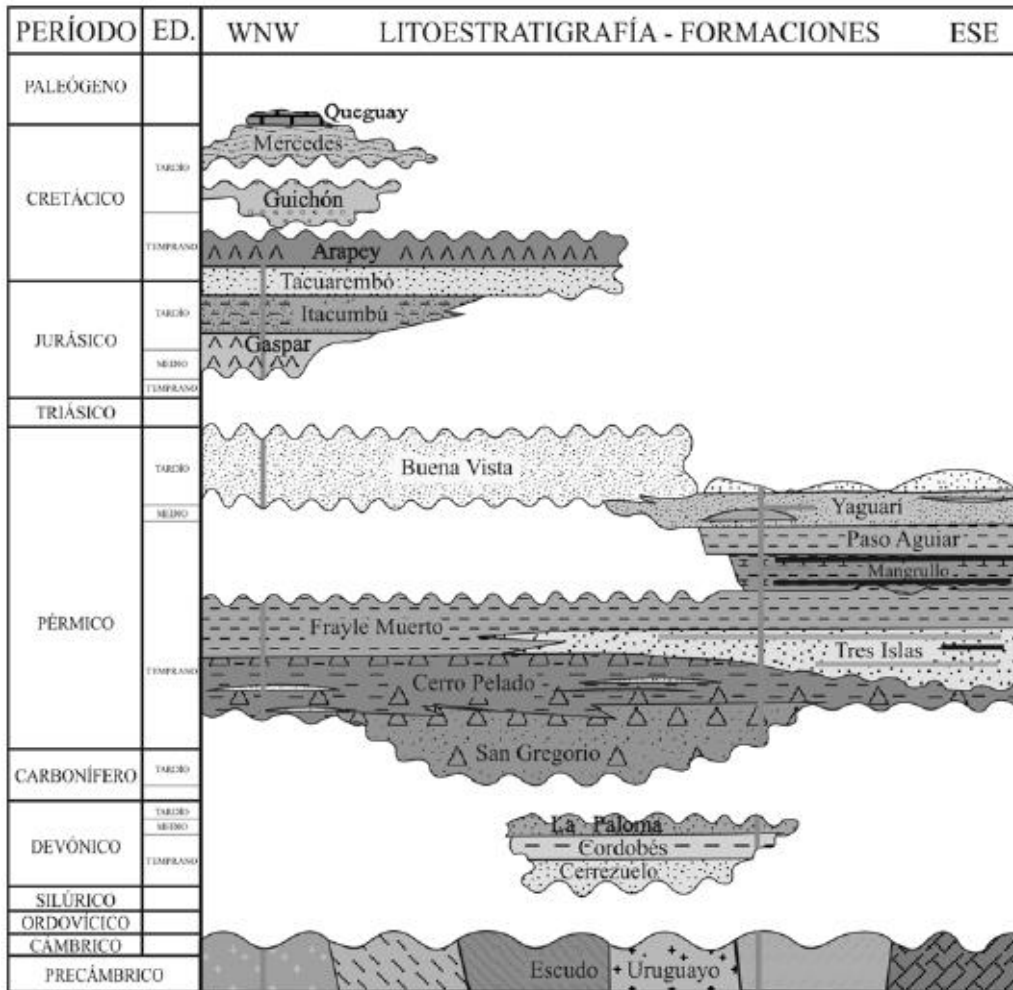


Figura 9. Mapa geológico esquemático de Uruguay con detalle de las unidades de la Cuenca Norte



Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

Figura 10. Columna estratigráfica de la Cuenca Norte



Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

La sedimentación Carbonífera-Pérmica en el Gondwana occidental es la de mayor extensión en área, el inicio de esta sedimentación está marcado por extensos registros glaciares, glacio-marinos o depositados bajo la influencia glacial. El establecimiento de interconexiones con el océano Panthalassa y la desglaciación producto de la migración y alejamiento del Gondwana del polo Sur, define un momento transgresivo. En esa etapa, termina la instalación de un extenso mar epicontinental que cubre buena parte de las regiones Gondwanicas occidentales (de Santana et al., 2006b). Es posible que, durante el máximo de inundación marina (Pérmico temprano), el mar interconectara la Cuenca Paraná con la región del Chaco Boliviano a través de territorio paraguayo (Fulfaro, citado por de Santana et al., 2006b) y, por ejemplo, más hacia el Sur, la Cuenca Chacoparanaense con la Cuenca de Paganzo, a través de la Cuenca Saliniana y porciones actualmente ascendidas de las sierras de

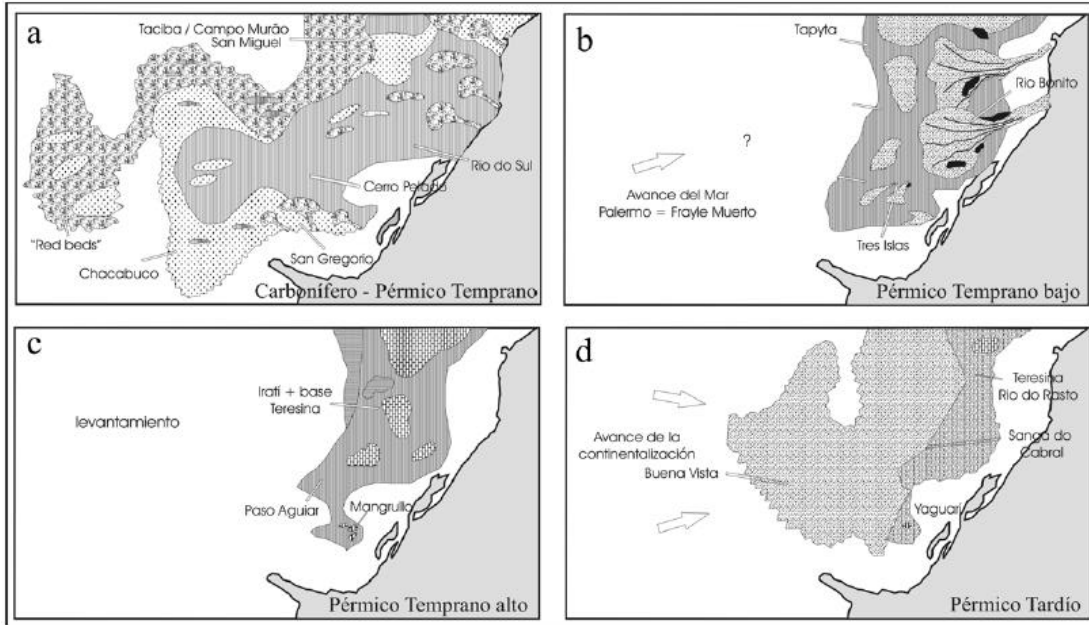
Córdoba septentrionales (Chebli et al., citados por de Santana et al., 2006b). En la Cuenca Norte la sedimentación Carbonífera-Pérmica está representada por las Formaciones San Gregorio, Cerro Pelado, Tres Islas, Fraile Muerto, Mangrullo, Paso Aguiar y Yaguarí (de Santana et al., 2006b)

El inmenso mar epicontinental Pérmico fue paulatinamente retrocediendo, controlado por el levantamiento generalizado de las áreas cratónicas, como respuesta a la tectónica compresiva desarrollada en el margen occidental de Gondwana hacia finales del Pérmico (Cobbold et al., Zalán et al., López-Gamundi y Rossello, Milani y Ramos, citados por de Santana et al., 2006b). En respuesta a esa tectónica, en esta amplia región, se fueron acumulando importantes depósitos continentales que terminaron por colmatar el área hacia finales del Pérmico-Triásico inferior (de Santana et al., 2006b). En la Cuenca Norte, esta continentalización inicia con la Formación (Fm.) Buena Vista. El fin del funcionamiento de este ámbito de sedimentación como una unidad geotectónica regional se corresponde con la sedimentación Cretácica que ocurre luego de los derrames basálticos (Fulfaro, Zalán, Rossello y Mozetic, citados por de Santana et al., 2006b).

Según de Santana et al. (2006b) el ordenamiento espacial y temporal de la mega secuencia Carbonífero-Pérmica (Formaciones San Gregorio, Cerro Pelado, Tres Islas, Fraile Muerto, Mangrullo, Paso Aguiar, Yaguarí y Buena Vista) definen un ciclo transgresivo-regresivo de segundo orden (súperciclo). En esta mega secuencia se identifican cuatro ciclos sedimentarios de tercer orden (Figura 11) que están limitados por discontinuidades estratigráficas de jerarquía menor, discordancias locales o intracuenca y/o concordancias correlativas. Estos ciclos son, en orden estratigráfico:

- Ciclo fluvio-eólico (Pérmico tardío)
- Ciclo marino transicional (Pérmico temprano a medio)
- Ciclo Marino a deltaico (Pérmico temprano)
- Ciclo glaciogénico (Carbonífero tardío-Pérmico temprano bajo)

Figura 11. Distribución de los 4 ciclos que componen la mega secuencia Permo-Carbonífera



Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

Según de Santana et al. (2006b) el ciclo marino-transicional esta exclusivamente representado en el sector oriental de la Cuenca Norte, y su desarrollo está vinculado con importantes controles estructurales y deposicionales de dirección NS y NW. Este ciclo está conformado por las Formaciones Mangrullo, Paso Aguilar y Yaguari, que se expresan en dos subciclos:

- El inferior o subciclo marino restricto/sistema cañada del Barón
- El superior, o subciclo plataformal a transicional/sistema cuchilla de Matamoros-Mangrullo

La Figura 12 expone las asociaciones de facies que se reúnen en el ciclo transicional a marino.

Figura 12. Asociaciones de facies y facies del ciclo marino a transicional (Pérmico temprano alto)

Ciclo Transicional–Marino	Facies	Mejores exposiciones (localidades y pozos)
Subciclo marino restrictivo– <i>lagoon</i> (Sistema Cañada del Barón).	<p>Pelitas macizas micáceas grises.</p> <p>Calculutitas.</p> <p>Brechas calcáreas.</p> <p>Lutitas y margas bituminosas (con intercalaciones de bentonitas).</p>	Represa de la Cañada del Barón; Cañada del Rodeo; pozos de Cañada de los Burros, Frayle Muerto y Vichadero.
Subciclo Plataformal a Transicional (Sistema Cuchilla de Matamoros–Mangrullo).	<p>Pelitas grises.</p> <p>Heterolíticas bioturbadas con estratificación lenticular, ondulada y flaser.</p> <p>Areniscas grises y verdosas, laminación ondulada y ondulitas ascendentes.</p> <p>Areniscas finas con laminación horizontal a subhorizontal con ondulitas.</p> <p>Areniscas finas y pelitas interlaminaadas e interestratificadas.</p> <p>Areniscas con estratificación cruzada.</p> <p>Calizas laminadas y brechadas.</p>	<p>Ruta 7, al Este de Melo (Villa Viñoles).</p> <p>Ruta 7, al Sur de Melo (pueblo Mangrullo).</p> <p>Ruta 7, al Este de Melo.</p> <p>Cuchilla Matamoros; Cuchilla de Mangrullo.</p>

Las asociaciones de facies del ciclo marino transicional se subdividen en dos subciclos correspondientes al marino restricto (barrera-lagoon) y plataforma a transicional.

Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

El subciclo superior reúne a las rocas sedimentarias acumuladas bajo condiciones de plataforma somera, que gradualmente pasan a las de planicies transicionales depositadas bajo influencia mareal. Este subciclo está representado por las Formaciones Paso Aguiar y Yaguarí, con características que denotan una mayor circulación y oxigenación de las aguas, e inclusive, hacia el tope, situaciones de exposición subáerea. Asociado al desarrollo del ciclo marino a transicional en la Cuenca Norte, se consta la preservación de niveles de cenizas volcánicas (de Santana et al., 2006b).

El ciclo fluvio-eólico (Pérmico tardío) esta materializado por la Formación Buena Vista, posee una distribución continua en el sector noroccidental de la Cuenca Norte, donde alcanza potencias superiores a los 600 m. En el sector oriental, los espesores son menores y en parte está ligado a los procesos erosivos que actuaron desde el Mesozoico. El conjunto de litologías asociadas a este ciclo se desarrolló al Norte de Melo, controlado por la dirección NE-SW que define el lineamiento situado al Norte de la Cuchilla

Grande, desde el arroyo Zapallar hasta la localidad de Buena Vista. Las litologías que tiene este ciclo se subdividen en dos grandes conjuntos faciológicos (Figura 13), uno que comprende a las litologías que conforman los depósitos de origen aluvio-fluvial y otro que agrupa a los depósitos de origen eólico (de Santana et al., 2006b).

Figura 13. Resumen de las asociaciones de facies y facies presentes en el ciclo fluvio-eólico (Pérmico tardío)

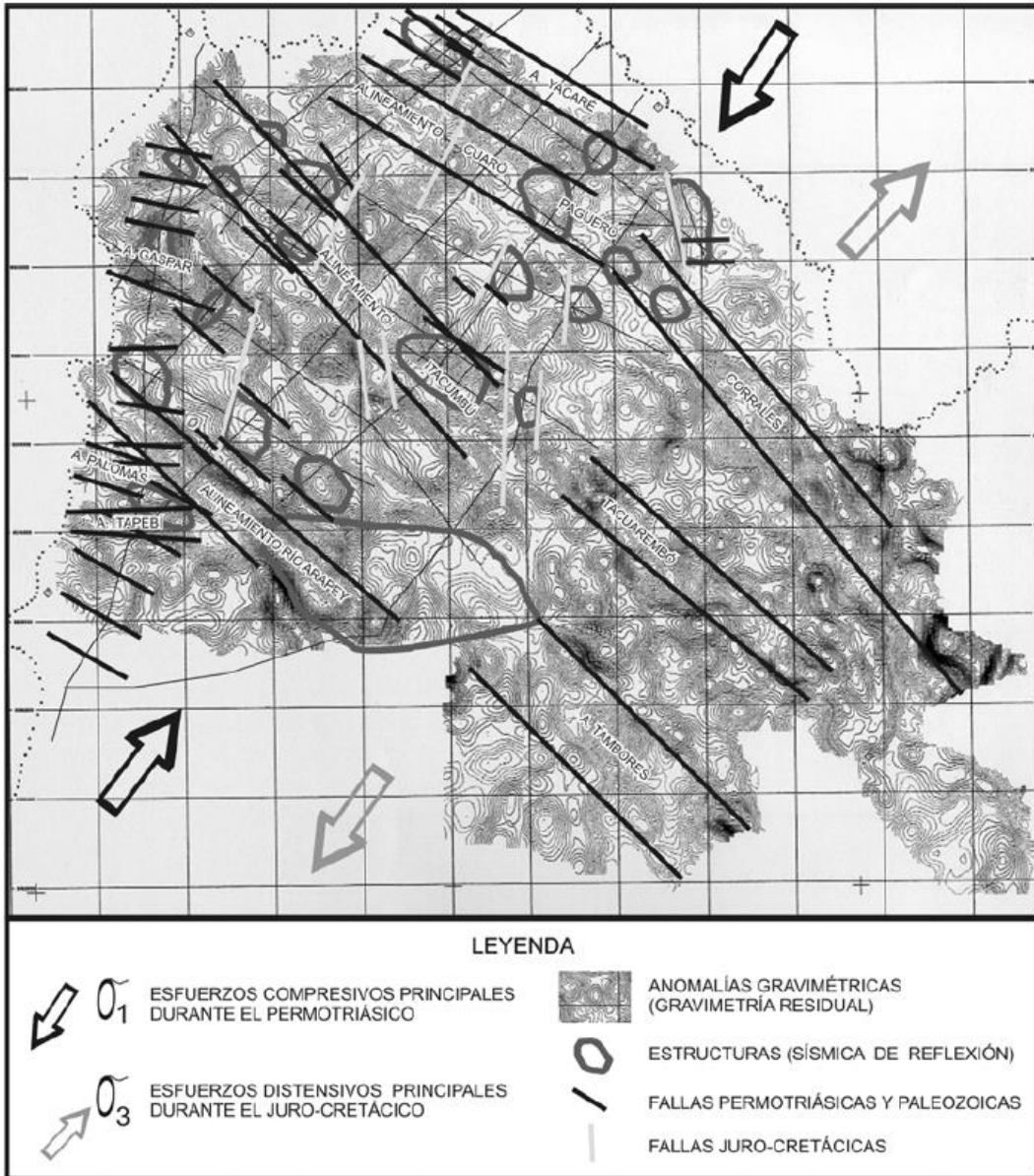
Ciclo fluvio-eólico	Facies	Mejores exposiciones (localidades o parajes)
Asociación de facies aluvio-fluvial.	<p>Conglomerados y areniscas conglomerádicas.</p> <p>Areniscas medias a gruesas con estratificación cruzada.</p> <p>Areniscas finas rojizas con estratificación cruzada en artesa.</p> <p>Areniscas finas blanquecinas con estratificación cruzada tabular planar.</p>	<p>San Jorge (dpto. de Durazno); Ruta 7-Los Molles; pozos Ulleste, Salsipuedes y Guichón.</p> <p>Sector Norte de Cuchilla Grande (Colonia Orozco); Paso de la Francesita; camino vecinal Mangrullo-Estancia La Matrera; camino desde Aeropuerto de Melo a Molles.</p>
Asociación de facies eólicas.	<p>Areniscas finas a muy finas, micáceas, rojizas, verdes y blanquecinas con laminación cruzada (tipo <i>climbing ripples</i>).</p> <p>Pelitas rojizas laminadas a macizas en estratos tabulares con espesores variables.</p> <p>Areniscas finas cuarzosas y maduras con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte.</p> <p>Areniscas finas maduras con estratificación sub-horizontal a horizontal (sábanas de arenas).</p>	<p>Ruta 8, km 420 (Melo, Aceguá).</p> <p>Ruta 8, localidad de Buena Vista.</p> <p>Cerro de Conventos; Cerro Pesiguero; Ruta 27; Paso Ataques; pozos Yacaré, Belén, Itacumbú, etc.</p>

El Ciclo fluvio-eólico se subdivide en dos subciclos correspondientes a la asociación de facies aluvio-fluvial y asociación de facies eólicas.

Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

Según de Santana et al. (2006b) la evolución tectónica y sedimentaria de la Cuenca Norte estuvo gobernada por las reactivaciones sufridas por dos conjuntos de lineamientos: N315°-325° y N20°. Esto se puede verificar por la tendencia que exhiben al control de la distribución isopáquica de varias unidades con respecto a la presencia de algunos lineamientos por la disposición de algunos altos y arcos asociados al basamento Precámbrico, como también al desarrollo de algunos sistemas deposicionales (Figura 14).

Figura 14. Estructuración de la Cuenca Norte en el sector Noroeste



En esta figura se muestran los rasgos estructurales principales

Fuente: tomado de de Santana et al. (2006b).

Los depósitos de las Formaciones Paso Aguiar y Yaguarí siguen la tendencia regresiva de la cuenca al pasar en forma gradual, de ámbitos marinos plataformales a transicionales-litorales con influencia de acción mareal. La

Formación Paso Aguiar caracteriza un escenario marino epinerítico, de mayor profundidad que en la Fm. Mangrullo, con el desarrollo de planicies arenosas dominadas por la acción de olas. Se infiere que la región oriental de la Cuenca Norte entra, durante la deposición de Mangrullo-Paso Aguiar, en una etapa de franca subsidencia, probablemente inducida por el alzamiento que se verifica en el sector occidental, relacionado a su vez con la dinámica que opera en torno al arco de Asunción (Asunción-Río Grande). El pasaje de la Formación Paso Aguiar a la Formación Yaguarí es gradual, mostrando la Fm. Yaguarí en su porción media arreglos litológicos y estructuras sedimentarias que denotan la actuación de mareas durante su deposición. Esto significa que, durante la deposición de esta unidad aún existía una conexión oceánica efectiva que permitió la acción de las mareas. Hacia el tope de la Fm. Yaguarí, la situación protegida de las planicies de mareas permitió una mejor preservación de los niveles de cenizas volcánicas (de Santana et al., 2006b).

El último evento de la Cuenca Norte se desarrolla durante el Pérmico tardío y lo representa el ciclo fluvial-eólico, constituido por la Formación Buena Vista, que marca la definitiva continentalización y cierre de la cuenca Permo-Carbonífera. Se trata de escenarios continentales que evolucionaron a partir de la configuración de nuevas áreas de aporte cratónico, presumiblemente levantadas durante la reactivación finipérmica a Triásica. En este contexto, se desarrollaron sistemas aluviales y fluviales (areniscas, pelitas y conglomerados rojizos) asociadas a importantes episodios eólicos que están mejor preservados en el subsuelo de la región noroccidental de la cuenca. Hacia el sector oriental de la cuenca (departamentos de Rivera y Cerro Largo) el ciclo adquiere su mayor desarrollo en superficie, con un predominio de las litologías arenosas de origen fluvial y algunos relictos eólicos preservados. Al Sur del departamento de Tacuarembó, los sistemas que se desarrollan son casi exclusivamente de tipo fluvial, y al Norte del departamento de Durazno, la presencia de conglomerados y areniscas conglomerádicas interdigitadas a paquetes arenosos rojizos, denotan una situación más proximal de tipo aluvial-fluvial. En el arroyo Zapallar, sobre la ruta 44 (tramo Melo-Paso Mazangano) y en la región de Colonia Orozco (Chacra de Melo) se verifica que las areniscas rojas con estratificación cruzada y pelitas masivas y laminadas aparecen interdigitadas con niveles lenticulares de conglomerados. Las direcciones de paleocorrientes indican una progradación al Norte y Nordeste (de Santana et al., 2006b).

El primer episodio tectónico intrapérmico que afecta a la mega secuencia Permo-Carbonífera sería reflejo de la orogénesis tardiherciniana y afecta particularmente a los registros basales del sector Sudeste de la Cuenca Norte. La segunda fase de deformación transcurre desde el Pérmico temprano alto al Triásico temprano y está configurada por importantes flexuras relacionadas a la transmisión de esfuerzos comprensivos intraplaca, asociada a



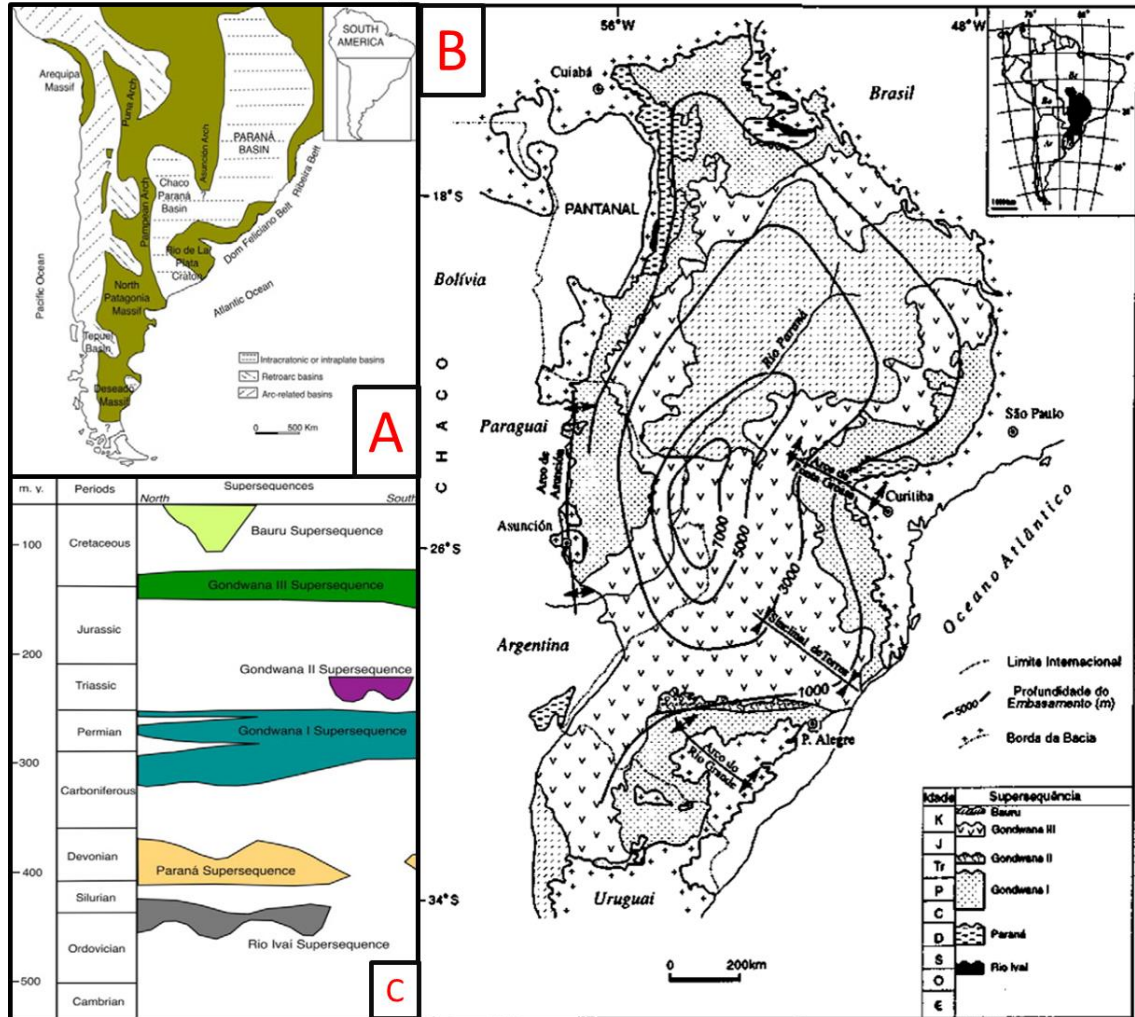
la fase orogénica finiherciniana del borde activo del Gondwana (Cobbold et al., Cobbold et al., Rossello et al., López-Gamundí y Rossello, citados por de Santana et al., 2006b). Los afloramientos que ocurren desde el Sur de la provincia de Buenos Aires (Massabie et al., citados por de Santana et al., 2006b) hasta la región nordpatagónica en Argentina, registran la historia de la deformación Permo-Triásica del antiguo margen Gondwanico, y que tuvo sus reflejos en el ámbito de la Cuenca Norte. Esta deformación asociada al frente orogénico en el margen occidental de Gondwana, se propagó hacia el Este sobre la región cratónica de las Cuencas Paraná y Chacoparanaense, generando la instalación de una cuenca de antepaís a partir del Pérmico tardío. En la Cuenca Norte los esfuerzos de propagación e interacción tectónica controlaron el desarrollo de estructuras comprensivas, suaves plegamientos y las altas tasas de subsidencia que se registran para la sedimentación tardipérmica en este sector del dominio cratónico (de Santana et al., 2006b).

### 2.5.2 Cuenca Paraná

De acuerdo a Milani y Ramos (1998) la Cuenca Paraná es una vasta región de sedimentación situada en la porción centro–oriental de América del Sur (Figura 15 A y B), que ha evolucionado durante el Paleozoico y el Mesozoico, con un registro estratigráfico que, temporalmente, abarca desde el Ordovícico tardío al Cretácico tardío, documentando casi 400 Ma de historia geológica del Fanerozoico, donde se reconocen seis unidades alostratigráficas de segundo orden o supersecuencias (Figura 15 C). Tres de ellas corresponden a ciclos transgresivos – regresivos Paleozoicos (hasta Gondwana I) y las demás son paquetes sedimentarios continentales Mesozoicos con rocas ígneas asociadas. Estas supersecuencias constituyen el registro remanente de sucesivas fases de acumulación sedimentaria que alteran con épocas de erosión generalizada.

Todos los supergrupos son delimitados por inconformidades regionales que abarcan muchos millones de años. Estos intervalos esencialmente fueron definidos por datos de baja resolución basados en macrofósiles de palynomorfos, plantas, invertebrados y vertebrados (Daemon y Qudros, Schneider et al., Rocha-Campos y Rösler, Rösler et al., Rohn y Rösler, Lavina, Pinto, Simões et al., Assine et al., Soares, Souza y Marques-Toigo, Iannuzzi y Souza, Chahud, citados por Canile et al., 2016). Recientemente, datos radiométricos han contraído a la supersecuencia Gondwana I (Figura 16) entre el Carbonífero tardío y el Pérmico tardío, basándose en niveles de cenizas volcánicas (tonsteins) encontradas intercaladas entre los sedimentos (Rocha-Campos et al., Santos et al., Fernandes, Guerra-Sommer et al., Mori et al., Simas et al., Cagliari et al., citados por Canile et al., 2016).

Figura 15. Mapa y estratigrafía simplificada de la Cuenca Paraná

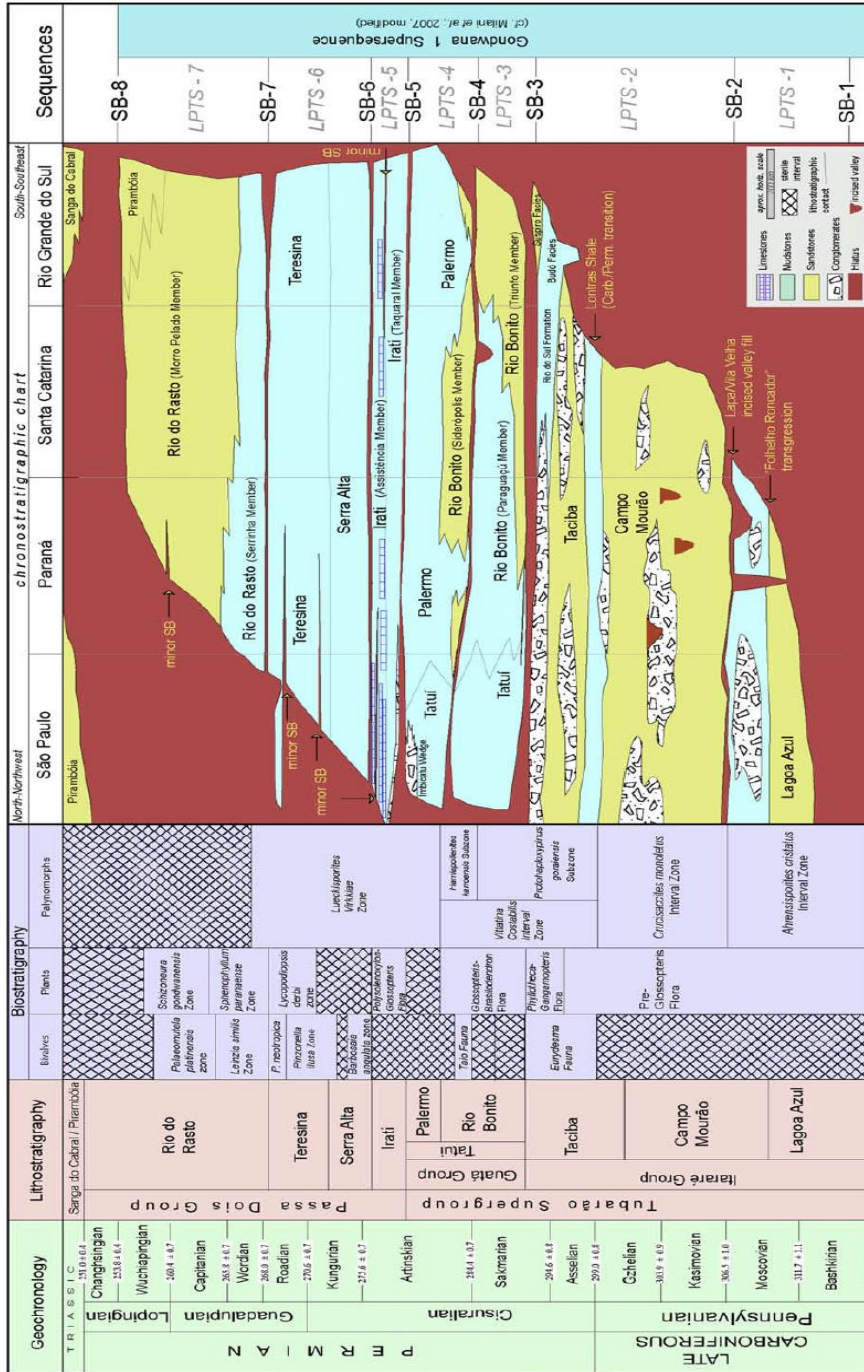


A. Ubicación de la Cuenca Paraná en América del Sur (Canile et al. 2016).

B. Mapa geológico simplificado de la Cuenca de Paraná, y distribución en el tiempo de las diversas unidades de su registro estratigráfico (Milani y Ramos, 1998).

C. Tabla estratigráfica simplificada de la Cuenca de Paraná (Canile et al. 2016).

Figura 16. Tabla estratigráfica detallada de la supersecuencia Gondwana I

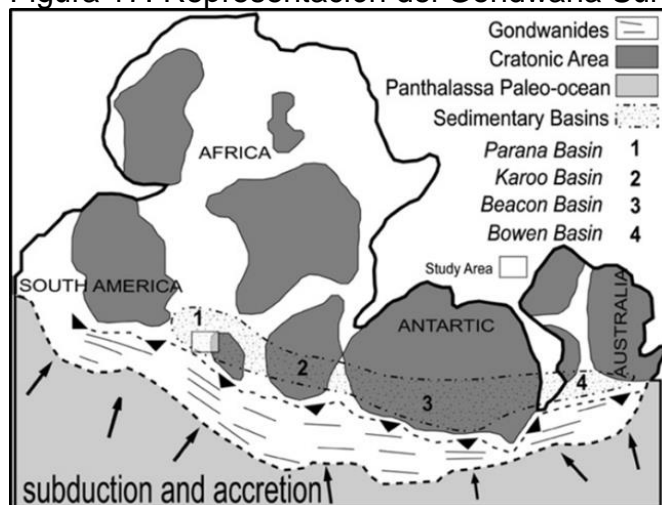


Fuente: tomado de Holz et al. (2010).

La Cuenca Paraná, originada como un golfo (Zalán et al., Milani, citados por Milani y Ramos 1998) abierto hacia el Panthalasa, con el tiempo se transformó en una depresión intracratónica en el interior del Gondwana. El crecimiento de la litosfera continental a lo largo del margen Sur del Gondwana fue un importante proceso durante el Fanerozoico, favoreciendo un contexto de cierre progresivo del interior del continente a las incursiones marinas (Milani y Ramos, 1998).

Dos dominios distintos se encuentran en el Gondwana Sur-occidental: una porción cratónica, correspondiente al núcleo del paleocontinente y constituida por un complejo mosaico de bloques corticales aglutinados y ligados entre sí durante el Cámbrico (Powell, citado por Milani y Ramos 1998) y por otro lado las Gondwanides (Keidel, citado por Milani y Ramos 1998), una extensa faja de orógenos Fanerozoicos y cuencas asociadas distribuidas a lo largo del margen meridional del Gondwana (Figura 17). La subducción y acreción en el margen occidental del Gondwana (cinturón Gondwanides) son responsables por inducir el estrés intraplaca, que pudo causar movimientos y subsidencia diferencial de bloques laterales adyacentes en la línea de costa en la parte más al Sur de la Cuenca Paraná, durante el Artinskiano-Kungurano (Milani y Ramos, 1998).

Figura 17. Representación del Gondwana Sur-occidental



Contexto tectónico regional basado en la evolución estructural del cinturón plegado Cape (Sudáfrica) y el cinturón de cabalgamiento La Ventana (Argentina).

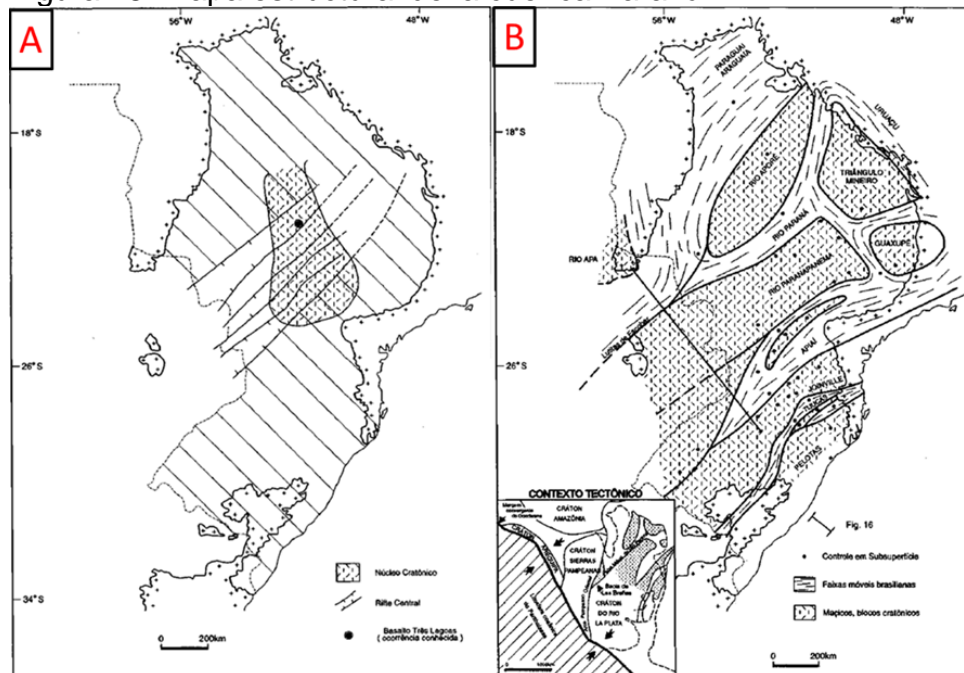
Fuente: tomado de Holz et al. (2006).

Esta cuenca, en función de su posicionamiento geotectónico y por sus características tectono-sedimentarias, es considerada una típica cuenca intracratónica, una región de sedimentación soportada por un basamento consolidado, un domino cortical caracterizado por elevada resistencia a los

esfuerzos originados en márgenes de placas (Milani y Ramos, 1998). El piso de la Cuenca Paraná (Figura 18) está constituido por un “núcleo cratónico” central, circundado por fajas móviles brasilianas (Cordani et al., Zalán et al., Soares, citados por Milani y Ramos 1998). Tal interpretación implica la existencia de un domino estable justamente en la región central de la sineclise, pero en realidad en la porción central de la Cuenca Paraná se encuentran los mayores espesores de sedimentos (Milani y Ramos, 1998).

Las interpretaciones de datos geofísicos muestran una persistente orientación SW-NE de anomalías gravimétricas y magnetométricas en toda la cuenca, probablemente relacionadas a la estructura del basamento. Datos de sísmica de reflexión también detectaron un patrón SW-NE de estructuras, configuradas como depresiones en la región central de la cuenca, donde se aloja el paquete Paleozoico más inferior predevoniano. Tal característica fue denominada “rift central”, ajustándose adecuadamente a las anomalías gravimétricas y magnetométricas de esta región (Marques et al., citados por Milani y Ramos 1998).

Figura 18. Mapa estructural de la cuenca Paraná



A. Los conceptos de “núcleo cratónico” y de “rift central” de la Cuenca Paraná. B. Estructura del basamento de la Cuenca Paraná. En el recuadro, marco geotectónico regional para el dominio Sur-occidental del Gondwana, las flechas indican movimiento convergente entre el continente y la litosfera del Panthalassa.

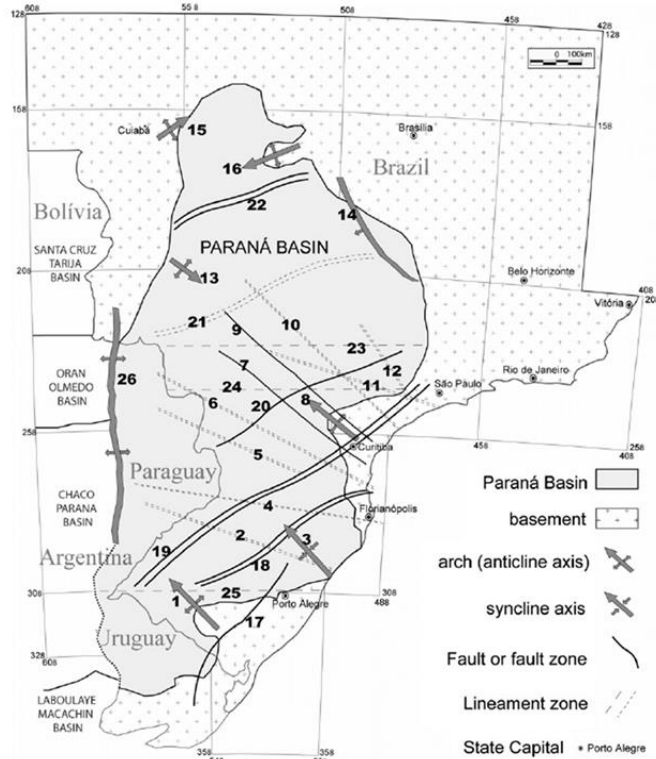
Fuente: tomado de Milani et al. (1998).

Pinto et al. (2019) identificaron patrones estructurales relacionados a la reactivación asociada con la evolución del Gondwana Oeste. Las estructuras con tendencias NNE-SSW son relacionadas con la reactivación del Transbrasiliano y al sistema strike-slip de Paraíba do Sul en el Ordovícico tardío. Los nuevos lineamientos NW-SE fueron generados con el crecimiento tectónico del Gondwana Oeste en el Triásico al Jurásico tardío, que iniciaron en la región del arco de Ponta Grossa (Pinto et al., 2019).

El registro estratigráfico de la Cuenca Paraná es, ante todo, una función del espacio de acomodamiento disponible para los sedimentos por tectónica (subsistencia) y eustacia en diferentes niveles jerárquicos. Los ciclos de primer (200-400 Ma) y segundo (10-100 Ma) orden son controlados por la tectónica de placas global y movimientos eustáticos de largo plazo (Holz et al., 2006). La variación en las secuencias deposicionales a lo largo, en espesor y tipos de sistemas deposicionales, muestran una cercana asociación con los bloques tectónicos, delimitadas por lineamientos y fallas asociadas del basamento, mostrando un control tectónico (Figura 19). El arreglo estructural del basamento de la cuenca parece inducir en una subsidencia diferencial, lo que resulta en un arreglo estratigráfico complejo (Holz et al., 2006).



Figura 19. Principales estructuras geológicas del basamento de la Cuenca Paraná



Los lineamientos principales se controlan mediante la disposición de núcleos cratónicos y cinturones móviles. (Zalan, et al., Christopher et al., CPRM y Paulipetro, citados por Holz et al. 2006). Estructuras NW-SE: 1. Arco Rio grande 2. Lineamiento Torres-Pousadas 3. Sinclinal Torres 4. Lineamiento Rio Uruguai 5. Lineamiento Iguacu 6. Lineamiento Rio Piquiri 7. Falla Rio Alonso 8. Arco Punta Grossa 9. Falla São Jeronimo–Curiuva 10. Lineamiento Guapiara 11. Lineamiento Rio Paranapanema 12. Lineamiento Rio Tiete 13. Arco Campo Grande 14. Flexura NE-SW Goias 15. Arco São Vicente 16. Arco Bom Jardim de Goias 17. Falla Açoteia 18. Zona de falla Blumenau-Soledade 19. Zona de falla Lancinha-Cubatão 20. Falla Jucutinga 21. Lineamiento Araçatuba 22. Zona de falla Tranbrasilian estructuras subordinadas E-W 23. Lineamiento Moji-Dourados 24. Lineamiento São Sebastião 25. Lineamiento N-S Jacuí 26. Arco Assunção.

Fuente: tomado de Holz et al. (2006).

Milani y Ramos (1998) interpretan la existencia de una estricta correlación entre la evolución de la Cuenca Paraná en el interior del continente Gondwana y el régimen tectónico actuante a lo largo de los Gondwanides durante el Paleozoico. Los autores indican que el sustrato del Suroeste del Gondwana reaccionó por flexión bajo campos de tensión que se originan a lo largo del margen activo, y este hecho represento un efectivo mecanismo de creación de espacio de acumulación sedimentaria en el dominio intracratónico.

A su vez, este mecanismo de subsidencia parece reflejar la propagación hacia el interior del antepaís, de tal forma que la Cuenca Paraná experimentó fases de subsidencia acelerada.

La amplitud temporal de las supersecuencias en la Cuenca Paraná está claramente confinada a los límites temporales de los diferentes ciclos de subsidencia provocados por las orogenias Paleozoicas del margen del Gondwana. Las firmas estratigráficas de varias supersecuencias, en términos de ciclos transgresivos-regresivos, presentan una estricta correlación de los ciclos de subsidencia del Gondwana Sur-occidental (Milani y Ramos, 1998). El estrés intraplaca aplicado a la plataforma sudamericana y, por lo tanto, a la Cuenca del Paraná durante la colisión y acreción de terrenos en el margen occidental del Gondwana, cíclicamente reactivó la tectónica de bloques (De Wit y Ransome, Milani y Ramos, Milani, citados por Holz et al., 2006). La misma tendencia ha sido observada a niveles regionales y locales para las secuencias de tercer orden y las parasecuencias de cuarto orden (Holz et al., 2006). Considerando a tres niveles (a nivel de cuenca, regional y local) en el orden jerárquico más bajo las reactivaciones de fallas locales pueden tener un intervalo de 10.000 – 100.000 años y crear cientos de metros de espacio. Su control parcial se solapa con el tiempo y creación de espacio inducidos por estrés intraplaca y variaciones glacioeustáticas (Dickinson et al., citados por Holz et al., 2006). En los tres niveles, parece existir una clara superimpresión tectónica en la firma estratigráfica. A escala de cuenca completa, importantes inconformidades limitan secuencias deposicionales de segundo orden. Estas inconformidades, algunas con hiatos de hasta cientos de millones de años, son de origen tectónico. El levantamiento y subsidencia diferencial en la Cuenca Paraná en respuesta a la colisión tectónica en el margen occidental del Gondwana fue condicionado por la heterogeneidad del basamento de la cuenca (Holz et al., 2006).

En el Carbonífero–Pérmico, la orogenia Chanica (Carbonífero temprano) produjo un ciclo renovado de subsidencia muy bien documentado en el antepaís. En el Oeste argentino, el ciclo Guandacol de la Cuenca de Paganzo (Missisipiano) corresponde a esta fase de subsidencia (Fernández-Seveso y Tankard, citados por Milani y Ramos 1998). En la Cuenca Paraná este fue un tiempo sin deposición, básicamente en función de la presencia e influencia de los glaciares en el área de sedimentación de la cuenca. La sedimentación es retomada en el Westfaliano (Moscoviano) y continúa hasta el Triásico temprano. La influencia marina se reduciría progresivamente con el pasar del tiempo, indicando un progresivo y efectivo cierre de la cuenca a las incursiones del Panthalassa (Milani y Ramos, 1998).

Al final del Pérmico temprano, la morfología de la cuenca fue profundamente modificada, hecho que coincide en tiempo con el clímax de la

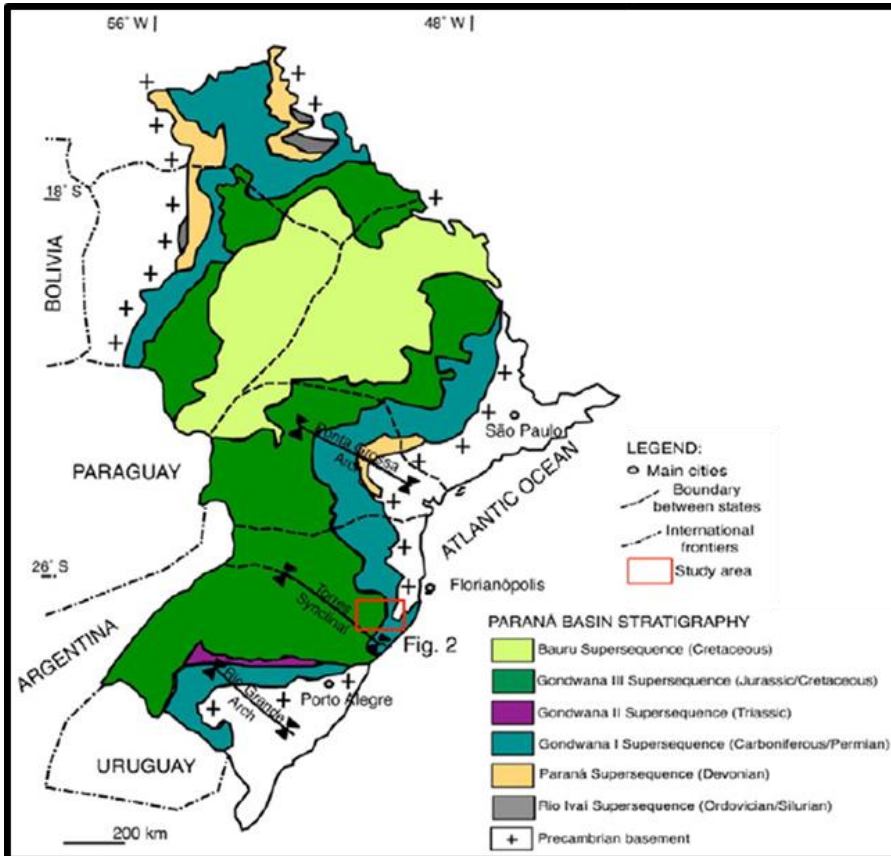


orogenia San Rafael. El material de origen volcánico que ocurre en la sección Pérmica inferior de la cuenca (Coutinho et al., citados por Milani y Ramos 1998) se correlaciona al evento Choiyoi del Oeste de Argentina, que corresponde a un vasto arco magmático calco-alcálico distribuido entre 275 Ma y 250 Ma (Kay et al., citados por Milani y Ramos 1998) que debe haber constituido un efectivo, y probablemente definitivo, obstáculo de acceso marino sobre el Gondwana meridional (Urien et al., citados por Milani y Ramos 1998).

Uno de los intereses en las unidades Permo-Triásicas de diferentes cuencas del mundo, recae en estudiar las sucesiones depositadas en esta faja de tiempo para entender el motivo por el cual ocurrió en esta época la mayor y nunca antes vista crisis ecológica en el planeta (Visher et al., Twitchett et al., Steiner et al., citados por Warren et al., 2008). En la Cuenca Paraná, el pasaje entre el Pérmico y el Triásico está marcado por la deposición de una sucesión con arquitectura progradacional representativa de los estadios finales del tracto de sistema de mar alto de la secuencia Gondwana I (Milani, citado por Warren et al., 2008).

Canile et al. (2016) realizaron estudios en U-Pb, Lu-Hf e isótopos de O en zircones detríticos de unidades que van desde el Paleozoico tardío al Mesozoico temprano. Las muestras fueron obtenidas en la Columna de White, Cuenca del Paraná, SE de Brasil (Figura 20), siendo el objetivo caracterizar la proveniencia de los sedimentos, así como contribuir al entendimiento de la evolución de la cuenca. La sección estudiada incluye rocas de 11 unidades estratigráficas, siendo de base a cima: Fm. Rio do Sul, Fm. Rio Bonito (Miembros Triunfo, Paraguaçu y Siderópolis) Fm. Palermo, Fm. Irati, Fm. Serra Alta, Fm. Teresina, Fm. Rio Do Rastro (Miembros Serrinha y Morro Pelado) y la Fm. Botucatu.

Figura 20. Ubicación de la Cuenca de Paraná en América del Sur y distribución estratigráfica de las supersecuencias de la Cuenca de Paraná en el territorio brasileño



El rectángulo rojo indica la región de trabajo comprendida en Canile et al. (2016).

Fuente: tomado de Canile et al. (2016).

Las edades de U-Pb para zircones en estas unidades abarcan desde 242 Ma hasta 3.4 Ga. Todas las unidades muestran cuatro grupos detríticos principales: Nearqueano, Paleoproterozoico medio, Grenvillano y Brasiliano-Pan Africano. Esto refleja la importancia del basamento precámbrico ubicado al E del área de estudio. Sin embargo, las firmas isotópicas muestran que una porción de los zircones del Paleoproterozoico medio (1.9-2.0 Ga) son probablemente de rocas del basamento que actualmente está cubierto, que estaba expuesto hasta la deposición de la Fm. Rio Bonito (correlativa a la Fm. Tres Islas de Uruguay). Los isótopos también muestran algunos zircones de edad Grenvillana, de rocas argentinas, lo que implica un transporte a grandes distancias. El Miembro Siderópolis (Fm. Rio Bonito) muestra un importante cambio en el área fuente de sedimentos, dado que contiene un pico de edad Pérmica que no estaba presente en las unidades inferiores, y que se mantiene

persistente en las unidades superiores. Este pico Pérmico conecta con la provincia ígnea Choiyoi y el Macizo Patagonia Norte, por lo que fuentes desde Argentina alcanzan la cuenca por medio de transporte de largas distancias, en ambientes subacuáticos y no solamente por medio del aire (cenizas volcánicas) como es de común aceptación. Otros picos más jóvenes encontrados también se conectan con fuentes argentinas, indicando la importancia del transporte a larga distancia durante el llenado de la cuenca. Las áreas al borde de la cuenca no son las únicas de importancia como áreas fuente, sino que también fuentes lejanas son importantes, mostrando la posibilidad de los detritos de viajar largas distancias (Canile et al., 2016).

### 2.5.3 Cuenca Chacoparanaense

La llanura Chacopampeana es una extensa planicie que se desarrolla en partes de Argentina, Uruguay, Brasil, Paraguay y Bolivia (Figura 21). Es una gran llanura con altitudes por debajo de los 200 m sobre el nivel del mar. Esta llanura en Argentina fue cubierta por una delgada y continua capa loésica cuaternaria, que esconde varias cuencas de distintas edades y orígenes geológicos. La ausencia de inversiones tectónicas internas recientes ha provocado la falta de afloramientos de las principales secuencias contenidas en la región (Chebli et al., 1999).

Figura 21. Ubicación de la región Chacopampeana

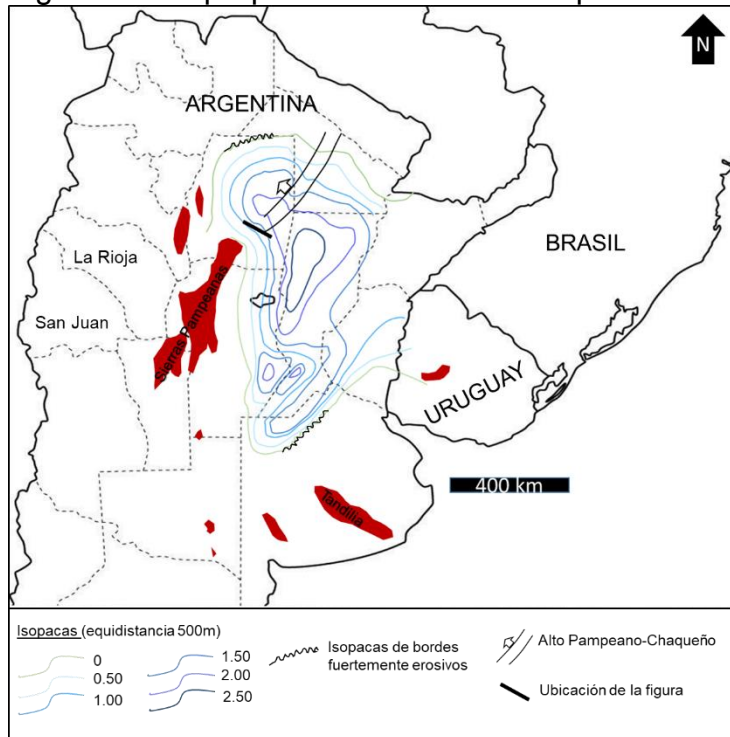


Fuente: tomado de Chebli et al. (1999).

Desde por lo menos el Paleozoico inferior en la llanura Chacopampeana dominaron varios episodios de subsidencia, con leves y localizados levantamientos tectónicos, que dieron origen a una columna estratigráfica bastante completa para un área de supuestamente poca movilidad, y algunas discordancias angulares notables. Estos episodios de subsidencias tuvieron un área general en común en el centro-Norte de la provincia de Santa Fe (lo que se consideraba tradicionalmente el centro de la denominada Cuenca Chaco Paranaense) además de focos de subsidencia de diferentes edades ubicados en la periferia de la llanura. Las diferentes cuencas sedimentarias identificadas corresponden a las Breñas (Paleozoico inferior), Chaco Paranaense (Neopaleozoico y Mesozoico) que incluye la fosa de Rosario entre los altos de Camilo Aldao y Junín, Cuenca de General Levalle, Cuenca de Macachin y su probable extensión en el Colorado y la Cuenca del Salado. Cabe mencionar que, en algunas áreas de pobre información, existen algunas zonas dentro del “basamento” con reflexiones sísmicas coherentes que podrían constituir sedimentitas (Chebli et al., 1999).

Según Chebli et al. (1999) los depósitos Neopaleozoicos que están en el área Chacoparanaense corresponden a la Cuenca Chacoparanaense (Figura 22) los cuales tienen continuidad y forman parte de una única cuenca con los depósitos de la Cuenca Paraná en Brasil y Uruguay, y es probable que se encuentren con la Cuenca Paganzo a través de la Cuenca Saliniana.

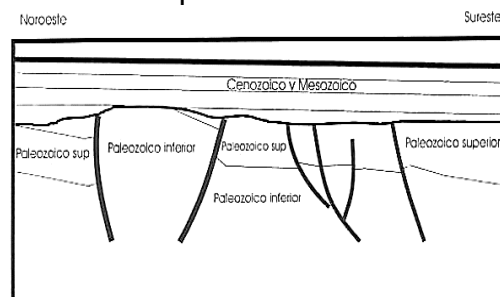
Figura 22. Isopáquico del Paleozoico superior



Las áreas en marrón oscuro al Oeste son afloramientos de basamento y al Sur y en Uruguay son afloramientos del Paleozoico inferior.

Fuente: modificado de Chebli et al. (1999).

Figura 23. Rasgos tectónicos del relleno sedimentario en el borde Norte de las sierras Pampeanas orientales



Ubicación del corte en la Figura 22.

Fuente: tomado de Chebli et al. (1999).

## 2.5.4 Formación Yaguari

### 2.5.4.1 Generalidades de la Formación Yaguari

La Formación Yaguari ha sido estudiada por diversos autores a lo largo de la investigación nacional (Falconer, Serra, Caorsi y Goñi, Bossi, Elizalde, Ferrando, citados por Bossi y Navarro 1988) y los documentos que reúnen esta información son los elaborados por Bossi y Navarro (1988), de Santana et al., (2006a). En esta sección se tratarán de manera extensa estas dos fuentes de información y se desarrollaron otras fuentes pertinentes.

Bossi y Navarro (1988) proponen la denominación litoestratigráfica de subgrupo Yaguari-Buena Vista, en el cual incluyen al conjunto de rocas sedimentarias con abundancia o predominio de colores de oxidación de origen sinsedimentario, que se encuentran sobre los “Sedimentos Pelíticos Grises” y cubiertas por el grupo Batoví Dorado. El carácter de subgrupo lo aplican dado que ambas Formaciones tienen como característica en común y sobresaliente (en todo el supergrupo Gondwana) ser las únicas que poseen colores de oxidación sinsedimentarios. Los autores indican que este conjunto litológico ha presentado controversias, tanto en su nomenclatura como en su edad, así como en los límites y criterios de separación a tomar con las unidades adyacentes, lo que habría llevado a que Bossi (1966), Elizalde et al., (1970) no pudieran separar a la Formación Yaguari en la base y a la Formación Buena Vista en la cima, como sí lo hacen Bossi y Navarro (1988), posibilitados por el análisis de antecedentes y al ser viable su cartografía independiente a escala 1/100.000.

Bossi y Navarro (1988), para denominar a la Fm. Yaguari, adoptan el criterio de Ferrando y Andreis (1986), por considerarlo el enfoque más elaborado y sustentado por relevamiento geológico a escala 1/100.000 de extensas áreas de los departamentos de Cerro Largo, Rivera y Tacuarembó, pero, modifican este criterio al proponer darle nombre a dos miembros dentro de la formación. Para esa modificación, se basan en los criterios de Falconer (1937) y la clasificación de Miembro Inferior y Miembro Superior de Elizalde et al. (1970). Los miembros propuestos por Bossi y Navarro (1988) son: Miembro San Diego (basal) y Miembro Villa Viñoles (superior). Elizalde et al. (1970) utilizan otras divisiones dentro de la Fm. Yaguari, dividiendo en Miembro Inferior y Superior, y a su vez al Superior lo dividen en tres capas: Basal, Media y Superior. Elizalde et al. (1970) no consideran a la Fm. Buena Vista como una unidad independiente, por lo que esta subdivisión discrepa con la utilizada por Bossi y Navarro (1988). Parte de la capa Media y la capa Superior contienen características atribuibles a la Fm. Buena Vista, que serán tratadas en el capítulo correspondiente. La capa Basal y parte de la capa Media son relacionables al Miembro Villa Viñoles, mientras que el Miembro Inferior es relacionable con el Miembro San Diego, como se verá más adelante en la

sección correspondiente a cada Miembro propuestos por Bossi y Navarro (1988).

Ferrando et al., citados por Bossi y Navarro (1988), indican que la Fm. Yaguarí sigue en concordancia a la Fm. Melo con contacto gradacional, mientras que en los alrededores de las Islas Cristalinas Cuñapirú-Vichadero y Aceguá se apoya directamente sobre las rocas predevonianas, y en otras áreas de la cuenca se apoya directamente sobre la Fm. San Gregorio. Bossi y Navarro (1988) indican que Falconer y Elizalde et al. plantean que con la aparición de tonos oxidantes en el paquete sedimentario (respecto a la infrayacente Fm. Melo) inicia la base de la Fm. Yaguarí, criterio fundamental seguido por diversos investigadores en su cartografía. Además, los autores indican que el máximo espesor de esta unidad se presenta en el pueblo Bañado de Medina, con 163 metros.

La Fm. Yaguarí comprende, en términos generales, pelitas, areniscas finas (y medias subordinadas) y escasos calcáreos lenticulares o concrecionales. A las tonalidades reductoras de la Fm. Melo, se le van agregando tonos rojizos (10R6/6, R4/6), violáceos (5R5/4) y borravino (10R4/2); estos tonos se hacen más frecuentes hacia el tope de la unidad, donde constituyen los colores dominantes. Se plantea que en la parte inferior de la unidad los diversos litosomas se presentan como estratos tabulares con contactos planos definidos o transicionales, y con estructuras internas macizas, laminadas, y estructuras flaser. En la parte superior, disminuyen los calcáreos y aumenta la participación de las litologías arenosas, asociadas con una mayor lenticularidad de las mismas, relacionadas con la aparición de estructuras en artesas de porte medio (Andreis y Ferrando, citados por Bossi y Navarro 1988).

Andreis y Ferrando, citados por Bossi y Navarro (1988), expresan que los cambios cromáticos, característicos de la Formación Yaguarí, sugieren una gradual modificación del Eh del medio, hacia condiciones más oxidantes, aunque sin mayores cambios ambientales en la parte inferior, donde continuaba instalado un ambiente albuférico, por lo menos en el Este de la cuenca, y que la ausencia de grietas de desecación es una prueba a favor de la existencia de aguas permanentes. En la parte superior de la unidad, donde los cambios en estratificación, frecuencia litológica (aumento de areniscas) y en las paleocorrientes (que ahora se dirigen al Norte), parecen indicar una creciente influencia fluvial, aunque aún poco definida, representada por algunas pequeñas barras de desembocadura (ciclos grano crecientes) y cuerpos arenosos canalizados.

La Formación Yaguarí es redefinida en sus miembros por de Santana et al. (2006a) en Miembro Inferior y Superior, sin mucha más justificación ni aportes que los ya propuestos por Bossi y Navarro (1988) en cuanto a las

locaciones preliminares y nomenclatura de los Miembros San Diego y Villa Viñoles. No se aporta información de nuevos sitios de afloramientos tipo para estas subdivisiones. Además, de Santana et al. (2006a) invierten el comportamiento de las litologías propuestas por los otros investigadores, al colocar el predominio de las fracciones más gruesas en el Miembro Inferior y las más finas en el Superior.

Según de Santana et al. (2006a) la Formación Yaguarí reúne un conjunto de litologías predominantemente siliciclásticas, arenosas finas y pelitas, que tienen en común colores primarios representados por tonalidades vivas, siendo comunes los tonos abigarrados, predominando el verde, violáceo, rosado, rojo, castaño y morado. Las tonalidades amarillas son menos comunes y pueden estar reflejando colores secundarios.

#### 2.5.4.2 Subdivisiones de la Formación Yaguarí

Bossi y Navarro (1988), en su división de la Fm. Yaguarí, definen al Miembro San Diego como el correspondiente a las capas de transición desde la Formación Melo, con litologías y estructuras idénticas a las del Miembro Paso Aguiar (de la Formación Melo, según Bossi y Navarro, 1988), pero con la aparición de colores de oxidación singenéticos, siendo el color la única diferencia que marca el primer nivel estratigráfico del Miembro San Diego. Las relaciones de contacto son concordantes, tanto con el Miembro Paso Aguiar (subyacente) como con el Miembro Villa Viñoles (suprayacente), existiendo, con este último, solamente un cambio de estructura.

El Miembro San Diego está integrado por más de 60% de limolitas, 35% de areniscas muy finas y 3% de lutitas. Las limolitas son micáceas, de cemento arcilloso que presenta en más del 90% de los casos estratificación paralela. Los colores abigarrados y oxidantes representan el 38%, los castaños y violáceos el 30%, el rojo un 19%, y el gris, verde y tonos de reducción un 13%. La biotita es la mica más frecuente, dominando sobre la muscovita y vermiculita. Las areniscas son finas y muy finas, feldespáticas, micáceas de cemento arcilloso o calcáreo, la estratificación es ondulada o microcruzada. Los colores son todos de oxidación: castaños, violáceos, rojos y rosados. Esta aparición de colores exclusivamente de oxidación en las areniscas finas es uno de los caracteres definitorios de la formación (Bossi y Navarro, 1988). En cuanto a su estructura y potencia, Bossi y Navarro (1988) plantean que las areniscas aparecen siempre interestratificadas con limolitas, siendo estas últimas las rocas dominantes. Las areniscas pueden aparecer en niveles de hasta un metro de potencia, siendo lo normal que no sobrepasen 50 cm. La asociación de limolitas y areniscas determinan una estratificación paralela característica de este miembro, no ocurriendo afloramiento que no contengan limolitas, y en la enorme mayoría de



los casos, con niveles de 5 a 80 cm de areniscas muy finas de colores de oxidación. Se estima que la potencia en el departamento de Cerro Largo alcance los 30 metros. Bossi y Navarro (1988) no proponen una sección tipo, toman provisoriamente como tipo la localidad de San Diego, dado que los mejores afloramientos no se encuentran en ningún lugar geográfico notorio. Los autores aclaran que, en los alrededores de la localidad de San Diego, departamento de Cerro Largo, el subsuelo está constituido exclusivamente por litologías pertenecientes a este miembro, pero no existen afloramientos de calidad remarcable. A su vez, los autores proponen tentativamente como afloramientos tipo los que se encuentra a 7 km al Este de Isidoro Noblia y el que se encuentra a unos 3 km al Norte de Mangrullo.

En resumen, la definición de este miembro que proponen Bossi y Navarro (1988) es que está integrado por limolitas micáceas dominantes, estratificadas con niveles de areniscas finas de pocos decímetros que presentan sistemáticamente colores de oxidación. Las características que lo definen son fundamentalmente dos:

- Alternancia decimétricas a métricas de limolitas y areniscas finas con predominio de las rocas limosas.
- Color siempre oxidante en las areniscas.

El Miembro San Diego determina topografías con lomadas de muy suave pendiente, casi aplanadas en la parte superior, alargadas y suavemente disectadas lateralmente. Las pendientes son muy bajas, con permeabilidad moderada (Bossi y Navarro, 1988).

El proceso sedimentario ocurrió por la acción de un agente de transporte acuático, con corrientes que mantuvieron constantes la competencia entre límites muy estrechos de variación, de reducida competencia y suficientemente límpidas como para permitir una selección granulométrica tan perfecta y característica, así como para permitir la concentración de mica en lechos muy delgados. El medio ambiente de deposición corresponde a una zona de aguas tranquilas, de reducida movilidad y gran capacidad de selección granulométrica. Los pequeños cambios de la movilidad del agua en la zona de depósito se expresan por la sedimentación de delgados lechos cuya granulometría oscila entre limosa y arena fina. Las condiciones de óxido-reducción presentan oscilaciones desde colores verdes y grises (en las limolitas) hacia colores rojos, violetas y pardos. Las condiciones nunca fueron lo suficientemente extremas como para oxidar totalmente el hierro al estado  $Fe^{+++}$  (férrico) ni como para reducirlo totalmente a  $Fe^{++}$  (ferroso) y tampoco para permitir la completa conservación de la materia orgánica. El pH debió permanecer siempre cercano a 7.8 dado que la cementación calcárea en las areniscas es muy frecuente llegando a veces a presentar grandes cristales de

calcita que engloban partículas detríticas sin modificar su distribución original. No es posible determinar ni la salinidad ni la profundidad del medio, pero las posibilidades de renovación del oxígeno son relativamente frecuentes para mantener muchos niveles con hierro férrico (Fe<sup>+++</sup>). El mayor grado de oxidación del hierro es más probable que corresponda a un cambio climático en el área de proveniencia que a una mayor movilidad de las aguas. La preservación de la biotita casi inalterada implica un predominio de procesos físicos en la meteorización de las rocas continentales, con un clima árido y/o frío, pero al destruirse la materia orgánica y oxidarse el hierro, debe descartarse el clima demasiado frío. Se puede suponer un aumento de temperatura y una disminución de pluviosidad respecto de las condiciones reinantes durante el depósito del Miembro Paso Aguiar (Bossi y Navarro, 1988).

Según Bossi y Navarro (1988) la paleogeografía más probable es una planicie costera con intervención de ingresos marinos para permitir la precipitación de carbonatos, aunque el ritmo no puede asignarse a fluctuaciones de marea. Elizalde, citado por Bossi y Navarro (1988), realizó análisis sedimentológicos y mineralógicos muy detallados de muestras adjudicables al Miembro San Diego, donde se detalla que en la fracción arcilla la beidellita es siempre muy importante y que la fracción detrítica es bastante rica en minerales alterables como feldespatos y biotita. Además, parte de las muestras contienen analcima como cemento producido durante la diagénesis, por aguas residuales ricas en sodio, lo que sugiere un ambiente marino o de lago salado. La paleogeografía de este Miembro se puede interpretar, desde el infrayacente Miembro Paso Aguiar (Formación Melo), como una evolución climática hacia un ambiente más cálido, con estaciones contrastadas. Esto habría modificado las relaciones entre la erosión y la alteración, aumentando la intensidad de la meteorización química, dando como productos de alteración en el continente arenas rubificadas. Las rocas fuentes en el continente y los aspectos físicos del transporte quedaron incambiados, pero por la variación climática, la cantidad de materia orgánica aportada a la cuenca disminuye. La cuenca de sedimentación presenta periodos de desecación, postulando que el paisaje podría ser una planicie aluvial, que pudo ser continental permanente inundada o litoral sometida a la acción de las mareas (Bossi y Navarro 1988).

El Miembro Villa Viñoles, definido por Bossi y Navarro (1988), comprende la alternancia de limolitas y areniscas en espesores individuales siempre superiores a un metro. Las areniscas dominan (~65%), son predominantemente finas y muy finas, bien seleccionadas, subredondeadas, feldespáticas y micáceas, con cemento arcilloso en el 60% de los casos y calcáreo en el resto. La estructura dominante es la estratificación paralela o cruzada, siendo raras las de estructuras masivas. Los colores son netamente oxidantes, siendo los más comunes el rojo, violeta, marrón, amarillo, rosado los

mayoritarios (60%), siguiendo los abigarrados con blanco o verde (22%), ocurriendo en menor medida colores reductores como verde y gris (10%) y raras areniscas blancas (6%). Las limolitas (~35%) son micáceas y arcillosas, con dominante estratificación paralela, el color más frecuente es el rojo, siendo menos frecuentes los tonos violáceos o castaños, pero no son raras las limolitas de colores abigarrados. El cemento, tanto para las areniscas como para las limolitas, está constituido por montmorillonita cálcica. Otras litologías secundarias, pero de importancia económica son los nódulos y lentes calcáreos, y lentes de montmorillonita cálcica. Algunos calcáreos son concreciones septarias de origen subacuático, con episodios subáereos, que se forman por desecación las grietas superficiales en el material margoso. Los lentes de montmorillonita son de altísima pureza, que obligatoriamente tuvieron que formarse en lagunas o ambientes confinados sin drenaje de cationes. Elizalde es citado por Bossi y Navarro (1988), mencionando que la mineralogía de las arcillas muestra una mayor frecuencia de esmectitas que pueden llegar formar niveles prácticamente puros. La illita y la clorita aparecen en bajo porcentaje, y desaparece la caolinita.

La sección tipo propuesta por Bossi y Navarro (1988) es un perfil descrito por Elizalde, ubicado a 600 metros al Sur de la localidad de Villa Viñoles, departamento de Cerro Largo. Los autores indican que esta localidad se encuentra apoyada sobre rocas pertenecientes al Miembro San Diego, pero inmediatamente al Sur de la citada localidad pasa una importante falla que hace que a solo 600 metros de la orilla del poblado aparezca una excelente exposición de las rocas del Miembro Villa Viñoles. Por este motivo los autores consideran provisoriamente la denominación de este Miembro y tomar como sección tipo el citado afloramiento.

Como ya fue mencionado, la capa Basal, subdivisión propuesta por Elizalde et al., coincide en una parte con el Miembro Villa Viñoles de Bossi y Navarro (1988). Para la capa Basal Elizalde et al. (1970) indican que los lechos de calizas resistentes a la erosión son estratos guías para el relevamiento de esta capa. Además, estos autores indica que las pendientes son menores que las que desarrollan los Sedimentos Pelíticos Grises. La permeabilidad es moderada, pero no determina zonas anegadas, y no permite un desarrollo importante de suelos alcalinos, siendo los cursos de agua escasos y de corrientes con pocos afluentes.

Para las condiciones de sedimentación Bossi y Navarro (1988) interpretan que el transporte de los sedimentos se realizó por corrientes de agua con fuerza y capacidad de transporte equivalentes a los que tuvieron lugar durante el Miembro San Diego, manteniéndose la alta capacidad de selección granulométrica, aunque algunas areniscas son de grano medio, indicando mayor fuerza local de los agentes de transporte. Las condiciones de óxido-

reducción fueron francamente oxidantes, y el pH estuvo encima de 7,8 en la mayor parte del tiempo, por la casi constante presencia de nódulos calcáreos y la frecuencia del cemento calcáreo en las areniscas. Bossi y Navarro (1988) citan a Elizalde et al., los cuales concluyeron que no fue posible establecer las condiciones de salinidad de las aguas y que la profundidad no debió sobrepasar los 10 metros. El incremento paulatino de la velocidad de las corrientes, que primero permiten el establecimiento de las areniscas finas sobre las limolitas, y luego aparecer cierto porcentaje de areniscas medias, puede responder a un incremento en las diferencias topográficas entre el área de suministro y la cuenca. También pudieron ocurrir cambios climáticos hacia condiciones más rigurosas con concentración de precipitaciones en determinada época del año (Bossi y Navarro, 1988).

Bossi (1966) da como ejemplo de trabajo de semiprecisión realizado en conjunto con H. Goso en 1963, sobre la cuenca del Arroyo Cuñapirú (Departamento de Rivera). Para este trabajo las descripciones realizadas por los autores se atribuyen a la parte superior de la Formación Yaguarí, sin diferenciarla de la Formación Buena Vista. Según Bossi (1966), el cerro de La Calera, el lugar más alto de la región en estudio, está rodeado de un extenso afloramiento de areniscas, que, hacia la parte superior, se vuelven bastas y conglomerádicas, sucediendo por encima un nivel calcáreo que remata en un conglomerado de borde marino (de clastos de hasta 2 cm). La concentración de calcáreo aparece solo cubierta por los niveles conglomerádicos ya cuando el mar se retiró totalmente, en pleno clima desértico, entonces formándose lagunas costeras donde precipita el carbonato de calcio por evaporación. Como conclusión de este estudio en la zona de la cuenca del Arroyo Cuñapirú, Bossi (1966) expresa que la Formación Yaguarí representa los depósitos marinos de un mar que se va colmatando y rellenando con material terrígeno, que está evolucionando a clima desértico. Desde el punto de vista geológico está integrado por rocas diferentes cuyo relevamiento en detalle debe ser enfocado inmediatamente por su repercusión edafológica.

de Santana et al. (2006a) proponen la subdivisión de la Formación Yaguarí en dos miembros:

- *“El Miembro Inferior está constituido por areniscas finas a medias, micáceas, arcillosas de color gris verdosas, con ripples y climbing ripples; localmente aparecen laminas limolíticas de tonalidades violáceas y abigarradas. Son de composición cuarzosa, aunque pueden ocurrir localmente porcentajes relativamente altos de clastos de composición lítica y feldespática. La integran también, areniscas medias localmente de color blanco con moteados verdes y de estratificación cruzada de bajo ángulo. Las areniscas finas a medias son, grises claras y verdosas, sublíticas y micáceas que presentan estratificación horizontal y cruzada de bajo ángulo, en algunos casos de tendencia tangencial.*

*Asociados a estas litologías aparecen ripples en sucesión de estratos delgados que muestran direcciones de paleocorrientes opuestas y ripples de interferencia con crestas rectilíneas.”*

*- “El Miembro Superior reúne a una sucesión de areniscas finas y pelitas interestratificadas varicolores (verdes, rojas, marrones, naranjas, blanquecinas) con ocasionales lentes o niveles arcillosos rojos y calcáreos blancos al tope. Asociadas a las pelitas y areniscas muy finas se desarrollan estructuras concrecionales esferoidales y nódulos de carbonato de calcio. Rocas calcáreas blanquecinas, laminadas, localmente yesíferas, se presentan dispersas y con un carácter lenticular. Particularmente en la zona de Ataques, La Calera y en las proximidades de Cuñapirú, Vichadero y Moirones, las pelitas rojas con cuerpos arenosos se relacionan con paquetes de calcretes pedogenéticos. A su vez, se reconocen asociados a este miembro niveles de cenizas volcánicas que originan depósitos bentoníticos.”*

En cuanto a las relaciones de contacto, de Santana et al. (2006a) proponen que, con la superior Fm. Buena Vista, son en ocasiones graduales, netas y concordantes. En el sector central de la región Este de la cuenca, en la zona de Zapallar, en la ruta 44 y la ruta 26, y en las proximidades de la localidad de Bañado de Medina, los niveles de arcillitas con bentonitas y las pelitas rojas marrones con ripples aislados de la Fm. Yaguará se contactan con las areniscas medias y niveles conglomerádicos de la base de la Formación Buena Vista.

El Miembro Superior de la Formación Yaguará es dominado por areniscas abigarradas y pelitas (mudstones) con intercalaciones de margas, yeso y niveles de bentonita. Todas estas rocas son depositadas en ambientes lagunares y estuarinos, que fueron dominados por aguas salobres y dulces, con abundantes conchostráceos y bivalvos. La presencia de margas, calizas, algunos niveles de yeso, caliche de paleosuelos en depósitos de llanuras aluviales, pelitas (mudstones) que contienen grandes concreciones de calcáreo, sugieren periodos de desecación que pueden ser relacionados con regímenes de climas semiáridos (Goso, citado por Limarino et al. 2014).

#### 2.5.4.3 Paleontología y edad de la Formación Yaguará

En las sucesiones asignadas a la Fm. Yaguará se han registrado frecuentes troncos fosilizados, de hasta 15 metros de largo y 50 cm de diámetro (Bossi y Navarro, 1988). Se describen Lamelibranquios (Bivalvos) que se ubicaron en posición alta dentro de la formación (Cox, Falconer, Re Verchesi, citados por Bossi y Navarro 1988). Se han encontrado otros niveles de Lamelibranquios en posición estratigráfica más baja, así como un nivel

plantífero y no se han encontrado restos de vertebrados en Uruguay, pero Araujo en 1982 indica la presencia de restos Pareiasaurus en las cercanías de Aceguá, en el estado de Rio Grande del Sur (Bossi y Navarro, 1988).

de Santana et al. (2006a) realizan una síntesis de los fósiles encontrados por diversos investigadores (Cox, Falconer, Herbst, Herbst et al., Zabert, Morton y Herbst, Herbst et al., Gallego et al., Herbst y Gutiérrez, Andreis et al., Díaz Saravia y Herbst, Crisafulli). El registro fósil está integrado por restos de moluscos bivalvos y crustáceos conchostráceos, ostrácodos, asociaciones de impresiones de hojas compuestas por Lycophyta, Sphenopsid, Filicopsida, Glossopteridales y cordaitales (taxas correspondientes a la flora gondwánica de Glossopteris), tallos silicificados de helechos del orden maratales y grandes troncos silicificados de madera picnoxílica (algunas asignadas a Coniferales y Ginkgoales).

La edad de la Fm. Yaguarí es Pérmica superior según Bossi y Navarro (1988), que citan a Ferrando sobre el descubrimiento de restos de Pareiasaurus a 5 Km al Norte de Aceguá en litologías de la cima del Miembro Villa Viñoles, por parte de los geólogos del Programa Paleozoico Superior de América del Sur. Este fósil es un indicador seguro del finí-Permiano (Tatariano / Wuchiapingiano  $259.1 \pm 0.5$  a  $254.14 \pm 0.07$  Ma). Bossi y Navarro (1988) plantean que este es un nuevo ejemplo de que la terminación de una Era (Paleozoico) y comienzo de la siguiente (Mesozoico) en Uruguay no está marcada por ningún fenómeno geológico notorio. Desde el techo del Miembro Villa Viñoles a la base de la siguiente Formación Buena Vista, es tan poco nítida la diferencia, que la Fm. Buena Vista fue ubicada en distinta posición dentro de la secuencia litológica, por los distintos autores que trataron el tema.

Según de Santana et al. (2006a), basándose en nuevas interpretaciones y análisis radiométricos, es posible suponer que la sedimentación de esta unidad haya comenzado a partir del Kunguriense ( $283.5 \pm 0.6$  Ma Pérmico temprano alto o Pérmico medio).

Rocha-Campo et al. (2019) dataron U-Pb en zircones por el método SHRIMP, obtenidos de bentonitas de la Fm. Yaguarí (ubicadas en la cercanía de Bañado de Medina), unidad que, según los autores, es comúnmente correlacionada con la parte superior de la Formación Estrada Nova/Teresina o la parte basal de la Fm. Rio do Rasto de Brasil. Obtuvieron una edad máxima de deposición de  $267.8 \pm 4.6$  Ma.

### 2.5.5. Formación Rio do Rasto

Lavina (1991) indica que las unidades Pérmicas y Mesozoicas de Uruguay son, de modo general, un prolongamiento de las existentes en Rio Grande do Sul. Azevedo et al. (1985) correlacionan a la Formación Yaguarí con la Formación Rio do Rasto de Brasil.

#### 2.5.5.1 Generalidades de la Formación Rio Do Rasto

La Formación Rio do Rasto es revisada y sintetizada por Holz et al. (2010), como una sucesión con una tendencia general de engrosamiento hacia la cima, subdividida en el Miembro Serrinha (base), con 150-250 m de espesor, formado en su mayoría por pelitas (mudstones) y areniscas finas, y por el Miembro Morro Pelado (cima) de 250-300 m de espesor, formado por areniscas finas a medias principalmente (Rohn, citado por Holtz et al., 2010).

El tope de la Formación Rio do Rasto está marcado por una superficie erosiva muy extendida. En Rio Grande do Sul, esta superficie separa a la formación Pirambóia (areniscas eólicas del Pérmico tardío) de la Formación Sanga do Cabral (Triásico temprano). Sin embargo, la relación estratigráfica definitiva de la Fm. Sanga do Cabral y Pirambóia no es todavía clara, para algunos autores la base de estas dos unidades es Pérmica tardía y para otros la Fm. Sanga do Cabral es exclusivamente Triásica y Pirambóia tiene una edad Triásica Media (247.2 Ma), siendo el hiato más grande hacia el Norte en São Paulo (Holz et al., 2010).

La Formación Rio do Rasto representa la porción superior del ciclo transgresivo regresivo Permo-Triásico en la Cuenca Paraná. Durante este periodo, la limitada o ausente conexión marina con el Océano Panthalassa estuvo probablemente relacionada con la orogenia en el margen continental del Gondwana, que llevo a la Formación de un gran cuerpo de agua interior poco profundo, rodeado de masas de tierra continentales cratónicas Precámbricas y terrenos acrecionados Paleozoicos hacia el S-SW (Warren et al., 2008).

La Formación Rio do Rasto se deposita en un gran cuerpo de agua, con imposibilidad de una gran apertura hacia el Océano Panthalassa, debido al ascenso de cordilleras en los márgenes de la placa, provocando el surgimiento de un gran cuerpo de agua confinado, sin talud, de profundidad reducida. La alta tasa de aporte sedimentario a la que estaba sujeto este mar epicontinental, fue responsable por la progradación subsecuente y continentalización definitiva de los sistemas deposicionales involucrados (Warren et al., 2008). La Formación Rio do Rasto es interpretada como un margen plano mareal progradante (Miembro Serrinha) en transición a un ambiente fluvial-deltaico del Miembro Morro Pelado (Schneider et al., citados por Canile et al., 2016).

Una de las características más marcadas del patrón arquitectural de la Fm. Rio do Rasto es la constante intercalación de elementos depositados en diferentes posiciones fisiográficas de la cuenca. La alternancia de unidades formadas en aguas más distales y profundas con elementos proximales a la línea de costa puede ocurrir por diversos factores (Warren et al., 2006). Las ondulaciones provocadas por viento en cuerpos de agua de gran extensión, pueden ser responsables del retrabajo de buena parte de la carga sedimentaria traída por ríos, formando bancos y barras arenosas en las áreas próximas a sus desembocaduras. Ondas de gran porte provocadas por tempestades de invierno o huracanes (Duke, citado por Warren et al., 2008) pueden también retrabajar los sedimentos depositados en las regiones más profundas que fueron transportados por flujos densos de fondo. Las corrientes de retorno pueden ser responsables por el transporte de sedimentos arenosos desde las áreas marginales a las áreas internas y profundas de la cuenca, donde predominan los procesos de deposición por suspensión. El progresivo llenado de la cuenca redujo el área de mar interior e imposibilitó la acción de tempestades como principal agente removilizador de los sedimentos costeros (Martel y Gibling, citados por Warren et al., 2008), de esta manera las porciones proximales y distales de las barras de desembocadura, así como otros depósitos costeros, se preservan (Warren et al., 2008).

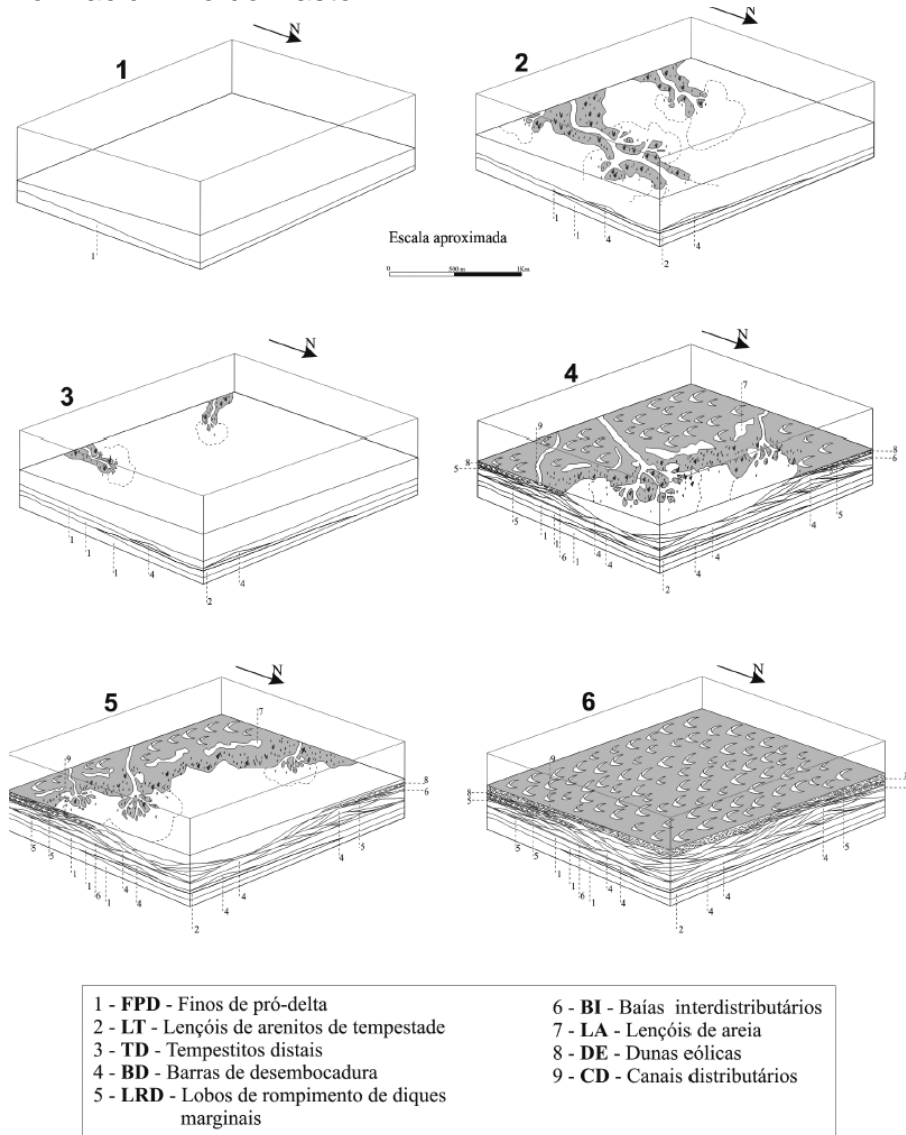
Cuerpos lacustres sin conexiones con el océano se caracterizan por presentar sistemas deposicionales relativamente sensibles a cambios climáticos. Grandes lagos, con piso de bajo gradiente topográfico y considerable variación del nivel del agua, pueden presentar migraciones de línea de costa de centenas de metros o kilómetros (Talbot y Allen, citados por Warren et al., 2008). Esto puede ser amplificado por la fisiografía de la paleocosta y variaciones en el nivel de inclinación del substrato. De este modo, sedimentos depositados bajo agua en condiciones distales pueden localmente quedar expuestos a procesos subaéreos, como pedogénesis y erosión por canales distributarios (Martel y Gibling, citados por Warren et al., 2008). En el caso de la Formación Rio do Rasto, las variaciones en alta frecuencia de línea de costa por condiciones climáticas (transgresiones y regresiones puntuales) explicarían parcialmente la presencia de elementos arquitecturales distales intercalados con depósitos próximos a la línea de costa (Warren et al., 2008).

Cualquier modificación en la razón de aporte sedimentaria y la generación de espacio de acomodamiento en la cuenca puede modificar también el patrón arquitectural e influenciar la intercalación de elementos distales y proximales, así como las oscilaciones de línea de costa. En un contexto fuertemente autocíclico, como en sistemas deltaicos, variables inherentes al sitio deposicional pueden, en menor escala, ser más determinantes que los parámetros regionales influyentes a escala de cuenca.



Resumidos, los factores que controlan la arquitectura y evolución de un delta (Figura 24) pueden ser divididos en cuatro grupos (Morgan, Galloway, Nemeč, citados por Warren et al., 2008): a) características del régimen fluvial; b) procesos actuantes en el cuerpo receptor; c) factores climáticos y d) factores de orden tectónico. De estos parámetros los dos primeros son particularmente localizados y responsables por el carácter autocíclico del sistema deltaico. De esta manera, la dinámica interna responsable por la migración de las provincias fisiográficas del delta y por la determinación de las regiones donde predominan los procesos de erosión y deposición pueden generar, localmente, asociaciones verticales y laterales de facies distintas. La intercalación de elementos arquitecturales de dunas eólicas en la cima de la Fm. Rio do Rasto constituye una fuerte evidencia de modelo autocíclico y de variación del nivel base (Warren et al., 2008).

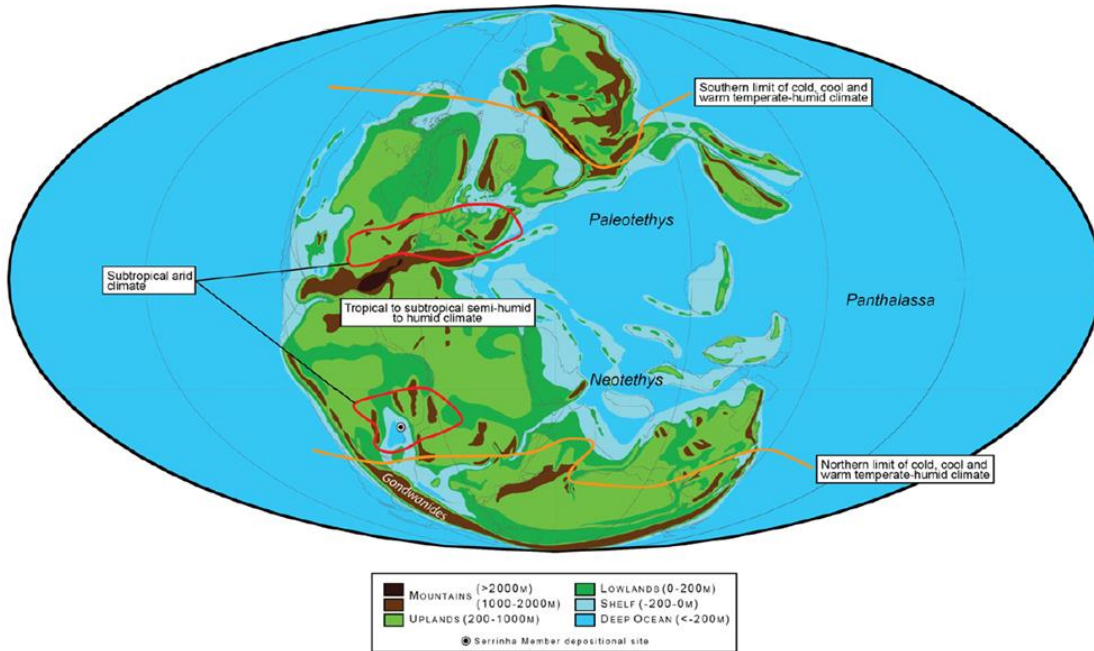
Figura 24. Diagrama de bloques del modelo de evolución sedimentaria de la Formación Río do Rasto



Fuente: tomado de Warren et al. (2008).

La sedimentación desde el Guadalupiano tardío – Lopingiano estuvo dominada por clima árido o semiárido a lo largo de la mayoría de la parte sur de América del Sur (Figura 25), como lo sugieren indicadores litológicos como ser un registro extendido de depósitos eólicos, evaporitas, grandes sucesiones de playas de lago, depósitos eólicos y fluviales interestratificados y ausencia de estratos de carbón (Limarino et al., 2014).

Figura 25. Paleogeografía del Pérmico tardío

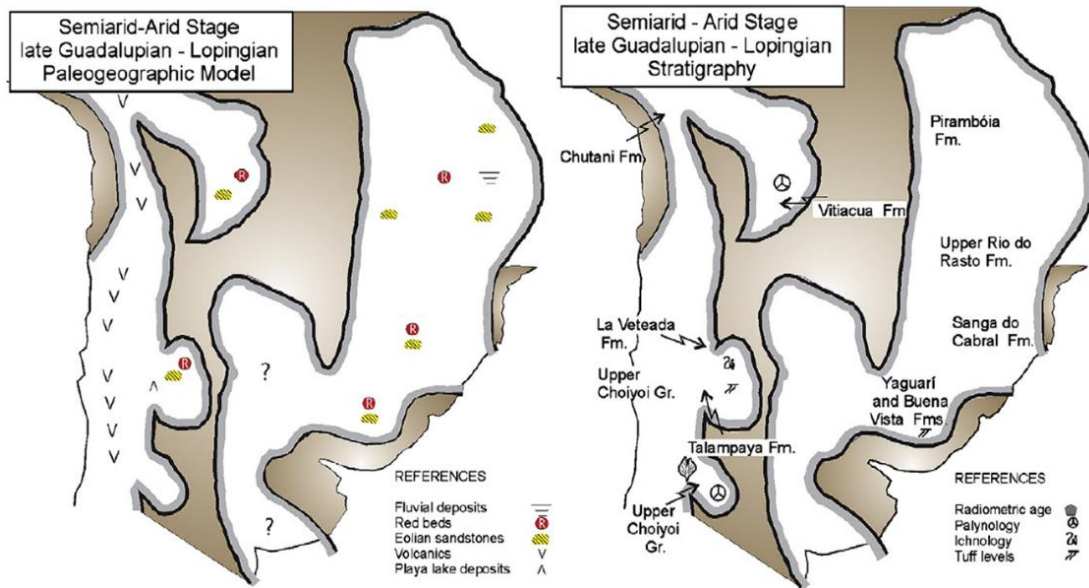


Regiones climáticas y geográficas mayores.

Fuente: tomado de Alessandretti et al. (2015).

El registro estratigráfico de la cuenca del Paraná muestra una progresiva continentalización y aridización desde el Guadalupiano al límite Pérmico – Triásico (Figura 26). La parte superior de la Formación Rio do Rasto, el Miembro Morro Pelado, de edad Lopingiana temprana, es mayoritariamente compuesta por areniscas y algunas pelitas (mudstones) intercaladas, depositadas en ambientes fluviales, lacustres y eólicos (Rohn et al., Lavina, Holz et al., citados por Limarino et al., 2014).

Figura 26. Modelo paleogeográfico, indicadores litológicos, y estratigrafía del periodo semiárido (Guadalupiano tardío-Lopingiano)



Fuente: tomado de Limarino et al. (2014).

### 2.5.5.2 Subdivisiones de la Formación Rio do Rasto

Según Warren et al. (2008) en la porción centro-Sur del estado de Santa Catarina, el Miembro Serrinha presenta espesores ente 90 a 130 m, en su parte inferior está caracterizado por intercalaciones de estratos tabulares de areniscas finas con estratos de limolitas, presentando contacto transicional con la Fm. Teresina, predominantemente pelítica. El pasaje al Miembro Serrinha se da por la ocurrencia gradual de areniscas intercaladas con las limolitas laminadas, en un evidente patrón de engrosamiento de los estratos tabulares hacia la cima. Esta unidad se caracteriza por su carácter agradacional a progradacional, habiendo una tendencia al aumento de areniscas en dirección a la cima. El Miembro Serrinha se conforma por estratos de areniscas con laminación cruzada por migración de marcas onduladas, laminación cruzada tipo hummocky y swalley, que se intercalan con depósitos pelíticos y niveles heterolíticos. Predominan las areniscas y limolitas verdosas y grisáceas. Ocurren también estratos lenticulares que presentan estratificación cruzada tabular y acanalada de pequeño a mediano porte. Son comunes los niveles pelíticos, milimétricos a centimétricos, intensamente bioturbados con estructuras semejantes a grietas de contracción (Warren et al., 2008). Según Canile et al. (2016) el Miembro Serrinha, al Sur de Santa Catarina, posee 90 metros de espesor y está compuesto por areniscas finas bien seleccionadas,

intercaladas con limolitas y pelitas (mudstones) grises, con estratificación cruzada y estructuras flaser, ondulosa y lenticular.

El sistema por el cual se depositó del Miembro Serrinha es interpretado como lagos superficiales principalmente, a veces influenciados por olas de tormenta o por incursiones fluviales que producen flujos hiperpicnales o raramente flujos homopicnales (Rohn, citado por Holz 2010).

El Miembro Morro Pelado muestra una sucesión de litofacies ascendente que se torna a texturas más gruesas, desde pelitas (mudstones) rojas hasta areniscas, que puede interpretarse como un gradual descenso de un cuerpo de agua (como un área de inundación o un lago), causado por la evaporación y/o relleno sedimentario. Las areniscas en la parte superior son a veces depósitos eólicos, indicando que el cuerpo de agua se ha secado. Estas sucesiones representan intervalos regresivos de secuencias de orden relativamente alto (por ejemplo, más altas que tercer orden  $<0.5$  Ma). Los depósitos de dunas eólicas pudieron ser depositadas durante lapsos de tiempo de poco espacio de alojamiento, pero el hecho de que hayan sido preservadas indican que, después de la acumulación, el nivel relativo freático ha aumentado nuevamente. Estas sucesiones fueron probablemente controladas principalmente por el clima (Holz et al., 2010).

Según Canile et al. (2016) el Miembro Morro Pelado al Sur de Santa Catarina, está compuesto por 30 m de espesor de areniscas rojas, con limolitas intercaladas y pelitas (mudstones) con estratificación cruzada. Según Warren et al. (2008) en la porción centro-Sur del estado de Santa Catarina, el Miembro Morro Pelado, de espesor variable entre 80 a 150 m, presenta contacto transicional con el Miembro Serrinha. Predominan areniscas y limolitas amarillo crema, púrpura y rojizas con geometría lenticular y lobados, de espesores métricos a decimétricos. Las areniscas se intercalan lateralmente de forma interdigitada con cuerpos tabulares de limolitas y lutitas rojas. Depósitos de canales distributarios suceden en las porciones superiores de la unidad y son caracterizados por cuerpos de geometría lenticular de base erosiva. Intercalados a estos ocurren depósitos de dunas eólicas y lentes de arena. En el Miembro Morro Pelado, están ausentes elementos arquitecturales distales, siendo abundantes los sedimentos deltaicos (Warren et al., 2008).

En la parte más superior del Miembro Morro Pelado, en la región del arco de Ponta Grossa, grandes intraclastos y algunos aparentes niveles erosivos, incluyendo relaciones angulares entre los estratos, indican probablemente otro límite importante, marcado como un límite menor de secuencia (Holz et al., 2010).

El sistema por el cual se depositó el Miembro Morro Pelado, según Holz et al. (2010) tiene muchas interpretaciones distintas, variando de meandros

fluviales a ambientes mixtos lacustres, deltaicos y eólicos. Holz et al. (2010) mencionan que, recientemente, una nueva interpretación se ha propuesto por parte de Rohn et al. (2005), en la cual el Miembro Morro Pelado puede haber sido depositado en condiciones de abanicos aluviales muy distales coexistentes con extensas planicies fluviales, incluyendo la deposición de depósitos crevasse splay, inunditas y ocasionales canales fluviales poco profundos.

### 2.5.5.3 Paleontología y edad de la Formación Rio do Rasto

Los conchostráceos son los fósiles más abundantes de la Formación Rio do Rasto y sugieren condiciones de agua dulce en el ambiente de deposición (Holz et al., 2010). Algunos géneros son coherentes con la edad Pérmica media a tardía de la Formación, pero *Hemicycloleia mitchelli*, encontrado solo en tres localidades en la parte más alta de la Formación, es particularmente importante para correlaciones y sugiere una edad Wuchiapingense de  $259.1 \pm 0.5$  a  $254.14 \pm 0.7$  Ma (Ferreira-Oliveira y Rohn, citados por Holz et al., 2010). Muchos depósitos de la Formación Rio do Rasto muestran bioturbaciones, principalmente icnofacies de Cruziana (Holz et al., 2010). La ocurrencia de fósiles, con disminución de diversidad, se vuelve gradualmente más rara a medida que se sube al tope de la Formación. Los bivalvos están en las rocas carbonatadas y las coquinas están recristalizadas o silicificadas en el Norte del Arco de Ponta Grossa, mientras que en otras regiones y en otros intervalos estratigráficos, están preservadas como moldes (Holz et al., 2010).

En el estado de Paraná y en el Norte de Santa Catarina, el Miembro Serrinha muestra un notable incremento en ocurrencias de fósiles de megaplantas y los ensamblajes son dominados por varias especies de glossopteris, algunos pecopteris, raras hojas de helecho fértil y abundantes tallos esfenófitos, todo preservado como impresiones o moldes. Las muestras de *Sphenophyllum* no son muy abundantes (Rohn y Rösler, citados por Holz et al., 2010). En la porción de transición del Miembro Serrinha al Morro Pelado, *Sphenophyllum* da lugar a otra importante Sphenofita - *Schizoneura gondwanensis* – que define la segunda zona de megaplantas (Rohn y Rösler, citados por Holz et al., 2010).

El tope de la Formación Rio do Rasto está marcada por una superficie erosiva muy extendida y no se conoce claramente la relación estratigráfica con las Formaciones suprayacente. La inconformidad que separa en el techo a la Fm. Rio do Rasto encierra un hiato variable, ya que en Rio Grande do Sul, la Formación Rio do Rasto tiene una edad Guadalupiana ( $272.95 \pm 0.11$  a  $259.1 \pm 0.5$  Ma) basándose en la fauna tetrapoda, mientras que, en el Norte, en

Santa Catarina, la edad de la Fm. Rio do Rasto es Lopingiana temprana de  $259.1 \pm 0.5$  Ma (Holz et al., 2010).

Dataciones de zircones obtenidos en cenizas volcánicas por medio de SHRIMP en el Miembro Serrinha, brindaron edades de  $275.1 \pm 5.4$  Ma (Rocha-Campos et al., citados por Canile et al., 2016).

Rocha-Campo et al. (2019) dataron U-Pb en zircones por el método SHRIMP obtenidos de un nivel de cenizas volcánicas del Miembro Serrinha, en el estado de Santa Catarina, obteniendo edades de deposición  $<274.1 \pm 5.0$  Ma. Los investigadores realizaron también dataciones para muestras de bentonitas correspondientes al Miembro Morro Pelado, ubicadas a 3 Km al Norte de la ciudad de Aceguá, obteniendo una edad máxima de deposición de  $257.5 \pm 6.9$  Ma.

## 2.5.6 Formación Buena Vista

### 2.5.6.1 Generalidades de la Formación Buena Vista

La Fm. Buena Vista definida por Ferrando et al. (1982), Bossi y Navarro (1988), Ferrando y Andreis (1989) se corresponde con la capa Superior del Miembro Superior y parte de la capa Media de la Formación Yaguarí propuesta por Elizalde et al. (1970) al contener conglomerados intraformacionales con las mismas características que las mencionadas para la Fm. Buena Vista.

Goso et al. (2001) realizan una descripción detallada de esta formación en el Norte y Noreste de la ciudad de Melo, brindando información litológica, de facies, paleontológico y ambiental. de Santana et al. (2006a) sintetizan la información de Goso et al. (2001) y de otros trabajos, proponiendo la división de la Fm. Buena Vista en dos Miembros (Colonia Orozco y Cerro Conventos).

De la definición de Bossi (1966) para la Formación Yaguarí, se puede considerar que, de la parte superior de esta formación, es atribuible a la Fm. Buena Vista las areniscas gruesas de estratificación cruzada, sobre las que se apoyan niveles conglomerádicos de cantos rodados (extraclastos), cuyo diámetro alcanza 5 ms (¿cm?). Bossi (1966) indica que Elizalde concluyó que estos cantos rodados, por su morfología, pertenecen a borde marino, al mostrar la típica forma de abrasión que ejerce el movimiento de vaivén de las olas (Figura 27). Según Bossi (1966) estos niveles no siempre están en sitio al ser probable que la circulación de aguas superficiales haya lavado la arena fina y arcilla del cemento y los cantos mayores se fueron acomodando a la nueva condición de equilibrio al faltar el material cementante. En todos los casos, debajo del conglomerado existen areniscas bastas de

estratificación cruzada. Tanto los niveles de cantos rodados, cuya forma fue impresa por acción de las olas en el borde de mar, como los niveles de areniscas bastas, señalan con certeza que los depósitos se produjeron en borde marino. *“Estas observaciones en el departamento de Cerro Largo son aisladas y no permiten en consecuencia todavía extraer conclusiones definitivas, siendo de inmediato proceder al exacto relevamiento de los niveles conglomerádicos ya que ocupan una extensión considerable”* (Bossi, 1966).

Figura 27. Morfología de los clastos en el nivel inferior de la cantera de arroyo Zapallar

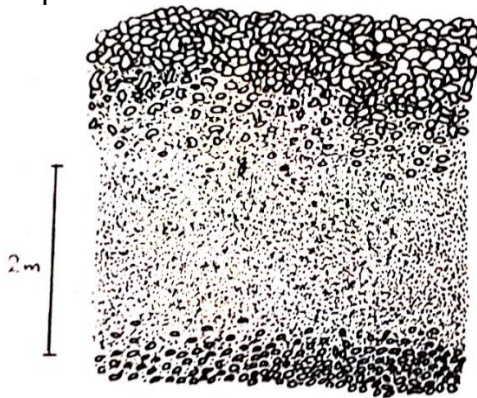


Figura 11.21

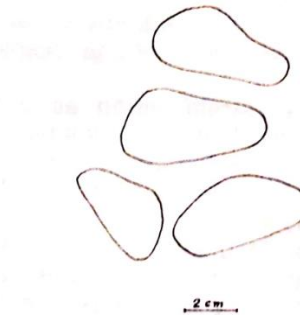


Figura 11.22

Fuente: tomado de Bossi y Navarro (1988).

La capa Media del Miembro Superior definido por Elizalde et al. (1970) es caracterizada por la predominancia de areniscas finas (existiendo muy finas y medias frecuentes) bien seleccionadas, subangulosas o subredondeadas, micáceas en su mayoría, predominantemente arcósicas, de cemento arcilloso y en la mayoría de los casos son de estratificación paralela llegando a ser en algunos casos lajasas. El color es muy característico, siendo ampliamente el color rojo el que domina. Los abigarramientos son escasos, se expresan como intercalaciones de niveles de color gris verdoso muy claro de manera discordante como concordante con la estructura. Las limolitas se desarrollan interestratificadas con las areniscas, son bien seleccionadas, micáceas, de cemento arcillosos y estratificación paralela. El color en este caso también es predominantemente rojo. Es muy característico en la capa Media la ocurrencia de diastemas en los que han ocurrido eventos de erosión que han desintegrado a los estratos de limolitas y redistribuido sus trozos fracturados y redondeados para formar conglomerados intraformacionales. Para la capa Superior Elizalde et al. (1970), indican que se encuentran limolitas siempre de colores oxidantes o abigarrados, siendo el color rojo el dominante, y conglomerados que son siempre de carácter intraformacionales con cantos de limolitas como las anteriores. Los intraconglomerados son de matriz de areniscas finas o medias y



calcárea, los cantos son de limolitas comúnmente redondeados, a veces angulosos. Además, la capa Superior descrita por Elizalde et al. (1970) incluyen areniscas conglomerádicas muy poco frecuentes, de partículas angulosas, arcósicas, a veces con mica en la matriz, de cementación parcialmente silíceas, de estructura masiva y de color amarillento rojizo. También para este miembro los autores incluyen calizas con forma de lechos delgados, finas, homogéneas, masivas y de colores variables entre grises claros y rosados. Las lutitas se presentan como variaciones locales de las limolitas y tienen similares características.

El Miembro Superior desarrolla una fisiografía característica, sus lomadas son bastante pronunciadas, de laderas convexas y cumbres redondeadas, con formas alargadas que adquieren un aspecto lobular con gran disección que las afecta (Elizalde et al., 1970).

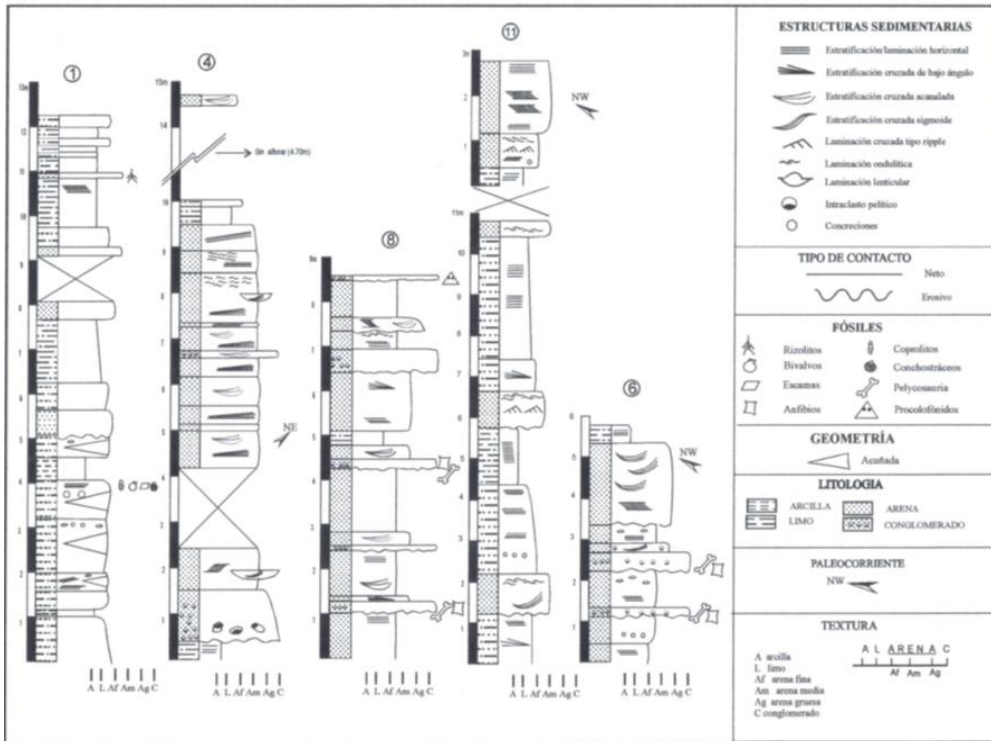
La Formación Buena Vista, según Bossi y Navarro (1988) está integrada por areniscas finas, medias, gruesas y conglomerádicas, siempre de color rojo y feldespáticas con estratificación cruzada evidente y dominante, siendo las de grano grueso más frecuentes que las finas. Con las areniscas se interestratifican lentes calcáreas y niveles de conglomerados. Las lutitas y las rocas limosas resultan inexistentes o escasas. Los conglomerados (de extraclastos) forman lentes de hasta 1 m de potencia, compuestos por 60 a 80% de clastos bien rodados en una matriz arenosa. Son pocos los lugares donde se encuentran en sitio los conglomerados, se pueden citar: una cantera de vialidad en la ruta Melo – Vichadero a orillas del arroyo Zapallar, un desmonte carretero en la ruta Melo – Bañado de Medina, la zona del cerro La Calera. Asociadas a los niveles conglomerádicos aparecen calizas, solamente en los alrededores de la localidad de La Calera. Son calizas blancas, microcristalinas de desarrollo en capa continua de 50 cm a 80 cm de potencia. Determinaciones preliminares indican un contenido de hasta 4% de carbonato de magnesio en estas calizas, lo que indicaría un ambiente marino de formación (Bossi y Navarro, 1988).

Bossi y Navarro (1988) citan a Ferrando et al. (1987) dado que estos autores proponen las principales características de esta formación. Los autores proponen que esta formación está integrada por areniscas finas, hasta muy gruesas y menores cantidades de pelitas, conglomerados finos clasto sostén y conglomerados intraformacionales. El conjunto de litologías exhibe una llamativa homogeneidad cromática en tonos rojizos (10R4/6), con ocasionales estratos delgados color blanco amarillento (5Y8/2) probablemente productos de la decoloración. La estratificación es definida, con neto predominio de estratos lenticulares de base irregular erosiva con frecuentes intraclastos pelíticos, exhibiendo abundantes estructuras entrecruzadas en artesa agrupadas de porte medio. La estratificación tabular es menos frecuente, siendo de porte pequeño a

medio y pudiendo ser macizas o de lineación por partición. Los estratos pelíticos son lenticulares y macizos. En la base de la formación se reporta un lente de arenisca de más de 3 m de espesor, con estructura entrecruzada planar bastante deformada, que ha sido interpretado como un depósito de duna formado en las cercanías de un cuerpo de agua muy somero, que reflejaría aun las condiciones ambientales de la Formación Yaguarí (Azevedo, citado por Ferrando y Andreis 1989). Dado que la Fm. Buena Vista ha sido segregada de la Fm. Yaguarí, se asume que los minerales arcillosos son esmectitas como dominantes (Ferrando y Andreis, 1989).

Goso et al. (2001) para el Norte y Noreste de la ciudad de Melo definen que la Formación Buena Vista está integrada desde la base al tope por areniscas muy finas a medias y escasamente gruesas, con poca matriz pelítica, de estratificación y laminación fina paralela, tipo ripple, en artesa y cruzada planar, de color rojo y con cemento carbonatico, entre las que se intercalan algunos niveles centimétricos de intraconglomerados fosilíferos con clastos de arcilla angulosos, rojos, y niveles arcillosos rojos, masivos a débilmente laminados. En las areniscas se observan estratos con disyunciones esferoidales de aspecto concrecional. Suceden a estos paquetes, litologías predominantemente arcillosas de espesor métrico, masivas a laminadas, de color rojo, entre las que se intercalan lóbulos arenosos de granulometría fina y media hasta gruesa, con cemento carbonatico, estratificación cruzada, laminación cruzada tipo ripple, decoloraciones gris-blancuzca y con espesor decimétrico. Por encima se observan areniscas finas, de buena selección, con clastos redondeados, estratificación cruzada de alto ángulo y laminación gradada inversa en los sets (Figura 28).

Figura 28. Perfiles de las Formaciones Yaguarí y Buena Vista



El perfil 1 corresponde a la Formación Yaguarí. Los perfiles 4, 8, 11, 6 corresponden a la Formación Buena Vista.

Fuente: tomado de Goso et al. (2011).

Las asociaciones de facies del tope de la Fm. Yaguarí según Goso et al. (2001) están representadas por intercalaciones decimétricas de areniscas finas y pelitas de tonalidades abigarradas con contenido de fósiles (conchostráceos y bivalvos), laminación plano paralela y geometrías débilmente acuñadas a tabulares, con delgados paleosuelos (presencia de rizolitos) que indican intermitencias temporarias en la sedimentación. Estas facies del tope de la Fm. Yaguarí son inmediatamente cubiertas por cuerpos decimétricos a métricos de areniscas medias a finas, rojas, con estructuras que denotan cambio en el régimen de flujo (estratificación cruzada de bajo ángulo, entrecruzada con dirección de paleocorriente NE y NW, en artesa, plano paralelo, sigmoidal, con estructuras tipo “dish”). Entre ellas se intercalan varios niveles centimétricos de intraconglomerados, con base neta y erosiva, con clastos pelíticos de diversos tamaños y restos fósiles de hábitos terrestres. Alternan también eventuales niveles centimétricos de pelitas rojas masivas a laminadas. Estos conjuntos se relacionan a ambientes fluviales. A las anteriores litologías, de forma verticalmente y/o lateralmente, se asocian facies predominantemente pelíticas arcillosas masivas a laminadas, tabulares, de

espesor métrico, con algunas concreciones, correspondientes a cuerpos acuosos de tipo lacustre. Se intercalan también niveles arenosos finos a gruesos, formando lóbulos que presentan laminación cruzada tipo “climbing ripples” (dirección N330), estratificación cruzada de bajo ángulo y ondulítica, representando eventos progradacionales fluviales sobre los ambientales lacustres. Vinculadas lateralmente a estas facies, aparecen areniscas finas, de geometrías cuneiformes, de composición cuarzosa, redondeadas, con estratificación cruzada de gran porte, de relativamente alto ángulo y con laminación gradada inversa en los sets. Asociados a éstas, se desarrollan estratos centimétricos con estructuras generadas por grain flow (sets en cara de avalancha). Por encima de estos depósitos, se evidencian procesos edáficos incipientes como probables calcretes pedogénicos. Goso et al. (2001) indican que, las relaciones de contacto entre la Fm. Yaguarí y la Fm. Buena Vista son netas y localmente de carácter erosivo. También proponen como límite preciso y operacional entre estas formaciones a las litologías pelíticas varicolores que representan las planicies deltaicas, fluviales, lacunares y de bahías del tope de la Fm. Yaguarí, y los sedimentos predominantemente arenosos, rojos, tractivos de carácter fluvial tipo braided con areniscas conglomerádicas de la parte basal de la Fm. Buena Vista.

de Santana et al. (2006a) proponen que la Formación Buena Vista está constituida por areniscas finas medias, localmente gruesas a muy gruesas, con niveles de ortopsefitas y areniscas conglomerádicas de variada característica y composición. Las areniscas son de poca matriz pelítica y abundante cemento carbonático. Los granos de la fracción arenosa son de texturas que marcan diferentes grados de madurez. Las tonalidades primarias son rojizas, ocurriendo rosados y blanquecinos muchas veces vinculados a procesos de decoloración. Asociados a las areniscas se desarrollan potentes paquetes pelíticos rojos masivos débilmente laminados con estructuras de deformación. Los términos gruesos están representados por niveles centimétricos a decimétricos de conglomerados con clastos de hasta 10 cm de diámetro.

Según Ernesto et al. (2019) los conglomerados intraformacionales de la Fm. Buena Vista son canales residuales ricos en intraclastos de lodo, formados por la erosión y retrabajo de llanuras de inundación fluviales en una transición regresiva de marea-fluvial a la implantación de condiciones continentales. Al menos se identifica cinco niveles penecontemporáneos intercalados en las areniscas rojas. Los clastos de arcilla son usualmente grandes en la parte más basal y más o menos tabulares en forma, volviéndose clastos angulosos y pequeños hacia la cima.

Según Bossi y Navarro (1988) el Permo-Triásico se caracteriza en el continente de Gondwana por abundancia de mares epicontinentales temporarios, además se encontraron en África del Sur vastas planicies aluviales

frecuentemente pantanosas y periódicamente secas, diseminadas de lagos permanentes con temperaturas moderadas. El fin del Pérmico no tuvo temperaturas muy elevadas y el agua faltaba en todos los continentes de la época, instalándose lentamente una sequía que provoca rubefacción de los sedimentos. Para Bossi y Navarro (1988) el modelo más razonable, considerando lo propuesto por Bossi (1966) respecto a que las areniscas con calizas y conglomerados de borde marino en aguas poco profundas y oxidantes para la cúspide de la Formación Yaguarí, es que la sedimentación de la Formación Buena Vista ocurrió en un ambiente litoral en clima árido a semiárido de alta temperatura media anual donde la capacidad del agente de transporte creció y aumento bruscamente respecto a la Fm. Yaguarí. También Bossi y Navarro (1988) suponen un ambiente de gradual aridez, ya que finalmente las unidades suprayacentes del grupo Batoví Dorado son areniscas eólicas en desierto continental. Las paleocorrientes, si bien exhiben cierta dispersión, son tendentes hacia el Norte ( $330^{\circ}$  a  $30^{\circ}$ ), siendo coherentes con lo reportado en la unidad correlacionable en Rio Grande do Sul (Fm. Sanga do Cabral), que indican una dirección al Noreste (Andreis, citado por Bossi y Navarro 1988). Las paleocorrientes hacia N-NE en la fase regresiva de la evolución de la cuenca, indican que la Fm. Buena Vista estaría marcando un cambio en la pendiente regional, que hasta la subyacente Fm. Yaguarí era hacia el Oeste (Bossi y Navarro, 1988). Fallas N20E por donde corren el A° Yaguarí y el A° Caraguatá (Sprechmann et al., citados por Bossi y Navarro 1988) o la reactivación de las mismas podrían estar explicando el cambio en la pendiente regional (Bossi y Navarro, 1988).

Dada la alta proporción de areniscas, la presencia de conglomerados intraformacionales, y la sucesión vertical de estructuras primarias, Ferrando y Andreis (1989) proponen que se trata de un sistema fluvial entrelazado medio – distal donde, periódicamente, el régimen de flujo debió haber cambiado de inferior a superior dada la aparición saltuaria de lineación por partición.

Goso et al. (2011) interpretan un cambio en las condiciones de sedimentación del tope de la Fm. Yaguarí, donde reconocen un ambiente de planicies subacuáticas y subáreas relacionadas a bahías con cuerpos de aguas salobres a dulces, que cambian a condiciones fluviales de ríos relativamente poco caudalosos y de tipo braided correspondientes a la Fm. Buena Vista.

#### 2.5.6.2 Subdivisiones de la Formación Buena Vista

La Formación Buena Vista se divide en dos miembros: Colonia Orozco y Cerro Conventos (de Santana, citado por de Santana et al. 2006a).

El Miembro Colonia Orozco ocurre en el centro-Sur y Sudeste de la cuenca, con las mejores exposiciones en la región homónima al Norte y Noreste de la ciudad de Melo, y a lo largo de la Cuchilla Grande. También se reconocen litologías asimilables en los alrededores de la localidad de San Jorge, departamento de Durazno, apoyándose en discordancia sobre la Fm. San Gregorio y por debajo de los basaltos de la Fm. Arapey. de Santana et al. (2006b) indican que este miembro fue estudiado en detalle por Goso et al. (2001), definiéndose este miembro como integrado por una sucesión de areniscas finas a medias, localmente gruesas, con poca matriz pelítica, con estratificación cruzada en artesas y con laminación paralela a ondulada. Los colores dominantes son rojos. Se describen niveles fosilíferos de intraconglomerados (Piñeiro y Ubilla, citados por de Santana et al., 2006b). Estos niveles fosilíferos poseen clastos de arcilla roja, pelitas y limo arcillitas masivas o con laminación mal definida. Asociados a estos niveles finos, se intercalan cuerpos arenosos blanquecinos con estratificación cruzada, laminación tipo ripple y estratificación gradada inversa. Las estructuras sedimentarias predominantes de este miembro son estratificación cruzada planar, tangencial y en artesas, con estratos de pequeño a mediano porte y con ángulos bajos. Se desarrollan formas canalizadas con estratificación gradada, lineación parting y laminación fina paralela y micro estratificación cruzada por migración de ripples de corriente. Las arcillitas y pelitas arenosas rojas son masivas o con laminación plano paralela, a veces mal definida, con figuras de deformación de tipo calcos de carga. Asociadas, se localizan concreciones carbonáticas de forma elipsoidal y septarias de varios tamaños, alcanzando los 20 cm de diámetro. En la base del Miembro Colonia Orozco, los paquetes arenosos presentan en el tope ripples simétricos, con laminación ondulada interna que permite relacionarlos con el retrabajo por la acción de olas. Asociados también se encuentran 3 a 4 niveles de intraconglomerados con intraclastos pelíticos rojos muy redondeados y bioclastos compuestos predominantemente de huesos de reptiles y anfibios. Este miembro también presenta niveles de ortoconglomerados, clasto sostén, de composición oligomítica, que pueden observarse en las proximidades del arroyo Zapallar en la ruta 26, próximos a bañado de Medina y en las proximidades de Molles (de Santana et al., 2006a).

El Miembro Cerro Conventos tiene como sección tipo el cerro homónimo, ubicado al Noreste de la ciudad de Melo. En este cerro ocurre una potente sucesión de areniscas (más de 40 m) predominantemente cuarzosas, de muy buena selección, con estratificaciones horizontales y cruzadas de alto ángulo y gran porte, interpretados como depósitos eólicos duneiformes y de sabana de arena, que integran el tope de la Formación Buena Vista. En los alrededores del cerro Conventos se observan las relaciones de contacto concordantes con interdigitaciones de esta sucesión eólica con las areniscas y

pelitas rojas y rojizas que integran a la Fm. Buena vista. Otro afloramiento del Miembro Cerro Conventos se ubica al Noreste de la ciudad de Melo, en el Cerro Pesiguero, donde las areniscas blancas y maduras con estratificación cruzada de gran porte se poyan concordantemente sobre las areniscas arcillosas rojas del Miembro Colonia Orozco (de Santana et al., 2006a).

Ferrando y Andreis (1989) consideraron a las areniscas eólicas del cerro Conventos y el cerro Piedras Blancas (Cerro Pesiguero en de Santana et al., 2006a) dentro de la Formación Cuchilla de Ombú. Se integra por areniscas finas hasta medias y raramente limolitas de tonalidades amarillentas (5YR7/2). Las areniscas presentan buena selección y exhiben un notable predominio de estructuras entrecruzadas de tipo cuneiforme planar de porte grande, ya que los sets llegan a medir 8 m de potencia. Los depósitos se han generado por la migración de dunas de tipo barján, con estructuras direccionales que muestran que los vientos soplaron constantemente desde el NW (paleocorrientes promedio 150°). Dada la carencia de fósiles en estos depósitos eólicos, su posición estratigráfica es incierta, sospechándose una edad Triásica media a superior (Ferrando y Andreis, 1989).

Las relaciones de contacto del Miembro Colonia Orozco son graduales limitando con las limolitas y areniscas varicolores del tope de la Fm. Yaguarí en el sector oriental de la cuenca. En los sectores central y Sur de la cuenca y en el este del lineamiento Tacuarembó, los conglomerados polimícticos y areniscas con estratificación cruzada de gran porte presentan contactos discordantes con los términos diamictíticos de la Formación San Gregorio (de Santana et al., 2006a).

#### 2.5.6.3 Limite Permo-Triásico

Comprender las unidades litoestratigráficas y procesos geológicos y bióticos cercanos al límite del Periodo Pérmico – Triásico (LPT) es crucial para entender la recuperación biótica que siguió a la más grande crisis biológica en la historia de la Tierra, el evento de extinción al final de Pérmico (Dais-da-Silva et al., 2017).

Esta extinción en masa eliminó el 96% de las especies marinas (Hoffman, Erwin, citados por Ernesto et al. 2019) y posiblemente el 50% de los vertebrados terrestres (Raup, citado por Ernesto et al., 2019) aunque recientes estudios han minimizado los efectos de la extinción en el ambiente continental dada la alta tasa de supervivencia mostrada por taxones como procolophonoides (Modesto et al., citados por Ernesto et al., 2019), therapsidos (Huttenlocker et al., citados por Ernesto et al. 2019) y por plantas (Nowak et al., citados por Ernesto et al., 2019). Durante el intervalo Pérmico-Triásico la Tierra

experimentó un largo periodo de superanoxia (Isozaki, citado por Ernesto et al., 2019). En América del Sur, tres eventos catastróficos mayores son remarcables: 1- el magmatismo Choiyoi, que estuvo activo desde el Artinskiano al límite LPT (Rocha-Campos et al., citados por Ernesto et al., 2019); 2- el magmatismo del Atlántico Central (~201 Ma) relacionados a los estadios finales de ruptura de Pangea (Davies et al., Spalletti y Limarino, citados por Ernesto et al., 2019); 3- al menos un gran evento de impacto (el Cráter Araguainha) ocurrido hace ~255 Ma, cerca del límite Permo-Triásico. Al final del Pérmico, el campo magnético de la Tierra comenzó un nuevo periodo de reversiones de polaridad de alta frecuencia, conocido como el intervalo de polaridad mixta ILLWARRA, hace aproximadamente 267 Ma (Hounslow y Balabanov, citados por Ernesto et al., 2019).

La Cordillera de los Andes fue sujeta a un volcanismo extenso durante el Pérmico tardío, edades correspondientes al Lopingiano o el Guadalupiano tardío se obtuvieron de la sección superior del grupo Choiyoi (Llambías et al., Kleiman y Japas, Rocha-Campos et al., Barrionuevo et al., Hervé et al., citados por Gulbranson et al., 2015). Dataciones en cristales de zircón de la secuencia volcano-sedimentaria Choiyoi, ubican a este magmatismo en el lapso de  $281 \pm 2.5$  Ma (Artinskiano) a  $251.9 \pm 2$  Ma cerca del límite Permo – Triásico (Rocha-Campos et al., citados por Ernesto et al., 2019). Este extendido vulcanismo se solapa con los eventos megavolcánicos de los traps Siberianos y la Provincia Ígnea Emeishan, siendo propuestos frecuentemente estos eventos volcánicos para explicar el efecto invernadero que llevo a la acidificación (Gulbranson et al., 2015).

Al contrario que lo que sucede en África, en América del Sur no se encuentra el registro estratigráfico del LPT dentro de la Cuenca Paraná (Ernesto et al., 2019). Un marcador cronoestratigráfico propuesto para el límite entre el Paleozoico y el Mesozoico en la Cuenca Paraná es el estrato relacionado al impacto del Araguainha y a al estrato de derrubios llamado Porangaba, un depósito de tsunamis por impacto (Tohver et al., citados por Ernesto et al., 2019). Además, se describen sismitas (deformación de sedimentos blandos, característica relacionada a la actividad sísmica) cubiertas por el estrato Porangaba. Dataciones en granos de zircones detríticos del estrato Porangaba, indican un máximo de deposición de  $253.3 \pm 3.0$  Ma (Tohver et al., citados por Ernesto et al., 2019). En Uruguay no hay niveles de derrubios del estrato Porangaba, pero grandes bloques que poseen una estructura brechada, con clastos angulosos y relativamente pequeños existen en muchas exposiciones de los depósitos de Yaguarí-Buena Vista, así como estructuras interpretadas como sismitas (Ernesto et al., 2019).



#### 2.5.6.4 Paleontología y edad de la Formación Buena Vista

La ubicación estratigráfica de la Formación Buena Vista se realiza en base a datos de la unidad correlacionable en Brasil, la Formación Sanga do Cabral, la cual se ubica en el Triásico inferior en base a numerosos restos fósiles encontrados (Barbarena et al., Andreis y Ferrando, Ferrando y Andreis, Lavina, Azevedo, citados por Bossi y Navarro 1988).

El registro fósil en Uruguay de esta unidad ha crecido, indicando una paleofauna de tetrápodos continentales en el Nordeste del país. Esta paleofauna incluye restos de reptiles “pelicosauiros”, procolofonoideos y anfibios temnospóndilos, probablemente vinculados con los Rhinesuchidae (Marsicano et al., Goso et al., Piñeiro et al., Piñeiro y Ubilla, Piñeiro et al., y Piñeiro et al., citados por de Santana et al., 2006a).

Los fósiles hallados sugieren una edad Pérmica tardía, pero es remarcable que estas paleofaunas presentan características transicionales entre aquellas del Pérmico y Triásico, por lo que se contempla la posibilidad de que la unidad haya terminado su deposición a inicios del Triásico (Piñeiro, Piñeiro y Ubilla, citados por de Santa Ana et al., 2006). Dataciones radiométricas arrojan edades más antiguas para las unidades infrayacentes, parece poco probable la finalización de su deposición a inicio del Triásico, por lo que se adopta una edad Pérmico tardío para la Formación Buena Vista (de Santana et al., 2006a).

La edad de la Fm. Buena Vista esta pobremente limitada, “*dada la ausencia de taxones índices y la presencia de ensamblajes de taxones que son documentados tanto para el Pérmico tardío como para el Triásico temprano en otros lugares*” (Piñeiro et al., citados por Ernesto et al., 2019). Los conglomerados de la Fm. Buena Vista son ricos en fósiles, recuperándose una comunidad faunística continental considerada como transicional entre el Pérmico y el Triásico (Piñeiro et al., citados por Ernesto et al., 2019), sin embargo, para algunos autores, tanto la Fm. Buena Vista como la Fm. Sanga do Cabral son solamente Triásicas en edad, dada la abrumadora presencia de restos de *Procolophon* en casi todos los niveles portadores de fósiles en la Fm. Sanga do Cabral (Dias-da-Silva et al., citados por Ernesto et al., 2019).

Ernesto et al. (2019), en base a los registros fósiles, tanto de Uruguay como de Brasil, plantean un posible diacronismo temporal entre las Fm. Buena Vista y Sanga do Cabral, lo cual puede estar relacionado al hecho de que el cambio es transicional, en vez de un cambio marcado y abrupto, en la sedimentación de las Formaciones Yaguarí y Buena Vista. Estos autores calculan el polo paleomagnético para la Formación Yaguarí – Buena Vista, basándose en polarizaciones magnéticas normales y reversas, siendo comparable a los polos para el magmatismo riolítico Choiyoi (Chile y Argentina),

así como con otros polos Permo-Triásicos de América del Sur, ubicando estas unidades como post-Kiamanas. El evento Illawara registra las primeras alternancias en polaridad, que iniciaron hace  $265.8 \pm 0.7$  Ma (Bowring et al., Wardlaw et al., citados por Ernesto et al., 2019) o incluso más jóvenes, en  $266.66 \pm 0.76$  Ma (Hounslow y Balabanov, citados por Ernesto et al., 2019). El polo paleomagnético para Yaguarí – Buena Vista no es un polo de referencia, pero ayuda a restringir la edad de la secuencia Yaguarí – Buena Vista, debiéndose considerar la edad del evento Illawara como un mínimo en edad.

### 2.5.7 Formación Sanga do Cabral

Según Da-Rosa et al. (2010), el trabajo en conjunto de investigadores de Brasil, Argentina y Uruguay ha permitido establecer una correlación preliminar entre la Formaciones Sanga do Cabral y la Formación Buena Vista, en base a sus características litofaciológicas, tafonómicas, proveniencia y diagénesis.

Para Ernesto et al. (2019) el arreglo estratigráfico en las sucesiones de Uruguay y Brasil podría ser diferente, a menos que se considere que las areniscas del Cerro Conventos sean equivalentes estratigráficos a la Formación Pirambóia de Brasil, y que ambas representen migraciones laterales de grandes dunas eólicas en planos deltaicos. En estos planos, los canales distributarios son dominantes con un carácter rectilíneo. Tal arreglo estratigráfico podría sugerir que la Formación Buena Vista sea equivalente a la parte más superior de la Formación Rio do Rasto.

#### 2.5.7.1 Generalidades de la Formación Sanga do Cabral

Andreis et al. (1980) definen el Grupo Rosario do Sul, de edad Triásica, el cual está integrado por tres Formaciones: Sanga do Cabral (nueva unidad) en la base, Santa María y Caturrita. La Formación Caturrita consta de areniscas gruesas a finas, marrones o rojas, interestratificadas con lutitas rojas y paleosuelos. La Formación Santa María consta de dos miembros llamados Passo das Tropas y Alemoa. El Miembro Passo das Tropas está integrado por areniscas conglomerádicas blanquecinas, areniscas rojas y lutitas (shales) rojas a purpuras. El Miembro Alemoa está integrado por lutitas masivas rojas y purpuras. La Formación Sanga Do Cabral esta esencialmente constituida por 80% de areniscas y proporciones subordinadas de conglomerados (5%) y pelitas (15%). En conjunto, estas rocas presentan colores rojizos (5R 5/4, 3/4, 4/6) o castaños rojizos (10R 4/2, 6/6, 4/6, 5/4, 3/4). Solamente aparecen colores reductores gris verdoso (5GY6/1, 8/1) o gris amarillento (5Y7/2, 8/2) posteriores,

comunes en toda la sucesión. La estratificación es bien marcada, siendo los estratos lenticulares o tabulares (más frecuentes hacia la cima); los estratos varían desde pocos centímetros hasta 1,50 m de espesor y los contactos entre litologías son irregulares, planos nítidos, gradacionales o raramente ameboidal por deformación tixotrópica. Las litologías se suceden constituyendo ciclotemas grano decrecientes. Las areniscas son de muy gruesas a finas, siendo más frecuentes las finas en el tope de la unidad. Exceptuando algunos estratos macizos, las estructuras primarias son abundantes, con estratificaciones cruzadas de porte medio de tipo tangencial simples (asintóticas en la base), planar o acanalada (hasta 8 m de largo) y proporciones menores de laminación paralela, marcas de onda linguoides, parting lineation y estructuras deformacionales producidas por flujos tixotrópicos y por mezclas de arena y arcilla (que confiere a las rocas aspecto brechoso). Las estructuras secundarias son concreciones carbonáticas. En la parte basal de la unidad, las estructuras cruzadas se presentan deformadas en las partes superiores de los estratos (Bortoluzzi y Andreis, citados por Andreis et al., 1980). Las areniscas son subarcóscicas o arcóscicas con hasta 30% de feldespatos (Andreis et al., 1980) y contienen una serie de minerales pesados como zircones, turmalina, estauroлита, granate, etc. (Gamer mann y Reischl, citados por Andreis et al., 1980). Las acumulaciones de ruditas, siempre lenticulares, están representadas por brechas y conglomerados intraformacionales, preferentemente en la base de la unidad (Bortoluzzi y Andreis, citados por Andreis et al., 1980) y por algunas concentraciones de gránulos y guijarros (de diámetros hasta 5 cm), subangulosos a subredondeados. En la base de las areniscas gruesas, eventualmente, se forman ortoconglomerados polimícticos de poco espesor (hasta 20 cm), compuestos de cuarzo, feldespatos y litoclastos de granito, aplita y esquistos. Las rocas pelíticas, limolitas y raras lutitas, pueden ser macizas o tener laminación paralela, nítida o poco definida, y raramente marcas de onda (Andreis et al., 1980). Los minerales arcillosos principales son illita y montmorillonita, aunque aparecen asociados a clorita, rara caolinita e interestratificados (Ramos y Formoso, citados por Andreis et al., 1980).

La Fm. Sanga do Cabral propuesta por Andreis et al. (1980), se basó en las rocas expuestas en los alrededores de la ciudad de Rio Pardo, ciudad localizada en el centro del estado de Rio Grande do Sul. En ese lugar, las areniscas finas, de color anaranjado, con localizados conglomerados intraformacionales ocurren sobre las areniscas finas de color rosa a blanco de la Formación Rio do Rasto. Los intraconglomerados representan corrientes entrelazadas (braided) superficiales, en una relación de escala 1:100 espesor/ancho, mientras que las areniscas finas anaranjadas son interpretadas como masivas, o presentando estratificación horizontal, que denota un extenso plano semiárido. Los intraconglomerados son la mayor fuente de fósiles vertebrados (Dias-da-Silva et al., 2017). La Fm. Sanga do Cabral se desarrolla

en un cinturón de exposiciones E-W en Rio Grande do Sul, teniendo una probable continuación física en Uruguay (Andreis et al., citados por Dias-da-Silva et al., 2017). Las exposiciones de la Fm. Sanga do Cabral son dispersas, a veces separadas por varios kilómetros, lo que dificulta su correcta correlación (Dias-da-Silva et al., 2017).

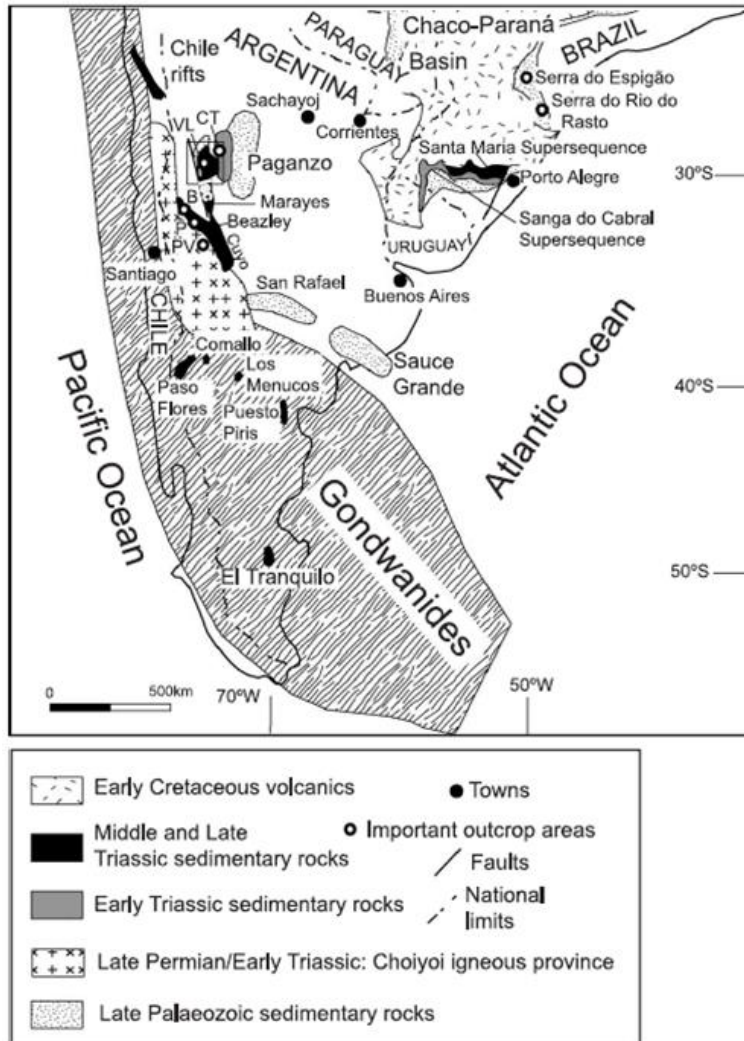
Aparte de la repetida intercalación de intraconglomerados y areniscas finas, hay una fuerte tendencia hacia la cima en la modificación de la composición de los intraclastos, desde arcillosos a nódulos carbonatados, y finalmente en una mezcla de arcillosos, carbonatados y fragmentos de areniscas previamente depositadas (Da-Rosa et al., citados por Dias-da-Silva et al., 2017). Este cambio composicional se debe, probablemente, a la reducción del espacio de sedimentación (acomodamiento) hacia la cima de la secuencia (Zerfass et al., citados por Dias-da-Silva et al., 2017), resultando el reducido espacio de acomodamiento en un intenso retrabajo de los depósitos de la Fm. Sanga do Cabral (Dias-da-Silva et al., 2017).

Dias-da-Silva et al. (2017) citan a Faccini, mencionando que el autor aplica el concepto de estratigrafía de secuencia a las rocas Gondwanicas continentales del Permo-Triásico ubicadas en Rio Grande do Sul. Además, Dias-da-Silva et al. (2017) mencionan que Faccini postula que la Fm. Sanga do Cabral debería corresponder a una unidad aloestratigráfica distintiva, y que está separada del paquete Pérmico inferior por una inconformidad. Las unidades Pérmicas superiores son la Fm. Rio do Rasto (fluvio-lacustre) y la Fm. Pirambóia (eólica), ambas interestratificadas lateralmente (Dias-da-Silva et al., 2017). Dias-da-Silva et al. (2017) mencionan que Zerfass et al. utilizaron el marco de trabajo aloestratigráfico propuesto por Faccini, renombrando la secuencia como Supersecuencia Sanga do Cabral (SCS), una unidad de segundo orden aloestratigráfica, tectónicamente controlada, en la cual la asociación de facies dominante comprende conglomerados intraformacionales masivos o de estratificación cruzada, y areniscas horizontales que se exponen desde Rio Grande do Sul hasta Uruguay y la Formación Buena Vista (Dias-da-Silva et al., 2017).

Los principales depósitos Triásicos tempranos comprenden a la Supersecuencia Sanga do Cabral (SCS) – la cual está incluida en la Cuenca Chaco-Paraná y las secuencias Talampaya/Tarjados del Oeste de Argentina (Figura 29). Estos depósitos son estratos aluviales y su estilo sugiere una amplia cuenca aluvial. Los estratos más al Sur de Brasil, de edades Triásicas tempranas corresponden a la Formación Sanga do Cabral. Estos depósitos también suceden en Uruguay bajo el nombre de Formación Buena Vista, ambas conformando la SCS (Zerffas et al., 2004). El estilo fluvial y la uniformidad de facies permitieron interpretar esta unidad como los restos de un ambiente deposicional intracratónico amplio. La proveniencia indica que las áreas fuentes

fueron terrenos sedimentarios (Figura 29) elevados hacia el Sur y al Suroeste (Zerffas et al., citados por Zerffas et al., 2004). La información de paleocorrientes (Figura 30) sugieren una tendencia de transporte fluvial hacia el Norte y Este – hacia el Noreste (Zerffas et al., 2004).

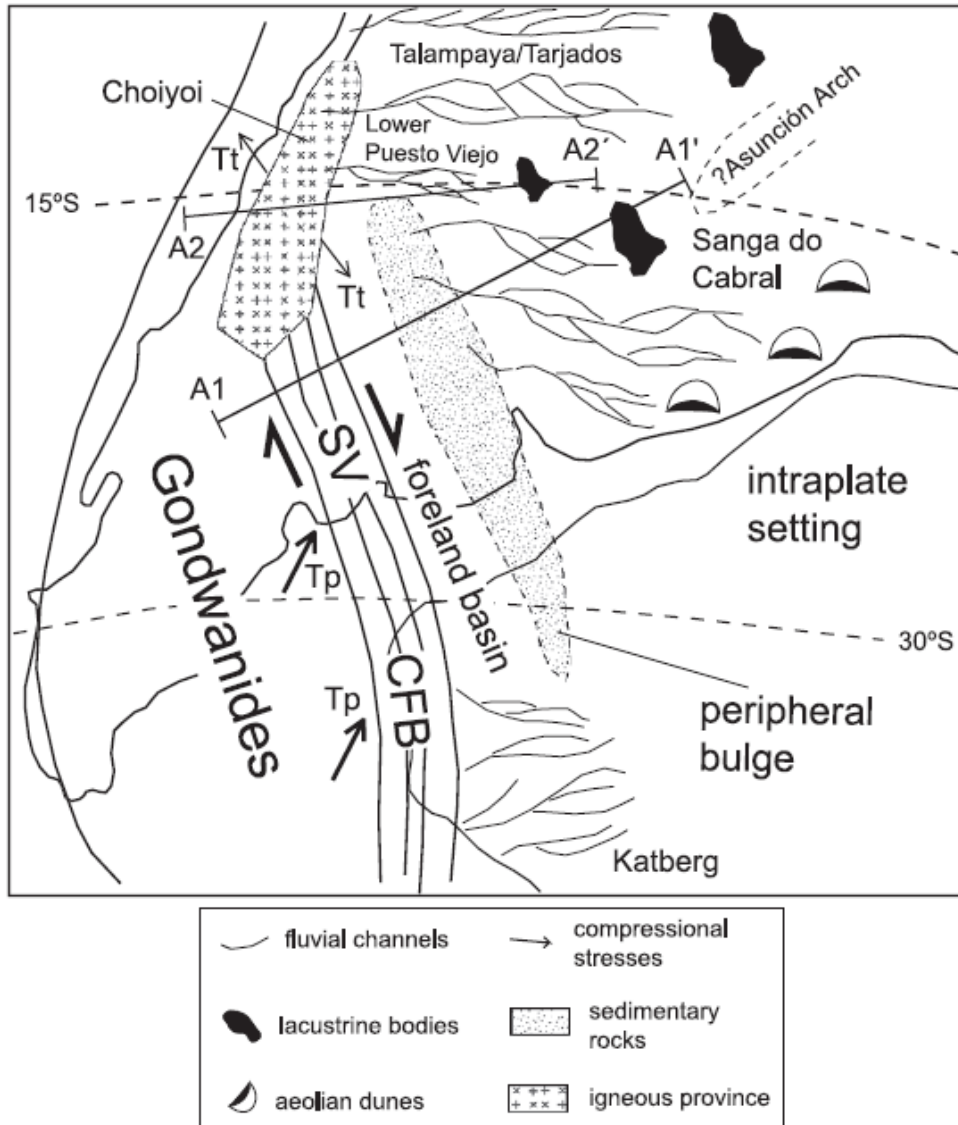
Figura 29. Mapa de América del Sur con la posición del orógeno Gondwanides



Cuencas y otras características geológicas importantes del Paleozoico tardío y Triásicas. B= Área Barreal, CT=Cañón Rio Talampaya, Isc= Cuenca Ischigualasto, P=Área Potrerillos, VL= Valle de la Luna.

Fuente: tomado de Zerffas et al. (2014).

Figura 30. Mapa paleogeográfico del SW de Gondwana durante el Triásico temprano



El estrés transpresional (Tp) domina en el Cape Fold Belt (CFB) y Sierra de la Ventana (SV) asociada a cizallamiento dextral. El magmatismo Choiyoi fue generado bajo estrés transtensional (Tt) dentro de la zona de cizalla dextral.

Fuente: tomado de Zerffas et al. (2014).

La distribución de la SCS en la subsuperficie es controversial, en la parte Sur de Brasil hay una ausencia de afloramientos al Norte, en la Cuenca Chaco-Paraná en áreas tales como Serra do Rio do Rasto y Serra de Espigão (Zerffas et al., 2004). En base al análisis de perforaciones se sugiere que la Formación Buena Vista se extiende hacia el Oeste en la subsuperficie desde Uruguay, hasta la región de Sachayoj -Norte de Argentina- (Figura 29), además es probable que el límite de esta unidad en el Norte de Argentina este localizado a decenas de kilómetros hacia al Norte de las ciudades de Corrientes y Sachayoj (Padula y Mingramm, citados por Zerffas et al., 2004).

Con relación a las litofacies, tanto la Fm. Sanga do Cabral como la Fm. Buena Vista, consisten básicamente en areniscas finas cortadas por lentes de areniscas medias y conglomerados intraformacionales depositados en un ambiente fluvial efímero de baja sinuosidad con sandsheets e intraclastos lutíticos, pasando hacia el tope a ciclos con intraclastos de arcilla, arenisca y carbonatos, paleocorriente hacia el NE, localizados niveles lutíticos y fallas NW limitando bloques estructurales. Sin embargo, la Fm. Buena Vista presenta en la base, clastos de arcilla de gran porte y un paquete de ortoconglomerados oligomicticos formados en un ambiente fluvial efímero desconfinado. Estas facies no fueron encontradas, hasta el momento, en la base de la Fm. Sanga do Cabral. El marco petrográfico es similar para las dos unidades, aunque ocurren en la Fm. Buena Vista, algunos niveles eólicos, ausentes en la Fm. Sanga do Cabral (Da-Rosa et al., 2010).

Dias-da-Silva et al. (2017) explican que, según Zerfass et al., el evento tectónico paroxismo Gondwanides I (primera fase de la orogenia Gondwanides), junto con un probable cambio climático, fue también responsable de la característica sedimentaria más llamativa de la SCS (sin considerar las infrayacentes rocas Pérmicas): un cambio en el patrón fluvial que cambió de meandrosos a entrelazados (braided), reflejando un levantamiento en el relieve. Reforzando el concepto de que la SCS se extiende hasta Uruguay como la Fm. Buena Vista, esta formación, al menos en el área de Colonia Orozco, registra un cambio similar en el patrón de los ríos: desde baja energía en la base - justamente por arriba de la Fm. Yaguari- hacia alta energía en los niveles superiores (Piñeiro et al., citados por Dias-da-Silva et al., 2017). Esta similitud fue utilizada por Zerfass et al., según Dias-da-Silva et al. (2017), para sugerir que la Fm. Sanga do Cabral y la Fm. Buena Vista (además del paquete Talampaya/Tarjados de Argentina) son homotaxales. Sin embargo, el principal problema es establecer la edad precisa del evento tectónico paroxismo Gondwanides I (Dias-da-Silva et al., 2017).

Según Dias-da-Silva et al. (2017) Zerfass et al. proponen que la mayoría de las rocas continentales del Triásico medio-tardío del Sur de Brasil, Argentina y Namibia fueron depositadas en un set de “en echelon basins” (fallas

superpuestas) en el SW del Gondwana. Las estructuras de la Falla Waterberg-Omaruru pueden ser conectadas con las fallas de rumbo NW en Brasil. Algunas de estas fallas afectaron también la deposición de la infrayacente SCS, por lo tanto, indicando el inicio de la extensión en el Triásico temprano (Dias-da-Silva et al., 2017). Estructuras NNE-SSW de extensión reactivadas por el Cinturón Damara en Namibia, se propagaron hacia Rio Grande del Sur, formando un sistema de fallas normales anastomosado y rift de cuenca relacionados en el Triásico temprano-medio (Dias-da-Silva et al., 2017). Fracturas NW ocurren en todas las exposiciones conocidas (Dias-da-Silva et al., 2017), además fallas E-W son exclusivas de la SCS y pueden ser el preludio de la fase extensional Triásica (Zerfass et al., citados por Dias-da-Silva et al., 2017).

El ambiente sedimentario de la SCS se piensa como un plano entrelazado, en el cual pequeños y superficiales canales se dirigen hacia el Norte, hacia un vasto plano semiárido. Hay una clara tendencia hacia el Norte de las facies sedimentarias en el borde SE de la Cuenca Paraná, como ha sido inferido por varios investigadores. Esta asunción puede haber fundado, según Dias-da-Silva et al. (2017) el trabajo de Piñeiro et al., en el cual la Fm. Buena Vista puede ser la parte baja y/o proximal del registro del plano entrelazado registrado en la Fm. Sanga do Cabral (Dias-da-Silva et al., 2017).

#### 2.5.7.2 Paleontología y edad de la Formación Sanga do Cabral

Zerfass et al. (2003) han propuesto que la Fm. Sanga do Cabral (Brasil) y la Fm. Buena Vista (Uruguay) integran la supersecuencia Sanga do Cabral, como ya ha sido mencionado. La Formación Sanga do Cabral es tradicionalmente considerada Triásica temprana, una edad asignada principalmente a la presencia del extendido reptil Gondwanico *Procolophon trigoniceps* (Dias-da-Silva et al., Cisneros, citados por Dias-da-Silva et al., 2017). Sin embargo, la edad de la Formación Buena Vista ha sido sujeto de grandes controversias, dado que ha sido alternativamente considerada como Pérmica, Permo-Triásica y Triásica (Piñeiro et al., Dias-da-Silva et al., Modesto y Botha-Brink, citados por Dias-da-Silva et al., 2017). En base a información paleontológica, según Dias-da-Silva et al. (2017), sugieren que al menos parte de la Fm. Sanga do Cabral es Pérmica en edad (Piñeiro et al., citados por Dias-da-Silva et al., 2017) por lo que, en línea con la previa interpretación de que la fauna de la Fm. Buena Vista es Pérmica, si estas dos posibilidades son correctas, esto implica que el LPT yace dentro de la Formación Sanga do Cabral, lo que haría crítica a la fauna dentro esta Formación para análisis de sobrevivencia de tetrápodos frente al evento de extinción del final del Pérmico (Dias-da-Silva et al., 2017).



Según Dias-da-Silva et al. (2017) no hay información que soporte incuestionablemente una fauna Pérmica dentro de la supersecuencia Sanga do Cabral, como ha sido propuesto, según los autores, por Piñeiro et al., tanto como para la Formación Sanga do Cabral como para la Formación Buena Vista.

#### 2.5.8 Formación Talampaya

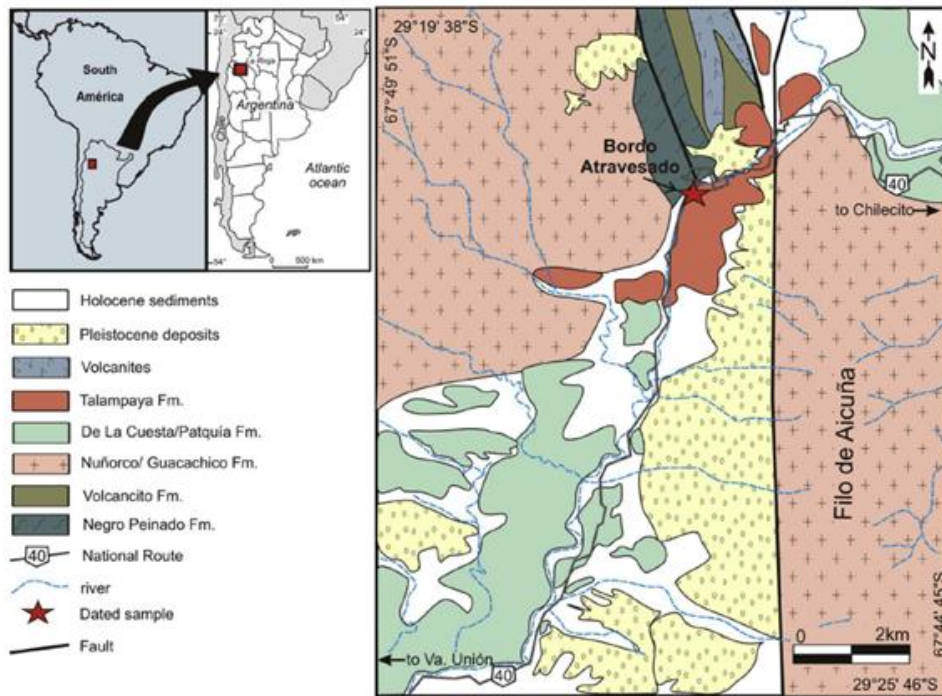
Según propuestas tectonoestratigráficas recientes, la Formación Sanga do Cabral y sus correspondientes litoestratigráficas en Argentina (Formaciones Talampaya, Tarjados y Puesto Viejo) y en Uruguay (Formación Buena Vista) representarían secuencias contemporáneas de segundo orden, tectónicamente controladas, teniendo como área fuente el cinturón Gondwanides (Da-Rosa et al., 2010).

##### 2.5.8.1 Generalidades de la Formación Talampaya

Gruesas secuencias correspondientes al Paleozoico en la Cuenca Paganzo y Triásicas en la Cuenca Ischigualasto-Villa Unión se exponen extensamente en el SW de la provincia La Rioja, NW de Argentina. La Cuenca Paganzo ha sido descrita tanto como una cuenca antepaís, intracratónica o intermontaña, relacionada al colapso del orógeno de la protocordillera, mientras que la Cuenca Ischigualasto-Villa Unión es un rift con una tendencia bien definida NW-SE. La parte superior de la Cuenca Paganzo -Paleozoica tardía- y los estratos inferiores de la Cuenca Ischigualasto-Villa Unión -Triásicos principalmente- consisten en depósitos de estratos rojos de similares ambientes, que los hacen difícil de diferenciar a campo (Gulbranson, et al., 2015). Los estratos rojos de la Cuenca Paganzo incluyen sucesiones desde el Carbonífero tardío al Pérmico temprano (Limarino y Césari, Gulbranson et al., citados por Gulbranson et al., 2015). Tres paquetes mayores estratigráficos son reconocidos en el área estudiada (Figura 31) por Gulbranson et al. (2015): 1- rocas metamórficas y graníticas del Paleozoico temprano, 2- una sucesión continental del Paleozoica tardía incluida en el grupo Paganzo (Bodenbender, Azcuy y Morelli, citados por Gulbranson et al., 2015) y 3- areniscas rojas y pelitas (mudstones) de la Formación Talampaya (Romer y Jensen, citados por Gulbarson et al., 2015). En la sección en estudio, la Formación Talampaya presenta 260 m de espesor y esta principalmente compuesta por areniscas rojas y pelitas (mudstones) con intercalaciones de conglomerados de grano grueso y pequeños niveles de tufos en el tercio inferior y superior de la sucesión. Esta unidad representa el relleno basal de la cuenca rift Ischigualasto-Villa Unión. La Fm. Talampaya y la suprayacente Fm. Tarjados, registran una etapa temprana en el desarrollo de un rift pasivo controlado por un sistema de

fallas previo (Spalletti, citado por Gulbranson et al. 2015).

Figura 31. Mapa geológico del área de Cuesta Miranda y locación de la sección estudiada en Bordo Atravesado



Fuente: tomado de Gulbranson et al. (2015).

Según la litología, estructuras sedimentarias, formas, tipos de contactos de límites y arreglos laterales-verticales de litofacies, siete asociaciones de facies han sido reconocidas en la Formación Talampaya (Gulbranson et al., 2015):

-Asociación de facies 1- registra aglomerados, conglomerados de bloques y guijarros, y areniscas gruesas. Los aglomerados registran clastos de hasta 6 m de diámetro, compuestos de granitos, areniscas rojas, rocas metamórficas de bajo grado y rocas volcánicas. La matriz es de arena de grano grueso compuesta principalmente de cuarzo, feldespato y fragmentos de rocas graníticas. La dominancia de depósitos de grano grueso, el gran diámetro de muchos clastos, la estratificación tosca observada en la mayor parte de los conglomerados y la proveniencia local de los fragmentos (dominados por clastos de granito y rocas metamórficas derivadas del basamento local) sugieren que esta asociación de facies fue depositada en abanicos aluviales pequeños.

-Asociación de facies 2- consiste en conglomerados desde gruesos a finos y areniscas gruesas a finas. Los conglomerados son principalmente clasto

soportados, pero conglomerado matriz (arena) soportados también están presentes. Los clastos son de hasta 15 cm de diámetro son bien redondeados y compuestos de granito, rocas metamórficas de bajo grado, areniscas rojas y rocas volcánicas. Las areniscas gruesas a finas muestran abundantes y dispersos clastos de grava. Los estratos son de hasta 10 cm de espesor y son internamente masivos o de estratificación cruzada, mostrando frecuentes cubiertas de barro. La interpretación de esta asociación de facies es la de depósitos de ríos entrelazados (braided), caracterizados por canales que sufrieron una rápida avulsión. La geometría de las areniscas de estructuras cruzadas y conglomerados sugieren que los canales fueron rellenos por moderadas a altas barras de alivio, dominadas por migraciones descendentes. Las presencias de coberturas de barro en la parte superior de las areniscas de estructuras cruzadas indican el final de la deposición por medio de corrientes de baja energía antes de que los canales se abandonen definitivamente (avulsión).

-Asociación de facies 3- se apoya abruptamente sobre la asociación 2. Tiene un típico color púrpura y esta principalmente compuesta por brechas basálticas.-

Asociación de facies 4- transicionalmente cubre la asociación 3 y está compuesta por ciclos grano decrecientes de conglomerados, areniscas y pelitas. Los ciclos comienzan con depósitos lenticulares, mostrando una base planar a moderadamente erosivas de conglomerados clasto soportados de granos gruesos a medios de matriz arenosa. Son masivos en la base o muestran estratificación tabular, cruzada y ocasionalmente gradada. Los clastos de basamento son de hasta 30 cm de diámetro, redondeados, mientras que los clastos basálticos son subangulares a angulares y alcanzan 8 cm de diámetro. Las areniscas son masivas u ocasionalmente cruzadas, de gravilla a grano grueso que gradan a areniscas finas con ripples que aparecen en la cima de los depósitos lenticulares. Los sedimentos en este intervalo fueron probablemente depositados ríos de baja a media sinuosidad.

-Asociación de facies 5- está compuesta por areniscas finas a medias entre las cuales pelitas masivas y laminadas se intercalan a veces. Esta asociación tiene origen fluvial y probablemente corresponde a ríos arenosos efímeros con características transicionales entre inundaciones laminares (sheetfloods) distales y espontaneas inundaciones laminares de ríos de lechos arenosos. Se interpreta un sistema efímero pobremente canalizado, en el cual la sedimentación tomo lugar principalmente en áreas intercanal, dado los flujos no confinados durante los eventos de inundación.

Asociación de facies 6- presenta casi completamente areniscas finas, en algunos casos mostrando pelitas (mudstones) intercaladas. Las areniscas son finas a muy finas, bien a muy bien seleccionadas y casi sin matriz barrosa. Las areniscas presentan estratificación tabular cruzada, en artesa y laminación horizontal. Para esta facie se propone se propone un origen eólico basándose en la predominancia de areniscas finas a medias y bien seleccionadas, a la presencia de sets de estratificación cruzada, la falta de superficies erosivas y a

la existencia de laminación con gradación inversa. La falta de sets de gran escala con estratificación cruzada parece sugerir la existencia de interacción eólica-fluvial. La intercalación de niveles de pelitas (mudstones) con depósitos arenosos fluvio - eólicos se interpretan como corrientes fluviales no confinadas que inundan el área eólica durante periodos pluviales. Asociación de facies 7- comprende un intervalo que se afina ascendentemente. Areniscas finas se intercalan con pelitas (mudstones) y una secuencia monótona de pelitas (mudstones) con escasas intercalaciones de tobas y margas en la cima. Las areniscas son muy finas a finas, bien seleccionadas y en algunos casos micáceas. Este intervalo se interpreta como un lago efímero hidrológicamente cerrado que se desarrolla en un clima árido a semiárido que registra una jerarquía de ciclos transgresivos y regresivos (Zhang et al., citados por Gulbranson et al., 2015). Sin embargo, el aumento en fracciones finas hacia la cima claramente sugiere una expansión del cuerpo de agua desde la base a la cima, además de que las areniscas basales se pueden considerar como depósitos dominados por inundaciones pobremente o no canalizadas durante periodos lluviosos. Los niveles de toba son producto de episodios recurrentes de caída de cenizas, aunque el tamaño fino de partícula y el poco espesor del nivel parece indicar una fuente volcánica lejana (Gulbranson et al., 2015).

Las relaciones estratigráficas y la edad radiométrica de alta precisión, indican que la mayor parte de la Fm. Talampaya es Pérmica tardía, extendiéndose hasta el Triásico temprano en su parte más superior. La sedimentación durante LPT tomo lugar en un ambiente clástico de playa-lago, bajo condiciones áridas a semiáridas. El apilado vertical de las asociaciones de facies sugiere un progresivo descenso del paisaje y una transición a condiciones áridas o semiáridas. Este registro se puede resumir en 3 etapas: (1) etapa de erosión irregular del basamento, probablemente durante el Pérmico Medio, donde dominaron flujos diluidos y de escombros y transición a ríos entrelazados, que indican un suavizado del paisaje irregular y probablemente la expansión de la cuenca (2) actividad volcánica intracuenca limitada a pequeños flujos basálticos que son seguidos por una gruesa secuencia fluvial de conglomerados, areniscas y pelitas (mudstones) que fueron depositadas en amplias, y probablemente de bajo gradiente, planicies aluviales barrosas, en las cuales atravesaban canales de baja a mediana sinuosidad, que migraban de forma limitada lateralmente (3) una etapa caracterizada por un pronunciado decrecimiento en la energía de los sistemas fluviales, la aparición de areniscas eólicas intercaladas con depósitos fluviales efímeros, la intercalación de pequeños niveles de tobas y la presencia de facies barrosas de playa-lago en la parte más superior. En este contexto, canales fluviales estables compuestos casi completamente de conglomerados casi desaparecen y la sedimentación parece suceder en un plano entrelazado de ríos arenosos efímeros. Las condiciones áridas pueden haberse intensificado, como indica la ocurrencia

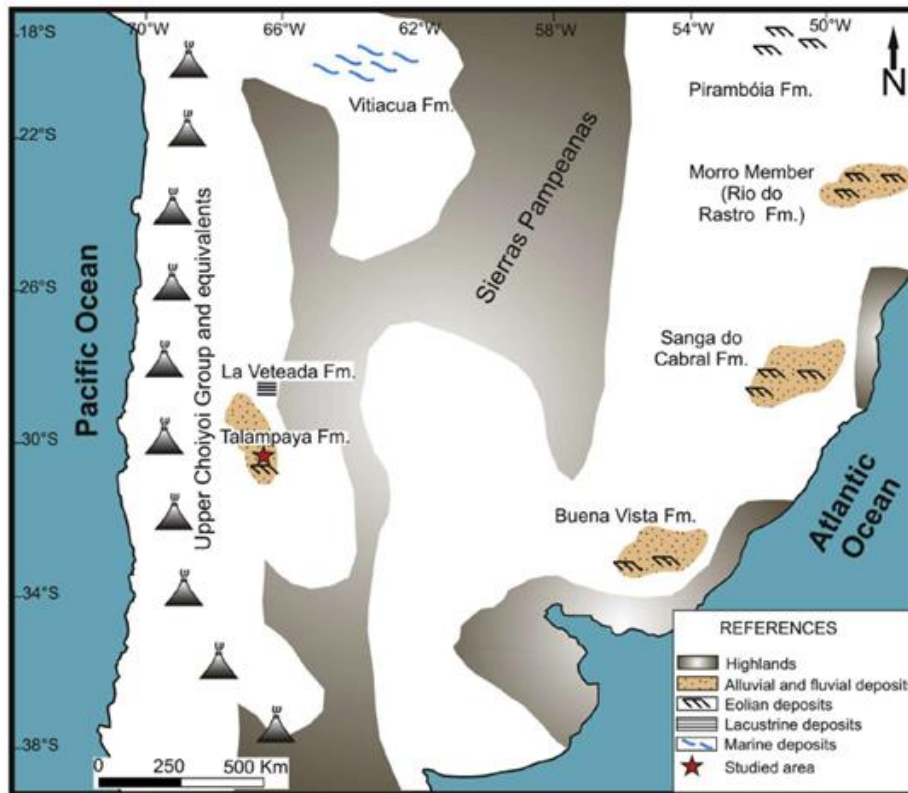
común de depósitos de interacción eólico-fluvial, que rematan en depósitos de lagos y pequeñas areniscas eólicas que indican la culminación del desarrollo completo de condiciones áridas (Gulbranson et al., 2015).

#### 2.5.8.2 Edad y paleontología de la Formación Talampaya

Según Da-Rosa et al. (2010) las Formaciones Talampaya, Tarjados, Puesto Viejo (Argentina), Buena Vista (Uruguay) y Sanga do Cabral (Brasil) y (Argentina) son correspondientes litoestratigráficas. Sin embargo, variaciones faciológicas y diferencias faunísticas colocan en duda su sincronidad.

Según Gulbranson et al. (2015) se le ha asignado a la Formación Talampaya una edad Triásica en base a relaciones estratigráficas, dado la carencia de determinaciones bioestratigráficas o análisis radiométricos. Hasta el 2015, no hay menciones de ocurrencia del límite Pérmico - Triásico (LPT) dentro de la sucesión depositada en el grupo Paganzo en Argentina. Gulbranson et al. (2015) colectaron muestras de las tobas de la parte superior de la Fm. Talampaya en Bordo Atravesado, Cuesta de Miranda. Se obtuvo una edad media U-Pb de 252.38 (+0.09/-0.22) Ma a partir de zircones volcánicos. Esta edad reportada es muy cercana a la edad de  $252.17 \pm 0.06$  Ma para el límite Pérmico-Triásico más aceptado (Shen et al., citados por Gulbranson et al. 2015), y el nuevo límite propuesto (Burguess et al., citados por Gulbranson et al., 2015) de  $251.880 \pm 0.031$  Ma. Esto indica que la mayoría de la Fm. Talampaya fue depositada durante el Pérmico, pero dado que la parte superior de esta Formación no aflora en el área de estudio y representa hasta una decena de metros, es muy probable que el LPT este registrado en la parte más superior de la Fm. Talampaya (Gulbranson et al., 2015). Desde el punto de vista regional, los nuevos datos brindados por Gulbranson et al. (2015) para la Formación Talampaya brindan tres hallazgos importantes: 1. el descubrimiento de una cuenca Pérmica tardía, 2. delineación de la evolución paleoambiental y paleoclimática de la Fm. Talampaya, 3. el significado paleogeográfico de la Fm. Talampaya en un modelo paleogeográfico regional (Figura 32).

Figura 32. Mapa paleogeográfico esquemático durante el LPT



Fuente: tomado de Gulbranson et al. (2015).

El cambio en edad de la Fm. Talampaya hacia el Pérmico indica que la extensión litosférica, asociada al magmatismo Choyoi, comenzó mucho antes que el Triásico temprano, como se consideraba antes (Gulbranson et al., 2015).

### 2.5.9 Hidrogeología

El Sistema acuífero Guaraní (SAG) representa una de las más importantes reservas de agua dulce del mundo, recurso compartido entre Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. Está constituido por una potente sucesión de estratos porosos y permeables más o menos interconectados, que en su mayoría se depositaron durante el Triásico-Jurásico y el Pérmico. El SAG no constituye un sistema homogéneo, en casi toda su extensión se encuentra cubierto por potentes coladas basálticas que superan en algunos lugares los 1.000 metros de potencia. Se encuentra aflorando en el área centro Norte de Uruguay y en una pequeña área muy particular que constituye una “ventana” rodeada por el acuífero confinado por el basalto en la ciudad de Artigas (Montaño et al., 2004).

En base a la constitución geológica, Morales et al. (2004) dividen dos grandes paquetes sedimentarios que conforman dos subsistemas hidrogeológicos distintos: el SAG Típico y el SAG Pérmico o Sistema acuífero Carbonífero Pérmico (SCAP) según Capeci (2013). El SAG Típico se encuentra constituido por sedimentos y rocas sedimentarias asimilables a la Formación Tacuarembó (Jurásica), caracterizada por areniscas de origen continental depositadas por sistemas fluviales y lacustres asociadas a varios episodios eólicos, y a las Formaciones Buena Vista y Yaguarí (ambas Pérmicas superior), depositadas en ambiente transicional-continental. El espesor varía desde los pocos metros hasta más de 200 metros totalmente saturados de agua. El SAG Pérmico es infra yacente al SAG Típico, y está conformado por sedimentitas de edad Pérmico inferior y medio, de mediana a baja permeabilidad. Está constituido por sedimentos y rocas sedimentarias correspondientes a las Formaciones San Gregorio (Pérmico inferior), Tres Islas (Pérmico medio) que han sido depositadas en ambientes marinos poco profundos y que, por su contenido variable en sales, condiciona la calidad del agua.

Según Capeci (2013) el SACP uruguayo, comprendido por unidades acuíferas y acuitardos intercalados con conexión hidráulica, es un sistema acuífero transfronterizo compartido con Brasil. En Uruguay se localiza en la Cuenca Norte y en Brasil en la Cuenca Paraná. El SACP se presenta en el Cuadro 4, en cuanto a sus características geológicas e hidrogeológicas.

Cuadro 4. Tabla hidrogeológica

Edad	Formación Geológica	Litología	Unidad Hidrogeológica	Espesor medio (m)	Comportamiento Hidrogeológico	Profundidad media de pozos (m)	Parámetros Hidráulicos Calculados Q (m <sup>3</sup> /h) T (m <sup>2</sup> /día) K (m/día)
Pérmico Tardío	Buena Vista	Areniscas finas a gruesas, blancuzcas y rojizas. Estratos lenticulares. Ambiente fluvial	Acuífero Buena Vista	100	Acuífero confinado, de baja productividad	62	Q= 1-5 T=310 K=5
Pérmico Superior	Yaguari	Miembro sup: Areniscas y pelitas. Ambiente pasaje de plataforma rasa a planicie costera con influencia del mar. Miembro inf. Areniscas dinas a medias.	Acuífero Yaguari	70	Acuitardo en la sección superior. Acuífero de baja productividad en la sección inferior	43	Q=2,5 Baja permeabilidad. Baja transmisividad. Bajo coeficiente de Almacenamiento.
Pérmico Superior	Paso Aguiar	Siltitos y pelitas. Ambiente plataforma marina	Acuitardo Paso Aguiar	50	Acuícludo /acuitardo.	30	Q=2 T=0.03 K=0.001
Pérmico Medio	Mangrullo	Lutitas, calcáreos grises a negros. Condiciones subacuáticas salobres	Acuitardo Mangrullo	30	Acuícludo /acuitardo.	36,5	Q= 2 T=0.036 K=0.001
Pérmico Medio	Frayle Muerto	Siltitos y areniscas finas. Ambiente plataforma marina.	Acuitardo Frayle Muerto	100	Acuícludo /acuitardo.	35.5	Q= 2 T=0.355 K=0.01
Pérmico Medio	Tres Islas	Areniscas, pelitas blancas. Ambiente continental	Acuífero Tres Islas	60	Acuífero confinado en la gran mayoría del área y libre al sureste del área, de muy baja a baja productividad	65	Q= 3 T= 11-192 K= 0.191
Carbonífero Superior	Cerro Pelado	Arcillitas, pelitas, pelitas arenosas ricas en materia orgánica	Acuitardo Cerro Pelado	50	Acuícludo /acuitardo.	35	Q= 2 T= 0.03 K= 0.001
Carbonífero Superior	San Gregorio	Diamictitas, pelitas y areniscas. Ambiente glacial.	Acuífero San Gregorio	50	Acuífero confinado en la gran mayoría del área y libre al suroeste del área, de media productividad	37	Q=4 T= 70-80 K= 1.89-2.16
Precámbrico	Basamento Cristalino	Gneises- Granitos	Acuífero Basamento Cristalino	¿?	Acuífero Fisurado,	65	Q=1,6 T=19.5/325 K=0.3-5

Fuente: tomado de Capeci (2013).

Las principales unidades acuíferas son el acuífero Tres Islas y el San Gregorio. El Miembro Inferior de la Formación Yaguari y la Fm. Buena Vista se comportan como acuíferos de baja productividad. Los “sedimentos pelíticos grises” abundantes en la Cuenca Norte, cuando están presentes, hacen que la circulación y almacenamiento del agua subterránea sea pobre o inexistente, generando que la extracción de agua subterránea en la zona sea dificultosa o sin éxito. El acuífero Yaguari, al igual que el San Gregorio y Tres Islas, conforma la tercera unidad hidrogeológica de la Subprovincia Pérmica del Sistema acuífero Guaraní (Montaño, citado por Capeci 2013). El acuífero Yaguari se comporta como acuífero libre. Al Norte de la Ciudad de Melo se encuentra de forma confinada por los sedimentos de la Formación Buena Vista. En el área de afloramiento Carbonífera-Pérmica de la Cuenca Norte, esta Formación ocupa el 55% del área y es el acuífero que consta con más pozos. Este acuífero está conformado por areniscas (65%) y limolitas (35%) siendo los niveles más permeables pertenecientes al Miembro Superior, el cual está formado por alternancia de areniscas finas y muy finas rojas y limolitas rojas. El Miembro Inferior está compuesto por limolitas micáceas y arcillosas de baja permeabilidad, y en menor proporción, areniscas finas a muy finas de buena selección conformando un acuitado. Las perforaciones que sustraen agua de este acuífero son en su mayoría someras, presentándose entre profundidades variables de entre 10 a 40 metros con una media de 4 metros. Los caudales son bajos, la mayoría de entre los 0 y 2 m<sup>3</sup>/h, con una media de 2,5 m<sup>3</sup>/h y una



máxima de 20 m<sup>3</sup>/h. Se encuentra una relación entre pozos de mayores cuales (entre 10 y 20 m<sup>3</sup>/h) y la presencia de areniscas más gruesas (Capeci, 2013).

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sitio de estudio comprende parte del establecimiento “La Baguala”, correspondiente a la región 5, de la empresa forestal UPM. Se ubica en el NW del departamento de Cerro Largo, a 31 km de la ciudad de Melo, desde donde se llega por las rutas las rutas 26 y 44 con dirección al Paso Mazangano (Figura 33). Comprende un área aproximada de 1450 ha, y los límites del sitio son: hacia el S el Arroyo Zapallar, al E un camino vecinal no pavimentado transitable con camioneta, hacia el N un camino vecinal interno no pavimentado y no transitable con camioneta y un afluente del Arroyo Zapallar, y hacia el E la ruta 44. El casco principal de referencia de la empresa UPM se encuentra lindero a la zona de estudio, sobre la ruta 44, en las coordenadas UTM (21H) 743236.50 E y 6431174.25 S.

Figura 33. Ubicación del sitio de estudio



En rojo continuo, se delimita el área de estudio y en rojo punteado las rutas de acceso.

Fuente: modificado de Google Maps Hybrid (2020).

## 3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

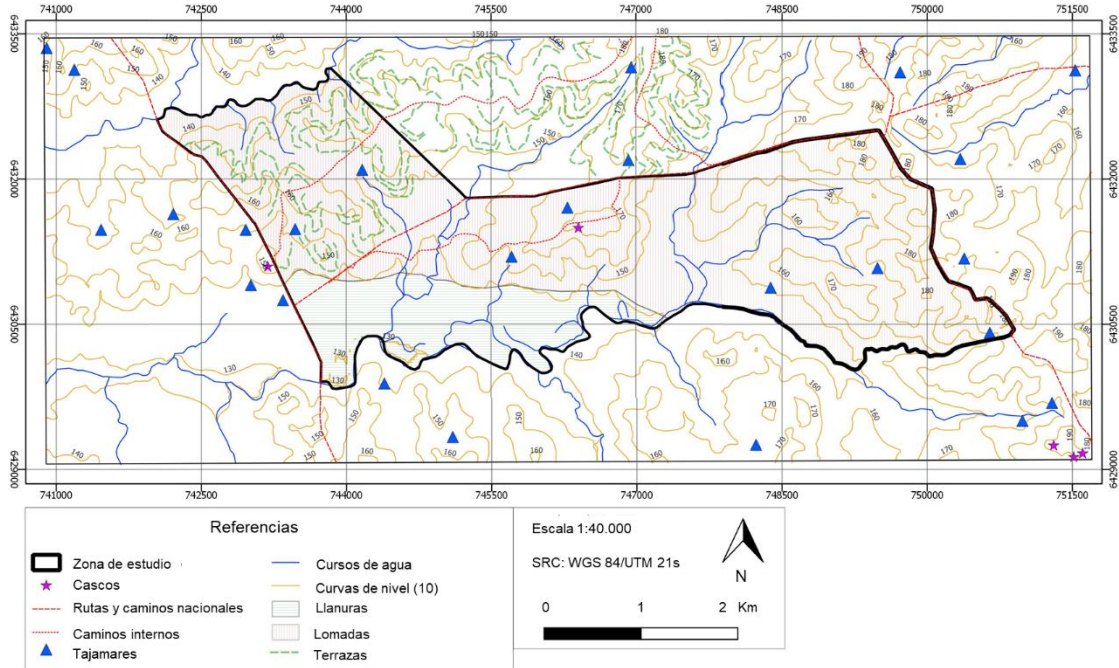
### 3.2.1 Clima

De acuerdo a la información publicada por Inumet de las estadísticas climáticas del periodo 1961-1990, la estación meteorológica de Melo (ubicación: latitud -32.3669 y longitud -54.193) registra una temperatura media anual de 17°C, una máxima media de 23,4°C y una mínima media de 11,8°C. La precipitación acumulada media anual es de 1238 mm.

### 3.2.2 Topografía

La zona presenta curvas de nivel que se desarrollan entre las alturas de 130 a 180 m. Dominan las lomadas (L), con un promedio de pendientes de 2,8%, las formas de la pendiente son en su mayoría convexas longitudinal y transversalmente (VV) y algunas menores de forma convexo lineal (VL). La clase de pendiente máximas promedio de estas geoformas es fuerte de 7,5% (MGAP. DGRN, 2014), ocupan la mayor parte de la zona de estudio, abarcando el 83% aproximadamente (Figura 34). Las llanuras ocupan interfluvios, con una pendiente promedio de 1,3% (MGAP. DGRN, 2014). Ocupan un área aproximada al 17% (Figura 34). Los valles son en su mayoría valles fuertes, de perfil convexo, con pendientes promedio de 4,9% ubicados en la zona de lomadas. En el parte más al NNorte de la zona se encuentran terrazas agrícolas, que constan de una combinación de canal y lomo, que, cabe señalar, en las sucesivas visitas siempre se encontraron con agua acumulada independientemente de las precipitaciones.

Figura 34. Mapa de relieve y elementos geográficos



### 3.2.3 Hidrografía

La zona consta del Arroyo Zapallar, de dirección E-W y sentido de escurrimiento W, y de varias cañadas tributarias del mismo, con un patrón de drenaje dendrítico. La zona presenta abundantes desagües de patrón dendrítico ancho, en diversas posiciones topográficas llegando a encontrarse frecuentemente en posiciones topográficas elevadas y de pendiente. Ocupan cerca del 50% del área, generando en la parte más al Sur, cerca del Arroyo Zapallar, una extensa llanura con muchos cuerpos de agua pequeños estancados, migraciones de cursos o cursos abandonados, que se refleja en la saturación de agua en el suelo visible en esta área (Figuras 35 y 36).

Figura 35. Mapa de desagües

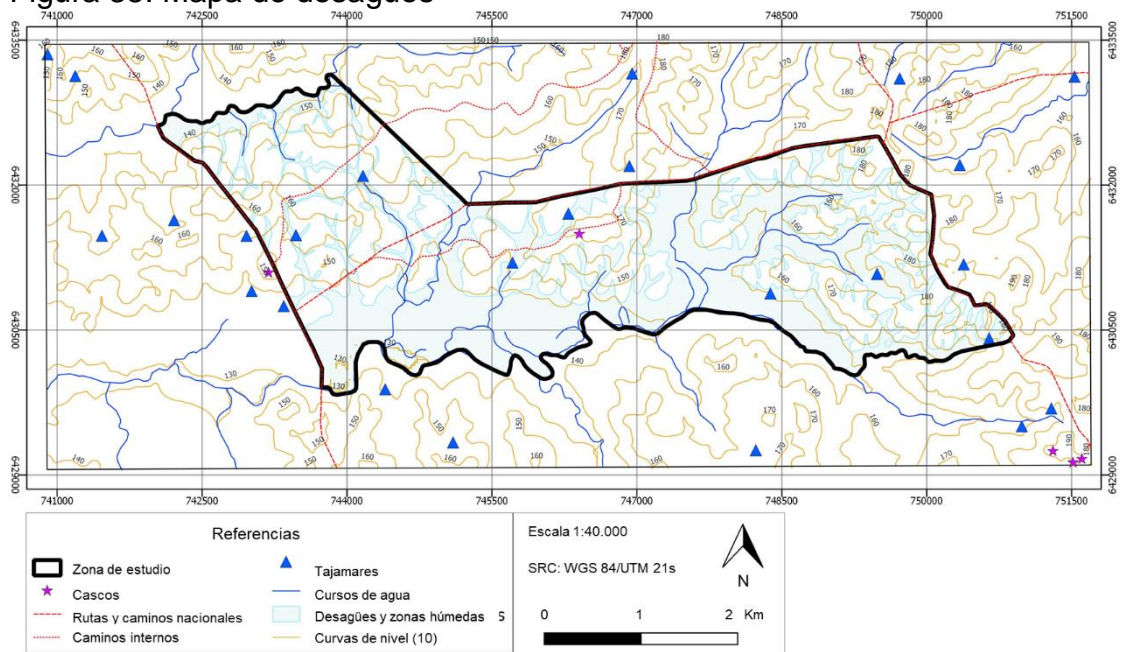


Figura 36. Llanura con migraciones de cursos, estanques y zonas húmedas

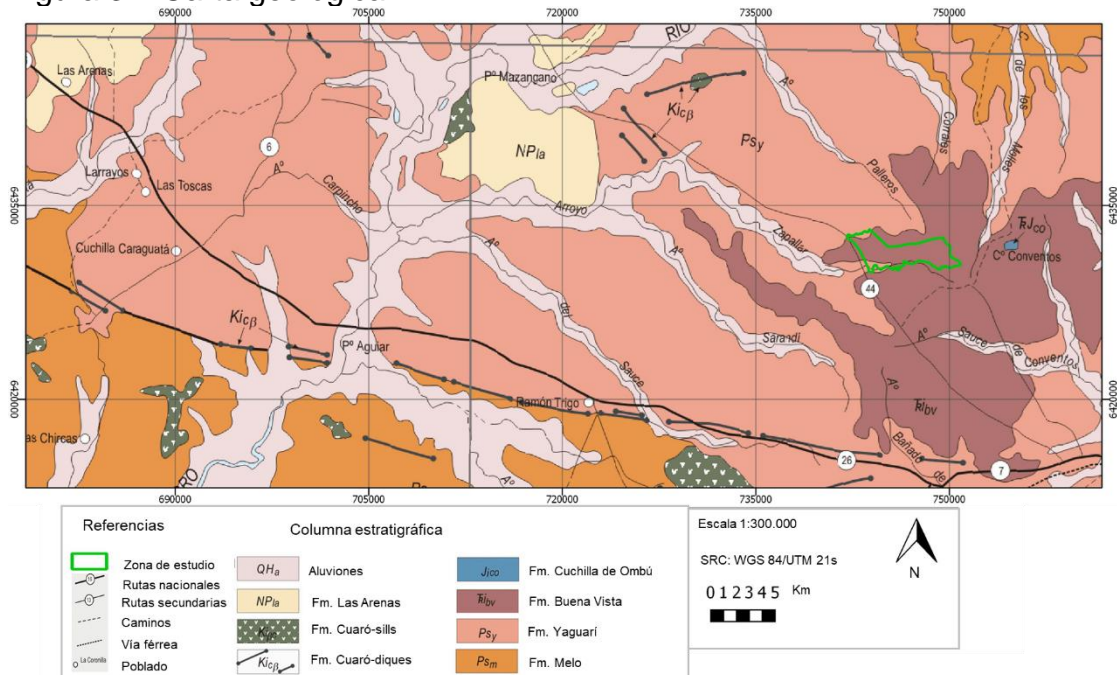




### 3.2.4 Geología

La zona de estudio se encuentra comprendida dentro de la Cuenca Norte y las Formaciones Yaguarí y Buena Vista (Figura 37) son las presentes según la Carta geológica 1/500.000 (Bossi y Ferrando, 2001).

Figura 37. Carta geológica



Fuente: modificado de Bossi y Ferrando (2001).

Según Bossi y Navarro (1988), la Fm. Yaguarí comprende, en términos generales, pelitas, areniscas finas (y medias subordinadas) y escasos calcáreos lenticulares o concrecionales. Se compone por el Miembro San Diego (basal) y el Miembro Villa Viñoles (superior). El Miembro San Diego consta de limolitas micáceas de cemento arcilloso y estratificación paralela, areniscas muy finas y escasas lutitas, ambas de estratificación ondulada o microcruzada. Los colores más frecuentes son abigarrados, oxidantes, castaños y violáceos, y los menos frecuentes son el gris, verde, y tonos de reducción. Las areniscas, siempre de color oxidantes, aparecen siempre interestratificadas en alternancias decimétricas a métricas de forma paralela con las limolitas. El Miembro Villa Viñoles comprende areniscas dominantes, finas y muy finas, bien seleccionadas, redondeadas, feldespáticas, micáceas de cemento arcillosos (a veces calcáreo) de estratificación paralela o cruzada. Los colores de las areniscas son netamente oxidantes, siendo los más comunes el rojo, violeta, marrón, amarillo, rosado los mayoritarios siguiendo los abigarrados con blanco o verde ocurriendo en menor medida colores reductores como verde y gris. Las

areniscas se alternan con limolitas micáceas y arcillosas, de dominante estratificación paralela, siendo el color más frecuente el rojo y menos frecuente el castaño o violáceo. El cemento, tanto para las areniscas como para las limolitas, está constituido por montmorillonita cálcica. Otras litologías secundarias son nódulos y lentes calcáreos, y lentes de montmorillonita cálcica.

La Formación Buena Vista, según Bossi y Navarro (1988) está integrada por areniscas finas, medias, gruesas y conglomerádicas, siempre de color rojo y feldespáticas con estratificación cruzada evidente y dominante, siendo las de grano grueso más frecuentes que las finas. Con las areniscas se interestratifican lentes calcáreos y niveles de conglomerados. Las lutitas y las rocas limosas resultan inexistentes o escasas. Los conglomerados forman lentes de hasta 1 m de potencia, compuestos por 60 a 80% de clastos bien rodados en una matriz arenosa (Bossi y Navarro, 1988). Ferrando y Andreis (1989) proponen que esta unidad está integrada por areniscas finas, hasta muy gruesas y menores cantidades de pelitas, conglomerados finos clasto sostén y conglomerados intraformacionales. El conjunto de litologías exhibe una llamativa homogeneidad cromática en tonos rojizos (10R4/6), con ocasionales estratos delgados color blanco amarillento (5Y8/2) probablemente productos de la decoloración.

La Formación Buena Vista, según de Santana et al. (2006a), se divide en dos miembros: Colonia Orozco y Cerro Conventos. El Miembro Colonia Orozco está integrado por una sucesión de areniscas finas a medias, localmente gruesas, con poca matriz pelítica, con estratificación cruzada en artesas y con laminación paralela a ondulada. Los colores dominantes son rojos. Se encuentran niveles de intraconglomerados fosilíferos que poseen clastos de arcilla roja, pelitas y limo arcillitas masivas o con laminación mal definida. Asociados a estos niveles finos, se intercalan cuerpos arenosos blanquecinos con estratificación cruzada, laminación tipo ripple y estratificación gradada inversa. Las estructuras sedimentarias predominantes de este miembro son estratificación cruzada planar, tangencial y en artesas, con estratos de pequeño a mediano porte y con ángulos bajos. Se desarrollan formas canalizadas con estratificación gradada, lineación parting y laminación fina paralela y micro estratificación cruzada por migración de ripples de corriente. Las arcillitas y pelitas arenosas rojas son masivas o con laminación plano paralela, a veces mal definida, con figuras de deformación de tipo calcos de carga. Asociadas, se localizan concreciones carbonáticas de forma elipsoidal y septarias de varios tamaños, alcanzando los 20 cm de diámetro. En la base del Miembro Colonia Orozco, los paquetes arenosos presentan en el tope ripples simétricos, con laminación ondulada interna que permite relacionarlos con el retrabajo por la acción de olas. Este miembro también presenta niveles de ortoconglomerados, clasto sostén, de composición oligomíctica, que pueden

observarse en las proximidades del Arroyo Zapallar en la ruta 26, próximos a bañado de Medina y en las proximidades de Molles. El Miembro Cerro Conventos consta de una potente sucesión de areniscas (más de 40 m) predominantemente cuarzosas, de muy buena selección, con estratificaciones horizontales y cruzadas de alto ángulo y gran porte, interpretados como depósitos eólicos duneiformes y de sabana de arena, que integran el tope de la Formación Buena Vista.

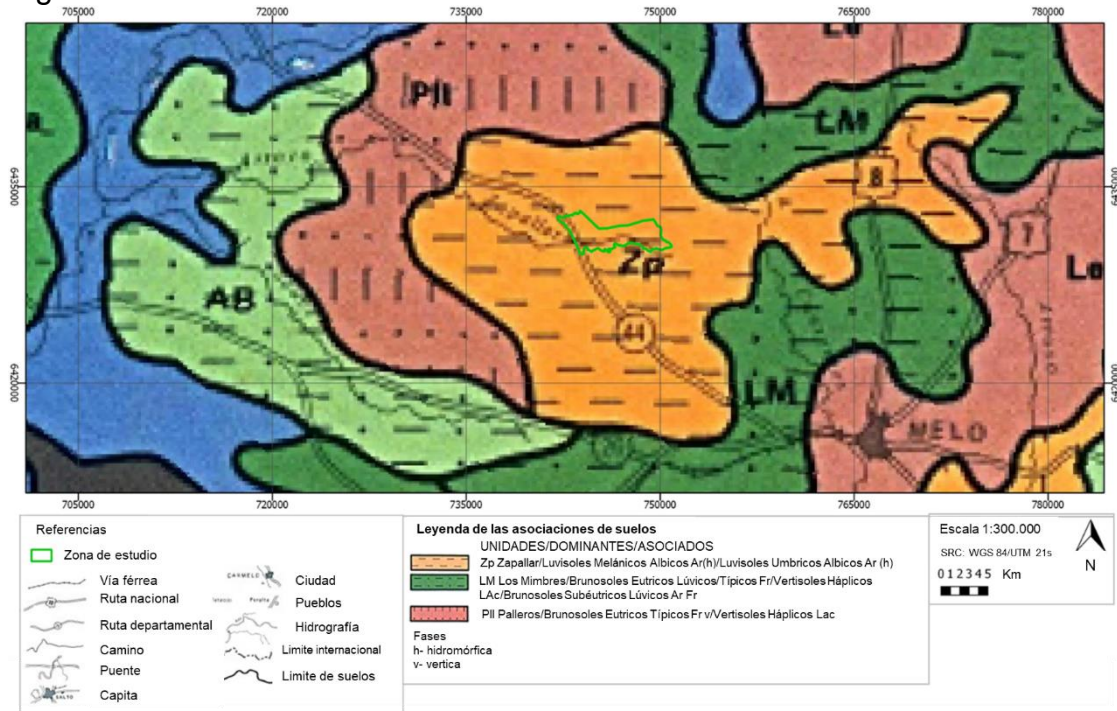
### 3.2.5 Suelos

#### 3.2.5.1 Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay

De acuerdo a la carta de reconocimientos de suelos del Uruguay (Figura 38) a escala 1:1.000.000 (MAP. DSF, 1976), la zona de estudio cae sobre la unidad de suelos Zapallar la cual consta de Luvisoles melánicos álbicos arenosos como suelos dominantes y de Luvisoles úmbricos álbicos arenosos como suelos accesorios. Rodeando a la unidad Zapallar, en las cercanías de la zona de estudio, se encuentran las unidades de suelos Los Mimbres y Palleros. La unidad Los Mimbres consta de Brunosoles eútricos lúvicos / típicos francos como suelos dominantes y como accesorios consta de Vertisoles háplicos limo arcillosos y Brunosoles subéutricos lúvicos arenosos y francos. La unidad Palleros tiene como suelos dominantes Brunosoles eútricos típicos francos y Vertisoles háplicos limo arcillosos. Las descripciones de suelos y datos analíticos de cada unidad mencionada se encuentran en el Anexo 1.



Figura 38. Carta de reconocimientos de suelos a escala 1:1.000.000

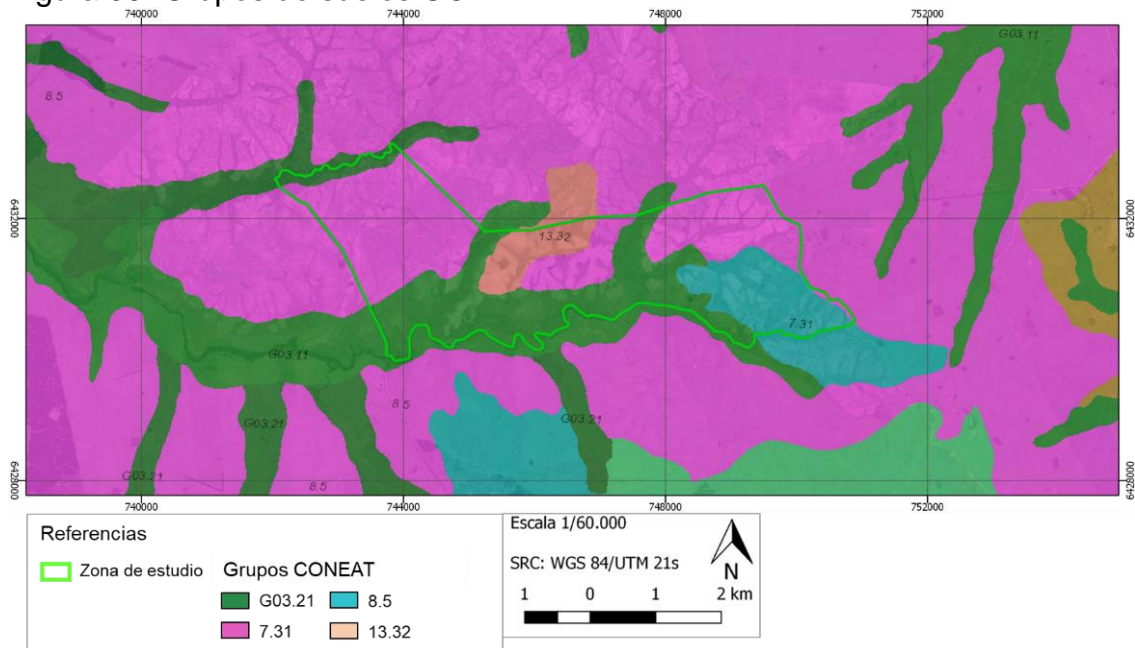


Fuente: modificado de MAP. DSF (1976).

### 3.2.5.2 Grupos de suelos CO.N.E.A.T.

Los grupos CO.N.E.A.T. constituyen áreas homogéneas, definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana en pie, no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelo. Estos grupos son caracterizados mediante fotointerpretación a escala 1:40.000, verificaciones de campo y análisis físico-químicos de los suelos (MGAP. DGRN, 2020). Los grupos CO.N.E.A.T. presentes en el área se muestran en la Figura 39.

Figura 39. Grupos de suelos CO.N.E.A.T.



Fuente: modificado de MGAP. DGRN (2020).

El grupo G03.21 comprende las llanuras medias y altas, adyacentes o no a vías de drenaje, con pendientes prácticamente de 0%, aunque puede haber mesorrelieve. Los suelos son Planosoles dístricos ócricos úmbricos, de textura generalmente franca a franca arenosa, profundos, de colores variables y drenaje imperfecto. Como asociados, se encuentran Brunosoles subéutricos típicos, francos, de colores oscuros, profundos y drenaje imperfecto. Debido a su mal drenaje pueden pasar encharcados algún tiempo.

El material geológico del grupo 7.31 consta de areniscas rojas, poco litificadas, apoyadas sobre areniscas de Tacuarembó. El relieve es de colinas sedimentarias no rocosas, con pendientes de 6-10%. Los suelos dominantes son acrisoles ócricos típicos (praderas arenosas rojas) muy profundos, de color pardo rojizo, textura arenoso franca, bien drenados y fertilidad extremadamente baja. Asociados, aparecen acrisoles ócricos álbicos muy profundos, de color pardo oscuro, textura franco arenosa, bien drenados y fertilidad extremadamente baja. Se remarca la aptitud para excelentes montes de *Eucalyptus*.

El grupo 8.5 está integrado por la asociación de suelos localizada entre los arroyos Zapallar y Sarandí, en el dpto. de Cerro Largo. El material geológico lo constituyen areniscas rojas de la Formación Yaguarí o areniscas redepositadas sobre esta. El relieve es de colinas sedimentarias no rocosas y lomadas fuertes con pendientes de 5 a 10%. Los suelos dominantes son

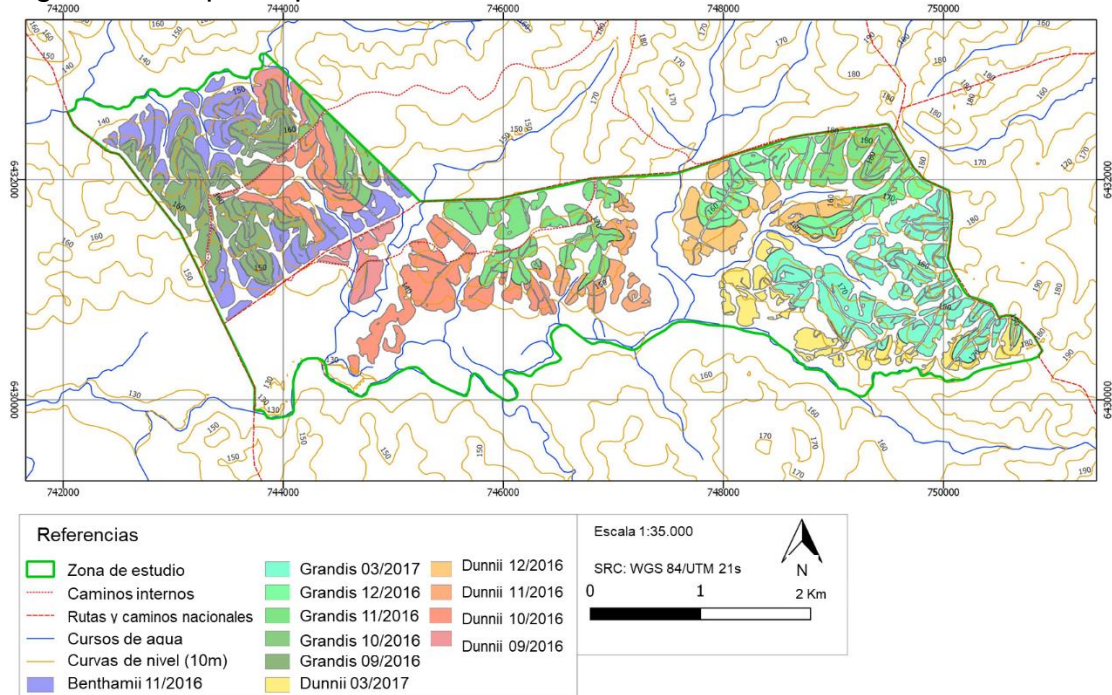
Luvisoles melánicos álbicos (praderas arenosas) moderadamente profundos, de color pardo oscuro, textura franco arenosa, imperfectamente drenados y fertilidad muy baja. Asociados, se encuentran Luvisoles úmbricos álbicos (praderas arenosas), muy profundos, de color pardo oscuro, textura franco arenosa, imperfectamente drenados y fertilidad extremadamente baja.

El grupo 13.32 está integrado por la asociación de suelos que ocupa una extensa zona entre ruta 44, el Río Negro y la cañada Aceguá. El material geológico está formado por sedimentos finos de la Formación Yaguarí o depositados sobre ésta. Los suelos dominantes son Brunosoles eútricos típicos (praderas negras), profundos, de color negro, textura franca, bien drenados y fertilidad alta y Vertisoles háplicos (grumosoles) moderadamente profundos de color negro, textura arcillosa bien drenados y fertilidad muy alta. Se corresponde con la unidad Palleros de la carta a escala 1:1.000.000 (MGAP. DGRN, 2020).

### 3.3 PLANTACIONES FORESTALES

La información sobre las plantaciones fue brindada por la empresa UPM. La zona en estudio cuenta con plantaciones de *Eucalyptus grandis*, *dunnii* y *benthamii* distribuidas como se aprecia en la Figura 40 y con las características que se resumen en el Cuadro 5.

Figura 40. Mapa de plantaciones



Cuadro 5. Atributos de las plantaciones

Especie	Propagación	Fecha de plantación	Sup. (ha)	Sup. (%)
<i>E. benthamii</i>	Semilla	11/2016	79	12
<i>E. dunnii</i>	Semilla	9/2016 al 3/2017	225	34
<i>E. grandis</i>	Clonal	9/2016 al 3/2017	352	54

La preparación del sitio consto de arado superficial y subsolado profundo (0.70 m) siguiendo las curvas de nivel. El marco de plantación es de 2 metros entre árboles y 4 metros entre filas.

### 3.4 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.4.1 Elección de la área y sitios de estudio

Con motivos del Proyecto I + D 2016: “Caracterización de la Formación Yaguarí, una unidad de gran extensión al Noreste de Uruguay”, financiado por CSIC, se realizaron numerosas salidas de campo con el objetivo de realizar mapas geológicos a escala 1/100.000 en parte de los departamentos de Cerro

Largo, Rivera y Tacuarembó. De dichas salidas surgió la oportunidad de determinar la zona de estudio, que comprende parte del establecimiento “La Baguala” de la empresa forestal UPM, que cuenta con plantaciones recientes de *Eucalyptus*, cercanía al casco de la empresa propietaria, cercanía a la estación experimental de Facultad de Agronomía Bernardo Rosengurt (EEBR) y lo más relevante, se identificó una buena cantidad de afloramientos y suelos forestales, motivos que llevaron a su elección.

#### 3.4.2 Elección de sitios para calicatas profundas

Para estudiar el desarrollo radicular profundo, así como el estudio integral del perfil suelo-saprolita-roca (SSR), se realizaron calicatas profundas por medio de una máquina retroexcavadora que asegurase el llegar a la profundidad donde se encontrasen las rocas. Los criterios iniciales de selección de los sitios para realizar las calicatas fueron que las litologías y los suelos fueran diferentes, y que tuvieran plantados rodales de *E. grandis*, dado que es la especie comercial más común y que no presentaba problemas de crecimiento en la zona de estudio. Se seleccionaron 2 sitios donde ya existían canteras abiertas que mostrasen el desarrollo del perfil SSR, además de corroborar la extensión de dicho comportamiento hacia dentro de las líneas de plantación por medio de numerosos muestreos con taladro holandés extensible. Se seleccionaron otros 2 sitios para realizar calicatas profundas, pero con la diferencia de que no poseían canteras abiertas en sus cercanías, pero en donde sí se podían encontrar cerca afloramientos de rocas que permitían inferir que los rodales cercanos se encontraban en otras litologías y suelos diferentes a los de los otros 2 sitios previamente seleccionados. Para estos 2 últimos sitios se realizó un amplio y numeroso muestreo con taladro holandés extensible para confirmar el tipo de litología y suelo que se encontraban asociados al rodal seleccionado a ser excavado. Posteriormente la idoneidad de estos sitios se confirmaría por medio del mapa geológico a realizarse. Las calicatas fueron realizadas en la primera hilera dentro de los rodales, abarcando 2 a 3 árboles. A su vez, todos los sitios donde se realizaron las calicatas profundas deberían de contar con buena accesibilidad, dado que la retroexcavadora contratada debería realizar la operación de apertura y cerrado de las calicatas en solo un día de trabajo, lo cual condicionó toda la operativa de la investigación relacionada a las calicatas profundas.

### 3.4.3 Descripción de raíces en las calicatas profundas

Dada la limitante de tiempo y los objetivos planteados para este trabajo, los parámetros que se optaron por medir para las raíces en las calicatas profundas fueron: presencia de raíces, diámetro, resistencia a la rotura vinculada a la presencia de tejido leñoso, disposición (horizontal, vertical o inclinadas) y caracteres morfológicos resaltantes. Por medio de criterios visuales y físicos se pudo delimitar con seguridad hasta donde alcanzaban las raíces herbáceas de la escasa vegetación diferente a los árboles. Se procedió a limpiar un sector vertical completo del perfil (desde la superficie al piso de la excavación) para exponer observar en primera instancia a las raíces gruesas (mayores a 2 mm de diámetro) y con cierto grado de tejido leñoso (tejidos suberoso apreciable, color marrón y resistencia a la rotura con los dedos) y luego a las raíces finas (menores a 2 mm de diámetro) y no tan leñosas conectadas directamente o que provenían con cierta confianza de las leñosas. Se procedió a tomar fotografías de todo el sector para registrar las características de las raíces y a tomar muestras de raíces gruesas y finas de la parte superior del perfil, así como de la parte inferior para realizar cortes histológicos. Las muestras colectadas fueron guardadas en heladera y formaldehído.

### 3.4.4 Descripción del perfil suelo-saprolita-roca (SSR) en calicatas profundas

La apertura de la calicata por medio de la retroexcavadora se realizó hasta la profundidad en la cual la roca comenzara a ser expuesta con certeza. Lateralmente se procuró cubrir dos o tres árboles siguiendo la línea de plantación, permitiendo además el adecuado ingreso y trabajo en la calicata.

En la descripción de las calicatas profundas se propuso como objetivo describir el perfil completo, lo que implica definir hasta donde llegan y cuáles son los contactos entre el suelo, el saprolito y la roca. Rose et al. (2003) indican que existe la necesidad de redefinir el concepto de suelo para poder incluir la zona de roca meteorizada que soporta crecimiento radicular. El horizonte C es el horizonte que presenta mayores dificultades en su descripción y definición (Pedron et al., 2009).

Según la FAO (2009) el horizonte A se caracteriza por ubicarse en la superficie o por debajo de un horizonte O, donde la estructura de la roca original ha sido borrada y presenta una acumulación de materia orgánica humificada, propiedades resultantes de los cultivos y una morfología diferente del infrayacente horizonte B. El horizonte E se caracteriza por perder arcilla, hierro, aluminio o una combinación de las anteriores, dejando una concentración de arena y limo donde mucha o toda la estructura de la roca ha sido borrada. El



horizonte B está por debajo de los A, E, H u O, en donde se ha borrado toda o la mayoría de la estructura de la roca original, en conjunto con una o combinaciones de: concentración iluvial (arcilla, hierro, etc), evidencia de remoción de carbonatos, cambios de coloración y formación de estructuras granulares, bloques o prismáticas. El horizonte C o capa C, es el que está poco afectado por procesos pedogenéticos, carentes de las propiedades de los horizontes H, O, A, E, B, excluye a la roca consolidada y las raíces de las plantas lo pueden penetrar. Se incluyen sedimentos, saprolita y rocas inconsolidadas.

Según McKay et al. (2005) el saprolito es el material formado por una extensa meteorización de una roca madre y que todavía retiene características de la roca madre, como las estructuras sedimentarias y las fracturas, además de contener características del suelo como porosidad alta, arcillas traslocadas, minerales arcillosos neoformados, óxidos de Fe/Mn y marcas de bioturbación. Según Pedron et al. (2009) el horizonte C se define al predominar la estructura del suelo y la capa Cr (saprolito muy alterado) cuando se mantiene la estructura de la roca, pero puede ser excavado con una pala. El saprolito es considerado horizonte cuando no ofrece resistencia a la excavación manual con pala recta y presenta predominio de estructura del suelo, mientras que si mantiene la estructura de la roca sería designado como capa y se usa la simbología Cr.

Según FAO (2009) la capa R es la consistente con la roca consolidada que subyace al suelo, que puede contener grietas, pero estas son tan pocas o tan pequeñas que pocas raíces pueden penetrarla. Las grietas pueden estar revestidas o rellenas con arcillas u otro material. Según Pedron et al. (2009) la roca no meteorizada es la capa R, no puede ser excavado por la pala, siendo el contacto litio cuando se encuentra a la roca moderadamente alterada marcado por la resistencia mecánica a la excavación de las raíces.

Pedron et al. (2009) ante la dificultad de enmarcar contactos entre el suelo y el saprolito, proponen nuevos contactos entre capas (Cuadro 1). Los autores hacen énfasis en la importancia de la penetración radicular para limitar capas y definir los contactos, pero hacen una superficial descripción de las características de las rocas y utilizan el criterio de excavación por pala recta o golpes de pico como característica relevante. Sin embargo, Pedron et al. (2010) indican que la prueba de pala recta impone una dificultad para la aplicación estandarizada a campo, por lo que proponen el método de penetrometro de impacto para estandarizar a campo esta prueba de resistencia a la excavación.

Al describirse las calicatas profundas en este trabajo se clasificaron los horizontes de suelo con los criterios anteriormente mencionados, además de su espesor, textura, estructura, transición, moteados, concreciones y reacción al

ácido clorhídrico y sus propiedades asociadas: relieve general, relieve local, pendiente, rocosidad, pedregosidad, erosión actual, inundación y drenaje externo. En las capas más profundas se realizaron anotaciones más detalladas y se separaron tentativamente capas con características morfológicas destacables. Según la propuesta de Pedron et al. (2010) para describir capas y contactos líticos y saprolíticos, y considerando las propuestas de grados de meteorización de la roca MGAP. DGRN (2014), se desarrolló una nueva propuesta (Cuadro 6) de descripción cualitativa macroscópica para las situaciones puntuales de este trabajo, en pos de avanzar en que criterios enfocarse a describir del saprolito desarrollado sobre litofacies particulares e identificables.



Cuadro 6. Descripción cualitativa macroscópica para horizontes y capas profundas del suelo, saprolito y roca (SSR)

	Descripción general
Capa R  (roca fresca)	Sin decoloraciones o incipientes notoriamente actuales
	Estructuras sedimentarias fácilmente reconocibles
	Litología identificable
	Fracturas distanciadas
	Acumulaciones muy escasas de Fe-Mn en caras de fracturas (laminares)
	Fósiles
Capa Rr  saprolito (roca alterada)	Pocas decoloraciones producida por proceso actuales
	Estructuras sedimentarias apreciables
	Litología identificable
	Fracturas que inician a rellenarse con materiales finos conectadas escasamente
	Escasas acumulaciones de Fe-Mn en caras de fracturas (laminares)
	Cuadro 6 continuación
Capa CrR  saprolito (roca muy alterada)	Decoloraciones frecuentes asociadas claramente a procesos actuales
	Estructuras sedimentarias difícilmente apreciables, se identifica la estratificación original de la roca
	Litología identificable pero con dificultad
	Fracturas más abundantes, interconectadas en varios planos, que pueden estar rellenas por materiales finos
	Frecuente acumulación de Fe-Mn en forma de manchas y laminares
Capa Cr  saprolito (horizonte C alterado)	Las decoloraciones desde el color original son muy frecuentes
	El color general cambia de matiz (por ejemplo 10 R hacia 10 YR)
	Las estructuras sedimentarias son poco reconocibles y se conservan en fragmentos dispersos donde la litología todavía es reconocible.
	La estratificación original de la roca se conserva de forma difusa o en algún sector del material
	Se comienzan a reconocer algunas estructuras granulares, bloques o prismáticas.
	Comienzan a aparecer dispersas concreciones Fe/Mn, moteados y bioturbación

	Las fracturas son difíciles de reconocer al ser muy frecuentes, pequeñas y muy interconectadas en varios planos.
Horizonte C	Pocos procesos pedogenéticos claros. Translocación de arcillas, moteados, revestimientos, concreciones y bioturbaciones reconocibles.
saprolito	Estructura de suelo en etapa incipiente pero clara, ya sean estructuras granulares, bloques o prismáticas.
	Cambio de color en valor o en croma
	Estratificación original de la roca apenas reconocible
	Fragmentos de roca meteorizada pero reconocibles
	Las fracturas ya no son reconocibles como tales

De todos los horizontes o capas definidos de las 4 calicatas se colectaron muestras para realizar análisis químicos y físicos. Se tomaron de 4 a 3 muestras para densidad aparente por el método de cilindros y se realizaron mediciones con penetrómetro. En particular para el saprolito se procuró tomar muestras de todos los horizontes, capas o niveles que mostrasen alguna característica particular o cambio apreciable en la vertical y/o lateral dada la dificultad de descripción en esta zona de transición.

Los perfiles realizados con taladro holandés extensible se hicieron hasta la profundidad donde se identificó a la roca fresca o meteorizada, que por lo general dificultaba el continuar dada la dureza del material. Las descripciones constaron de designación de los horizontes (o capas en ciertos casos complejos), por medio de su espesor, textura, estructura, transición, moteados, concreciones y reacción al ácido clorhídrico. Además, se describieron las propiedades asociadas: relieve general, relieve local, pendiente, rocosidad, pedregosidad, erosión actual, inundación y drenaje externo. El saprolito se describió con criterios edafológicos y geológicos, dada la naturaleza de material de transición del mismo.

### 3.4.5 Análisis y estudios de laboratorio

#### 3.4.5.1 Análisis químicos y físicos del perfil suelo-saprolita-roca (SSR)

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio del Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía. Todas las muestras obtenidas de los perfiles SSR de las calicatas y algunos perfiles de suelos realizados a taladro holandés fueron secadas a estufa por 48 horas a 40°C y molidas a un tamaño menor a 2 mm.

Se determinaron:

- Textura por método el método de Bouyoucos (1962),
- Materia orgánica por oxidación con  $K_2Cr_2O_7$  en  $H_2SO_4$  (Walkey y Black, 1934),
- Cationes intercambiables (bases) por extracción con acetato de amonio 1M y determinación por absorción atómica y espectrofotometría de emisión (Isaac y Kerber, 1971),
- Fósforo disponible (P Bray I) por el método analítica Bray No1 y determinación colorimétrica a 660 nm (Bray y Kurtz, 1945)
- pH  $H_2O$  relación 1:1 por medio de electrodo de actividad específica y
- Acidez intercambiable
- Resistencia a la penetración por un penetrómetro de cono
- Densidad aparente por método de anillos (García-Préchac et al., 1974).
- CIC pH 8.2 es estimada (Califra, 2012)

Las rocas modales seleccionadas de los diferentes afloramientos, en función de sus características texturales y estructurales observadas a campo (selección sustentada también por los siguientes estudios a mencionarse), también fueron secadas a horno durante 48 horas a  $40^\circ C$  y luego se determinó su textura por el método de Bouyoucos (1962). Luego de obtener la fracción arena de las rocas modales y de las correspondientes a las calicatas profundas, se procedió a tamizar dicha arena en sucesivos filtros y pesarla para obtener las correspondientes cantidades de las fracciones arena muy gruesa (1.0-2.0 mm), gruesa (0.5-1.0 mm), media (0.25-0.5 mm), fina (0.125-0.25 mm) y muy fina (0.0625-0.125 mm).

#### 3.4.5.2 Observaciones de raíces, saprolita y rocas

Se observaron a lupa (Olympus sz61) las muestras de los perfiles SSR para describir y fotografiar la relación de los diferentes horizontes (o capas) y rocas con las raíces de diferentes tamaños, en particular las más finas no perceptibles al ojo. En conjunto con lo observado in situ, las fotografías tomadas y lo observado en laboratorio se utilizaron los criterios proporcionados por McCormack et al. (2015) para clasificar las raíces finas. Estos criterios exponen que dentro de las raíces menores a 2 mm de diámetro se pueden diferenciar las raíces por su función en absorbentes y/o transporte. Las raíces finas se pueden dividir en categorías según su orden de ramificación, grosor y desarrollo de tejidos primarios (Figuras 1 y 2). Muestras de las secciones más profundas de las calicatas se estudiaron por medio de microscopio electrónico de escaneo en el laboratorio de Geología (CURE 33) y en microscopio electrónico de barrido en el laboratorio de microscopía electrónica de barrido (Facultad de Ciencias) para observar la posible relación de las raíces más finas y profundas con materiales diferentes al suelo superficial.

En el laboratorio de Botánica (Facultad de Agronomía) se realizaron cortes histológicos por medio de un micrótopo de mano y tinción en azul de toluidina. Se realizaron cortes de raíces profundas alojadas en la roca o saprolito y cortes comparativos entre raíces superficiales y profundas.

También por medio de la lupa se observó en las rocas la composición mineral de los sedimentos, el tamaño de grano, la esfericidad y el redondeamiento como complemento a las observaciones de campo para definir las muestras modales. Las diferentes fracciones de arena obtenidas también fueron observadas a lupa para confirmar las características en la medida de lo posible las características mineralógicas de los detritos, así como las características morfológicas de los granos.

#### 3.4.6 Definición de litofacies

Una facies es definida como un arreglo particular de atributos en los sedimentos: una litología característica, suite de estructuras sedimentarias, contenido fósil, color, geometría etc. Para las facies es mejor referirse objetivamente en términos puramente descriptivos, usando unos pocos adjetivos pertinentes, pudiendo ser numeradas o referidas por letras. Algunas facies pueden ser interpretadas en términos de ambiente y condiciones deposicionales, mientras que otras no son ambientalmente diagnósticas y son tomadas en el contexto de facies adyacentes. En sucesiones sedimentarias se pueden encontrar un grupo de facies que ocurren juntas para formar una "asociación de facies". Esta asociación comprende una asociación donde generalmente se depositan en el mismo ambiente amplio, en el cual hubo varios y diferentes procesos deposicionales operando, subambientes o fluctuaciones distintivas en las condiciones deposicionales (Tucker, 2003).

Se utilizaron como base las pautas y códigos propuestos en Tucker (2003) y las pautas determinadas por Miall (1977, 2006, 2014, 2016) y se obtuvieron las facies que se observan en el Cuadro 7 ajustadas para este trabajo.

Cuadro 7. Códigos de litofacies definidas para este trabajo

Prefijos	Litologías	Calificativos
c- gruesa	G- Grava	m- Masiva
m- media	S- Arena	p- Estratificación cruzada planar
vf- muy fina	F- Finas	t- Estratificación cruzada en artesa
f- fina		r- Ondulitas
		h- Horizontal - laminación
		f- Flaser
		g-Estratificación cruzada herringbone
		a- Superficies de reactivación
		n- Gradación normal
		i- Intraclastos
		e- Extraclastos
		c- Concreciones

Fuente: modificado de Tucker (2003).

#### 3.4.7 Cartografía geológica y de suelos

Se realizó fotointerpretación para elaborar mapas geológicos y de suelos que permitieran identificar afloramientos y diferentes unidades homogéneas, para organizar el trabajo de campo posterior. Para ello, se realizó estereoscopia en fotos aéreas 1/40.000 y 1/20.000 del año 1967 del Servicio Geográfico Militar (SGM), observación de imágenes satelitales en Google Earth, Bing Satellite y en IDEuy, además se utilizaron cartas topográficas 1/50.000 del SGM y modelos digitales de relieve de la base digital del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). Durante todo el proceso cartográfico se utilizó el Sistema de Información Geográfico QGIS.

El procedimiento de recolección de información geológica a campo consistió en recorrer todos los afloramientos determinados en la fotointerpretación, tanto dentro de la zona de estudio como cercanos que pudieran aportar al contexto geológico. La información recabada de los mismos consta de ubicación, fotografías, descripción litológica, descripción de las estructuras, así como medición de paleocorrientes y recolección de muestras. En las áreas donde no se tuviera un buen número de afloramientos o incertidumbre del material geológico, se realizaron perforaciones con taladro holandés extensible hasta alcanzar a la roca fresca. También fueron descritas

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS DE GEOLOGÍA

Una de las premisas de este trabajo se basa en conocer de manera clara las litologías para proceder en la descripción macroscópica de los perfiles SSR (suelo-saprolito-roca), por lo que se ha realizado un estudio geológico de la zona de estudio para caracterizar las rocas presentes, seleccionar las unidades geológicas que más influyen en la zona cultivada y seleccionar los sitios en donde realizar las calicatas. Además de posibilitar la correcta descripción del perfil SSR, de acuerdo con Christina et al. (2012) las capas R o rocas podrían ser potencialmente un medio en sí mismas para el crecimiento radicular de donde los arboles obtendrían nutrientes y fundamentalmente agua.

El estudio geológico se sintetiza en un croquis geológico, el cual servirá de insumo para inferir las características de los suelos, así como criterio para confirmar la selección de los sitios a realizar las calicatas profundas.

#### 4.1.1 Litofacies

Una vez recolectada la información de campo y realizados los estudios de laboratorio necesarios, se sintetizó de forma práctica la información en litofacies sedimentarias. Utilizando como base las pautas y códigos (Cuadro 7) propuestos en Tucker (2003) y las pautas determinadas por Miall (1977, 2006, 2014, 2016) se obtuvo la siguiente clasificación de litofacies ajustadas para este trabajo (Cuadro 8).

Cuadro 8. Litofacies definidas para este trabajo y su descripción resumida

Código	Descripción
cSGtn	Arenisca gruesa a conglomerádica, estratificación cruzada en artesa y gradación normal
Gi	Conglomerado intraformacional
Ge	Conglomerado extraformacional
Gtn	Arenisca conglomerádica, estratificación cruzada en artesa incipiente y gradación normal
cSGtie	Arenisca gruesa a conglomerádica, estratificación cruzada en artesa, intraclastos y exoclastos
mfSpp	Arenisca meda a fina, estratificación cruzada planar
mfSh	Arenisca media a fina, estratificación flaser
mfSf	Arenisca media a fina, estratificación flaser
mfShc	Arenisca media a fina, estratificación plano paralela interestratificadas y a veces concreciones carbonaticas
Fm	Pelita arenosa masiva
fmSr	Areniscas finas a medias, ondulitas
fSt	Areniscas finas, estratificación cruzada en artesa
vfSp	Areniscas muy finas, estratificación cruzada planar
vfShf	Areniscas muy finas, estratificación horizontal-laminada y flaser
vfSga	Areniscas muy finas y finas, estratificación cruzada herringbone y/o superficies de reactivación
vfShf	Areniscas muy finas, estratificación horizontal-laminación y a veces con estratificación flaser
Fhf	Pelita arenosa con estratificación horizontal, laminación y estratificación flaser
+	Asociación de facies

#### 4.1.1.1 Asociación de litofacies mfShc + Fm

Estas litofacies ocurren juntas y comprenden los puntos de campo modales PMZ-026, 027 y PFY-140 (accesorios PFY-133, 134, 135, 136 y 137). Punto de campo PMZ-026: presenta interestratificación plano paralela de areniscas medias a finas (o más finas en algunos casos) gris claro con areniscas medias de color amarillento oscuro de escasos centímetros de espesor, laminadas y de cemento arcilloso. En la base se encuentra un nivel de pelita arenosa gris oscura y masiva. Aparecen algunos niveles hacia la parte superior de arenisca media amarillenta, más gruesos y más resistentes con escaso cemento calcáreo. Todo el paquete interestratificados presenta mucha biotita y más proporción de feldespatos que de cuarzo en la fracción arena. Los

estratos hacia la cima presentan un aumento de tamaño de grano, llevando a que dominen la arenisca media. El conjunto de rocas en este punto presenta un alto grado de buzamiento (Rbz N80W/30°N10W), lo que podría estar apoyando un desplazamiento por fallas que se observa en los puntos aledaños.

Figura 41. Punto de campo PMZ-026

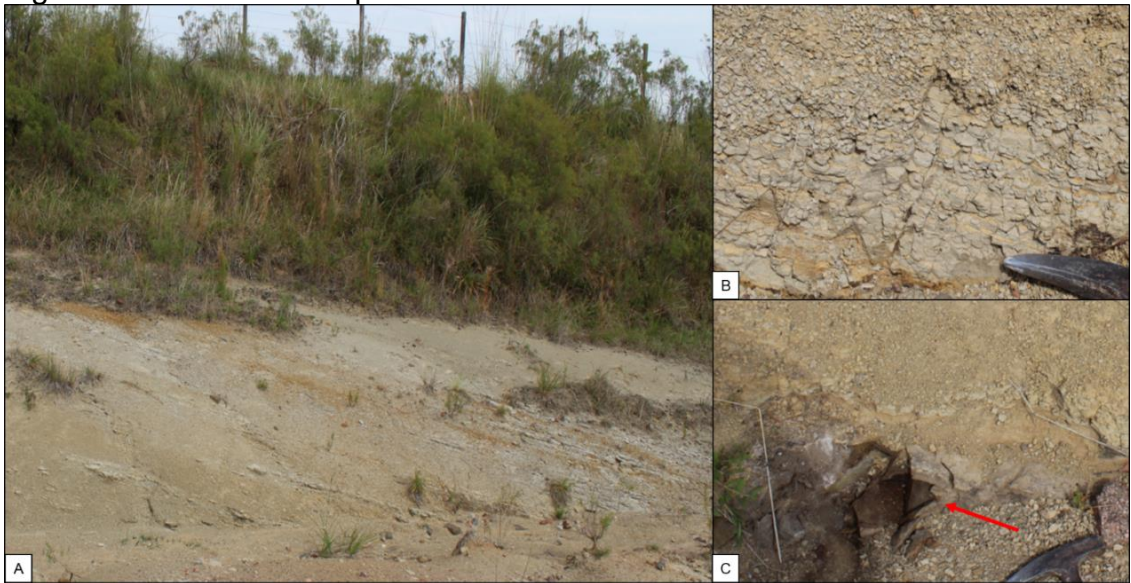


Imagen A- Alta inclinación e interestratificación B- Acercamiento de la interestratificación de las areniscas medias a finas, grises con las areniscas medias amarillentas C- Nivel de pelita arenosa gris oscura.

La calicata PFYC-03 es cercana al punto PMZ-026 y se vincula al mismo por las pelitas masivas grises. En estas pelitas de la calicata se encontraron numerosos fósiles de tallos, hojas y frondas fragmentadas de *Glossopteris* y de *Pecopteris* (Figuras 42 y 43).



Figura 42. Fósiles de *Glossopteris*

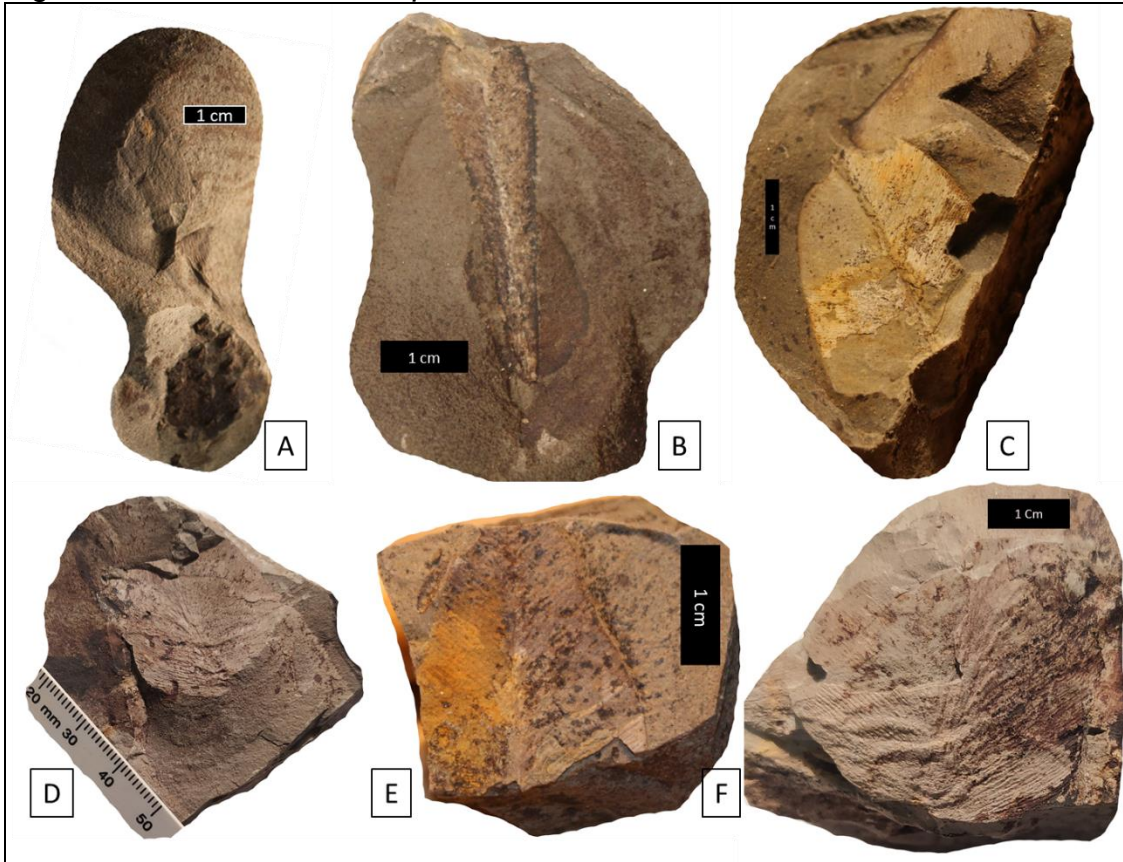


Figura 43. Fósiles de *Pecopteris*



Punto de campo PMZ-027: este punto corresponde a la continuación de la arenisca superior del punto PMZ-026, siendo un afloramiento que expone pocas estructuras, encontrándose algunos lentes pelíticos bordó (estratificación flaser) que se asociarían a pequeños ripples. El cambio hacia colores oxidantes es importante en este punto. Se encuentran areniscas medias, cuarzo feldespáticas con biotita, que van cambiando gradualmente a colores rosa con cemento arcilloso. También se aprecian colores amarillentos con patrones muy definidos que podrían ser por decoloración. En su conjunto se aprecia que la estratificación esta inclinada, buzando igual que en el punto PMZ-026, además



de presentar muchas fracturas lo que podría deberse al mismo evento por falla inversa que expone a estas y a las anteriores litologías.

Figura 44. Punto de campo PMZ-027

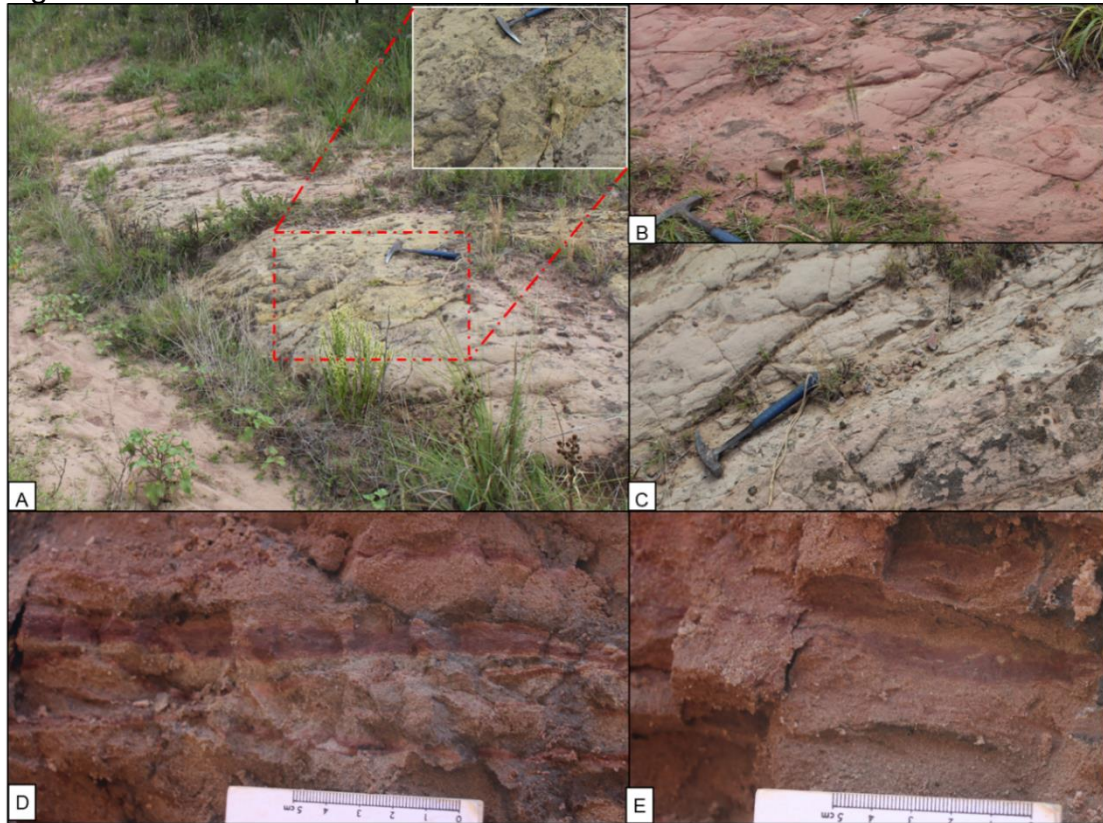


Imagen A- Panorámica del afloramiento mostrando el cambio hacia tonalidades oxidantes; en el recuadro un acercamiento a las decoloraciones con patrones rectilíneos B- Fracturas en diferentes orientaciones C- Disposición inclinada de la sedimentación original D y E- Estratificación flaser (E y D son imágenes de la calicata PFYC-04 adyacente).

Punto de campo PFY-140: en la base se encuentra un nivel de pelita arcillosa masiva de color rojo vivo, gris y marrón con posible variación del color por decoloración. Hacia la cima esta pelita va ganando arena y carbonato hasta formar un nivel de arenisca calcárea concrecional, luego ocurre otro nivel de pelita arcillosa de color marrón, seguido por 1 metro de arenisca media rosa y marrón muy cementada por carbonato y otro nivel de arenisca rosa de cemento arcilloso. Las areniscas son cuarzo feldespáticas y la biotita es muy frecuente siendo el cemento dominante el arcilloso. No se aprecia con confianza el arreglo de estas rocas dada la generación de suelo en la pared de la cuneta donde se exponen. Se encuentra un juego de diaclasas de varios ángulos muy poco visible por el relleno del camino que podría indicar la presencia de movimiento por fallas.

Figura 45. Punto de campo PFY-140



Imagen A- Nivel de arenisca cementadas y concreciones B- En líneas rojas se indican las fallas y la inclinación de los estratos el NE.

#### 4.1.1.2 Asociación de litofacies Fhf+vfShf + fmSr + vfSga

Este grupo de litofacies ocurren en conjunto, pudiéndose reconstruir una sucesión confiable. Serán descritas en subgrupos por practicidad para ser identificables a campo.

Subasociación de litofacies Fhf+vfShf: esta subasociación comprende los puntos de campo PFY-119 y 152 y se encuentra estratigráficamente por debajo de las otras litofacies. La pelita arenosa con mucha biotita, es laminada y horizontal, encontrándose hacia la cima algunos lentes de arena media a fina, marrón oscura (flaser). La arenisca muy fina es de color rojizo con niveles decolorados a blanco más friables, laminada, bien seleccionada, con mucha biotita, algo de muscovita, y cemento arcilloso. Se pueden encontrar asociados a incipientes ripples acumulaciones de arena media a fina de color marrón oscuro (flaser).



Figura 46. Puntos de campo PFY-119 (A) y PFY-152 (B)

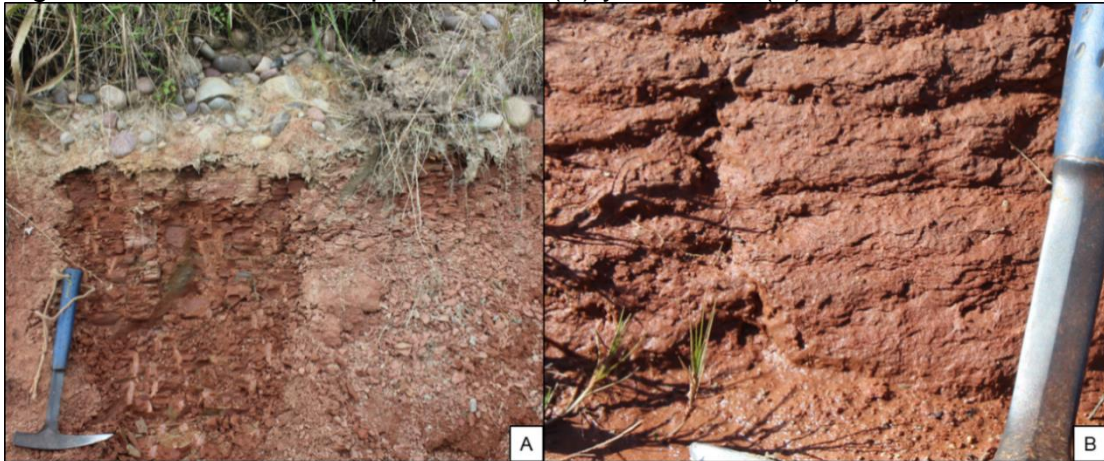


Imagen A- Pelita arenosa horizontal con un aluvión de cantos rodados por encima B- Arenisca muy fina laminada.

Litofacies fmSr: esta facies comprende los puntos de campo PFY-104, 114, 115, 116, 120, 153. Comprende areniscas finas a medias, cuarzo feldespáticas, con escasa biotita, bien seleccionadas, con estructuras de ripples por oleaje casi simétricos. Son de color rosa a anaranjado, a veces fuertemente cementadas con carbonato de calcio que puede recristalizar en cristales de 2-3 mm. A veces los niveles cementados con ripples se encuentran intercalados por areniscas medias. Presentan direcciones de paleocorrientes hacia el NW y NE. En las areniscas menos cementadas se pueden presentar concreciones de carbonato aisladas.

Figura 47. Puntos de campo PFY-104 (A), 120(B) y 116 (C)

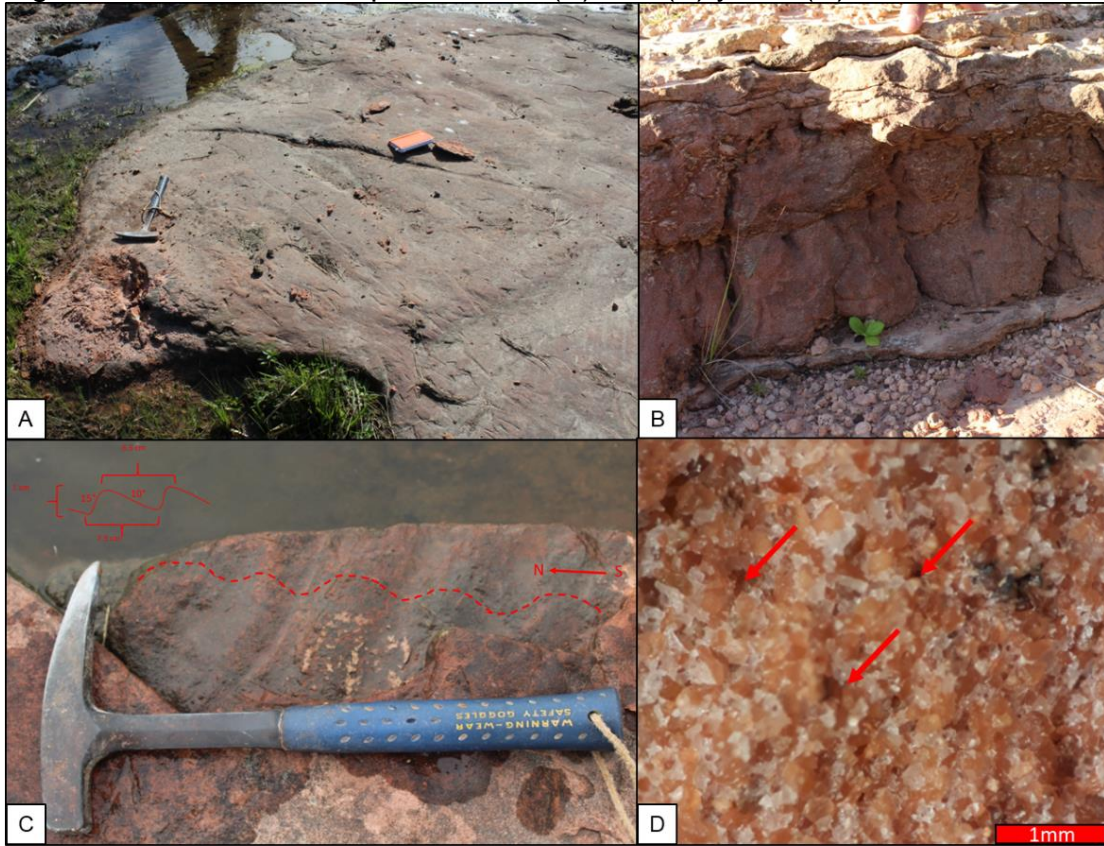
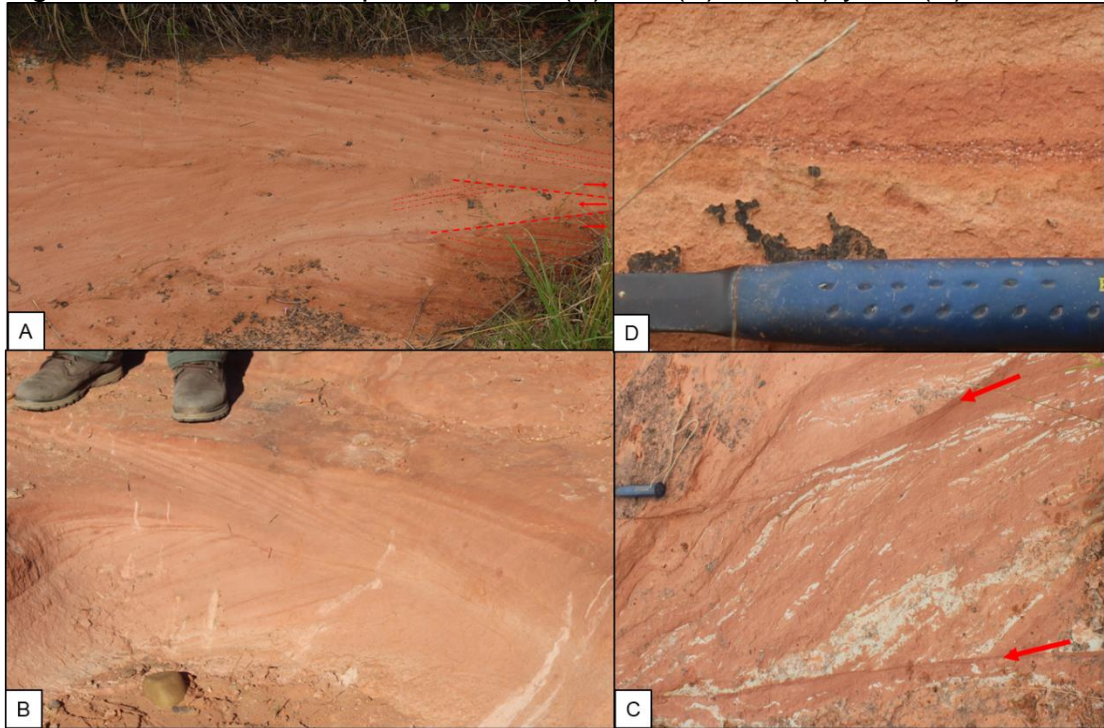


Imagen A- Vista general de la arenisca fuertemente cementada con carbonato B-Ripples casi simétricos fuertemente cementados con arenisca media por debajo C-Ripples simétricos y su detalle D- Acercamiento de la arenisca PFY-104 (A) donde se aprecia la composición cuarzo feldespática y que la cementación permite porosidad visible a lupa (flechas rojas).

Litofacies vfSga: esta facies comprende los puntos de campo PFY-118, 121, 154, 155. Comprende areniscas finas a muy finas, cuarzosas, biotíticas y con poco feldespato. Son de colores rojizos, tonalidades anaranjadas y a veces decoloradas a blanco. Los cuarzoes de mayor tamaño son redondeados y esféricos y los otros son angulosos a muy angulosos esféricos o alargados. Son moderadamente bien seleccionadas, con estratificación entrecruzada herringbone o con caras de reactivación.



Figura 48 Puntos de campo PFYS 118 (A), 121(B), 154(C) y 155(D)



Imágenes A y B- Estructura cruzada de origen mareal herringbone. En la imagen A se indican con líneas los sets adyacentes que se encuentran orientados en direcciones diferentes. C- Superficies de reactivación que implica superficies de erosión que cortan la estratificación cruzada D- niveles en la estratificación cruzada de pequeños cantos que podrían indicar la cercanía de aportes continentales o de irregularidades en las condiciones de flujo.

#### 4.1.1.3 Asociación de Litofacies vfSp+ fSt+ cSGtie

Litofacies vfSp: Esta litofacies comprende el punto de campo PFY-112. Este punto tiene relevancia dado que es el que ha sido utilizado para seleccionar la calicata PFYC-01, por lo tanto, es la litología que se encuentra en la base de dicha calicata. Se trata de una arenisca muy fina cuarzo-feldespática, con poca biotita, de buena selección y estructuras cruzadas planares de alto ángulo las cuales hacia la cima son de menor ángulo, lo que indicaría un aumento en la velocidad de transporte. Presentan un color rojizo constante que se decolora en diversos patrones acompañando la estratificación y cementación arcillosa.

Figura 49. Punto de campo PFY-112

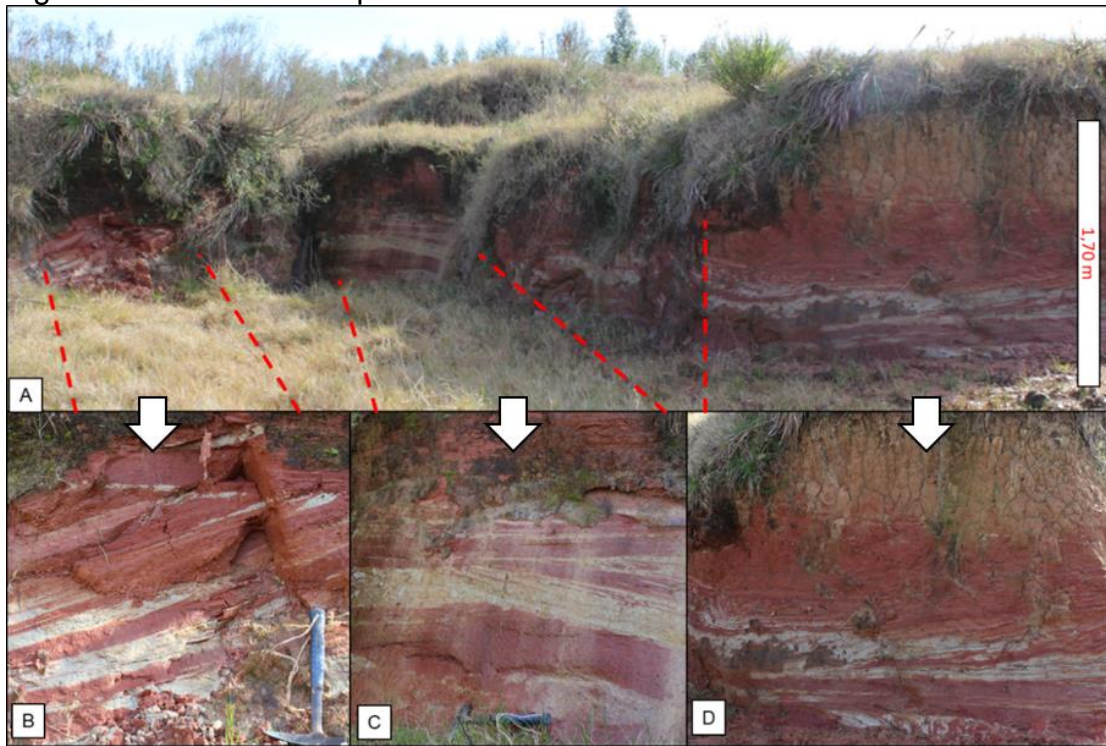


Imagen A- Panorámica de la cantera abandonada donde se exponen excelentes paredes que muestran estratificación cruzada planar, el color rojizo y decoloración llamativo de estas litologías.

Litofacies fSt: esta litofacies comprende el punto de campo PFY- 105. Se encuentra una arenisca fina, cuarzo-feldespática, muy bien seleccionada, con estructuras cruzadas en artesa (de bajo ángulo), rojiza que frecuentemente decolora a blanco crema. Se intercala con niveles más cementados con carbonato de calcio y hacia la cima con niveles de areniscas medias a veces más cementadas por carbonato de calcio donde las estructuras cruzadas se vuelven más difíciles de notar hasta que aparecen la siguiente facies.



Figura 50. Punto de campo PFY-105

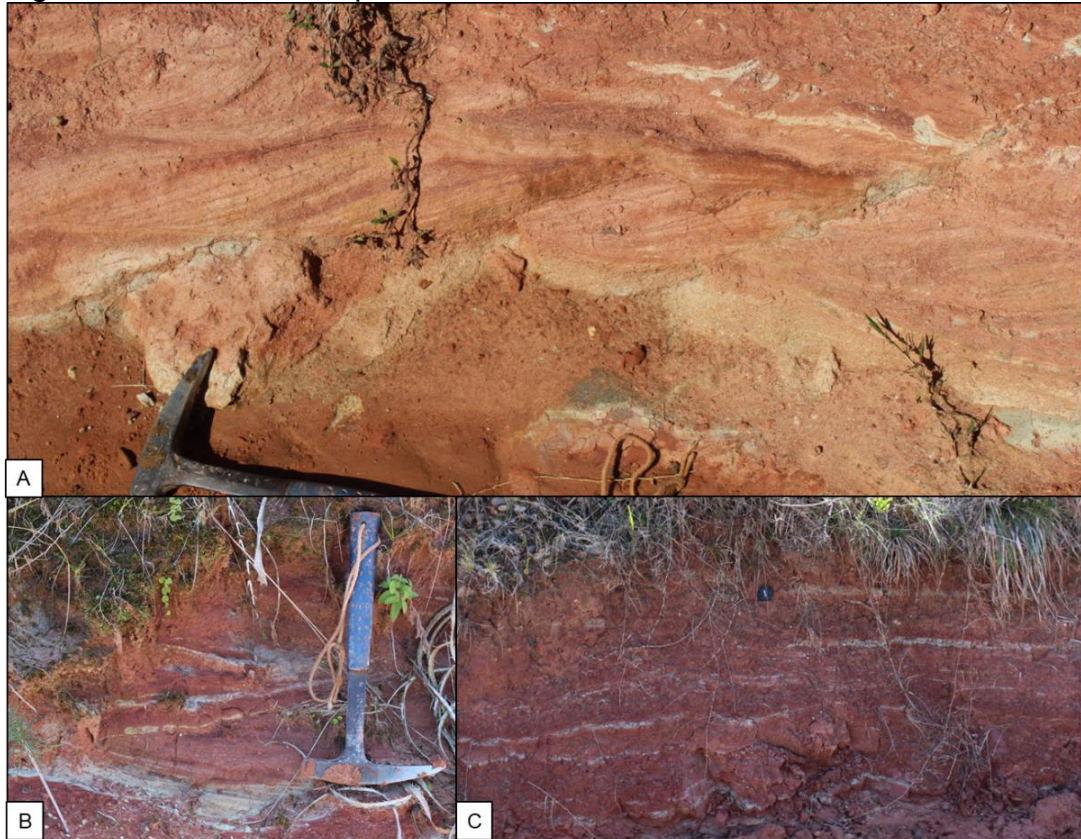


Imagen A y B diferentes estratificaciones cruzadas en artesa C- Perfil panorámico con decoloración y estratificación poco definida.

Litofacies cSGtie: comprende los puntos PFY-106 y 107. Las areniscas, desde lo descrito anteriormente, se vuelven finas a medias, de color más homogéneo, reduciendo las decoloraciones y de cementación arcillosa. Las estructuras cruzadas en artesa se vuelven de mayor porte, menos notorias, dado que el carbonato de calcio se vuelve más presente, dificultando la expresión de la estructura. La secuencia anterior remata en una arenisca mal seleccionada conglomerádica de cementación calcárea, con clastos de pelita arcillosa laminada (5 cm máximo) de un rojo intenso además de presentar cantos de cuarzo y líticos de menor tamaño, angulares a muy angulares y subredondeados.



Figura 51. Punto de campo PFY 106 (A) y 107 (B,C y D)

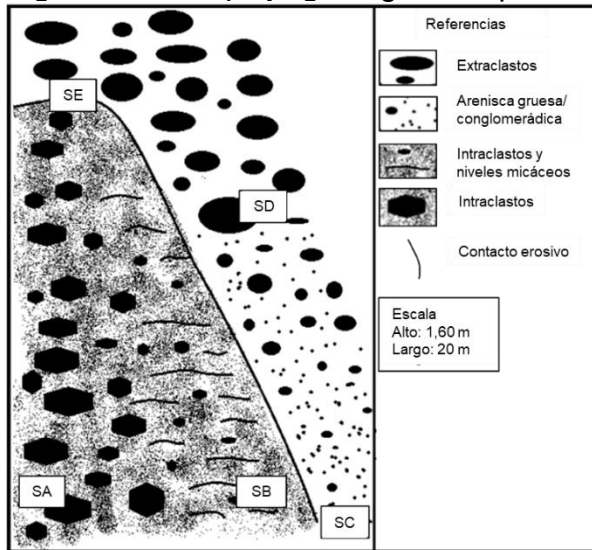


Imagen A- Aumento hacia la cima desde areniscas finas (flecha inferior) a areniscas medias (flecha superior) B- Estructura cruzada en artesa en arenisca cementada con carbonato C y D- Arenisca conglomerádica en la cima del perfil con extraclastos (C) e intraclastos (D).

#### 4.1.1.4 Asociación de litofacies mfSf+Gi y asociación de litofacies Gtn+Ge

El punto de campo PMZ-023 comprende una cantera en uso y fue el utilizado para definir a la calicata profunda PFYC-02. Se presenta el siguiente bosquejo (Figura 52) de la cantera, más las observaciones segmentadas de la cantera (Figuras 53, 54 y 55) en las cuales se utiliza la misma nomenclatura para separar las secciones.

Figura 52. Bosquejo geológico del perfil de la cantera PFY-023



Litofacies mfSf: sección SB- Arenisca media a fina arcósica, con mucha muscovita y cuarzo muy lustrado, de colores amarillentos y pigmentaciones bordó de cementación arcillosa. Posee niveles de acumulación de micas, arenisca gruesa cuarzosa y clastos pequeños de cuarzo en una matriz barrosa marrón/bordó. En la base estas acumulaciones son más continuas y finas, lo que indicaría una disminución más o menos cíclica en la energía de transporte que permite la acumulación de muscovita. Hacia la cima estas acumulaciones aparecen también, pero como niveles menos constantes, más gruesos y ondulados dando una apariencia de estratificación flaser en crestas curvas de acumulación de material barroso, muscovita, granos gruesos de cuarzo y algunos clastos de arcilla y cuarzo. Estas areniscas limitan erosivamente (SE), tanto lateralmente como en su parte superior, con las areniscas gruesas y conglomerádicas (SC) y el conglomerado (SD).



Figura 53. Sección SB del punto de campo PFY-023

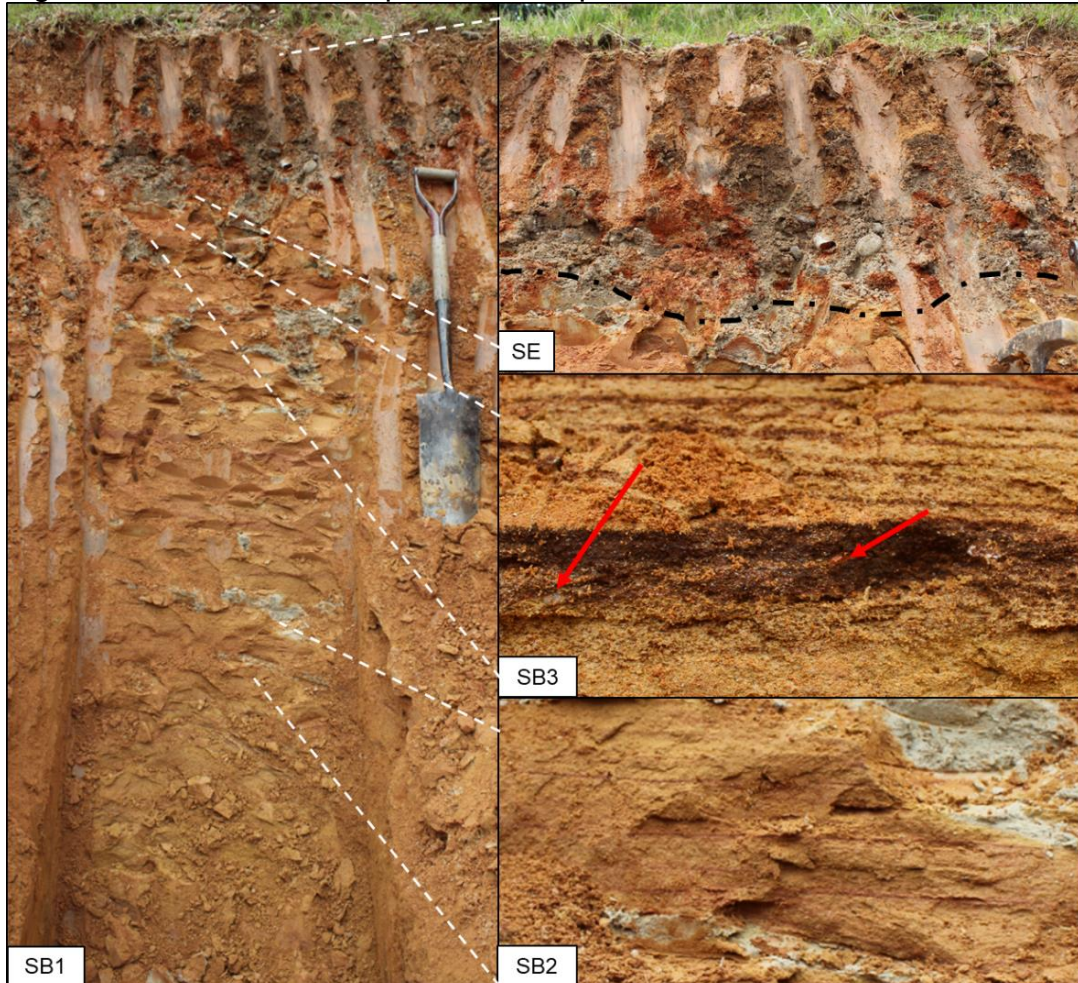


Imagen SB1- Panorámica del perfil y secciones a detallar SB2- Arenisca media a fina con niveles finos, paralelos y horizontales de acumulación de muscovita SB3- Niveles más gruesos de acumulación de barro, granos de arena gruesa, muscovita y algunos clastos (indicados con flechas rojas) SE- límite superior erosivo con el conglomerado (SD) indicado con línea negra punteada.

Litofacies Gi: sección SA- Esta sección se desarrolla lateralmente desde la SB. Se trata de un intraconglomerado con cantos de morfología aplanada, de 10 cm de largo y 5 cm de ancho los más grandes, poco redondeados, a veces angulosos y fracturados. Estos intraclastos son pelíticos arenosos, de color rojizo y macizos o con muy escasa laminación. Se disponen de forma poco ordenada, encontrándose en algunos casos con su eje mayor en posición vertical. La forma y tamaño podrían indicar que el área fuente es cercana y el transporte por fuertes corrientes. La arenisca que opera como matriz es la misma que en el punto SB.

Figura 54. Sección SA del punto de campo PFY-023

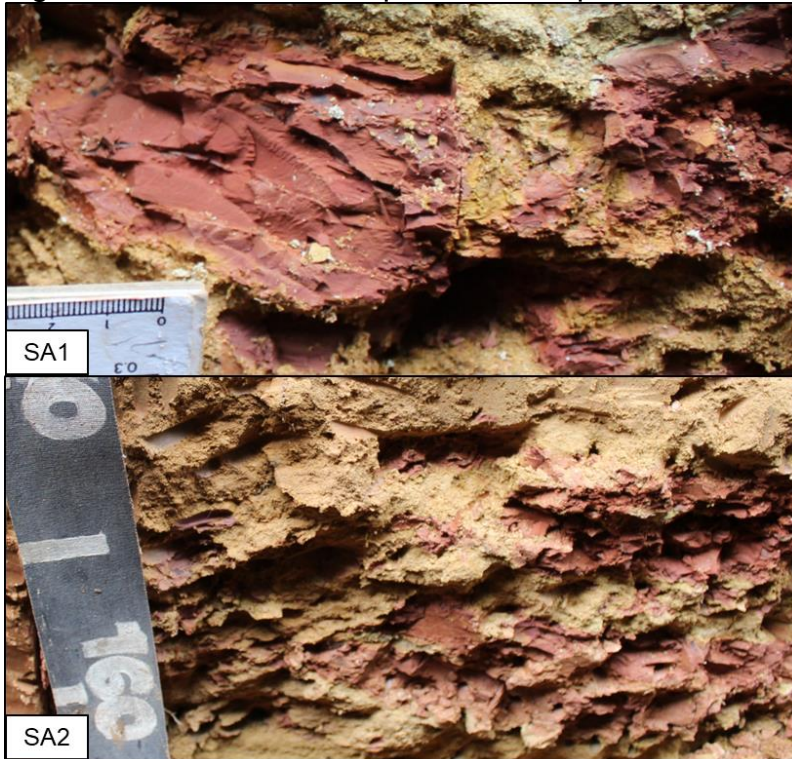


Imagen SA1 y SA2- Clastos de pelita arenosa masivos o con escasa laminación. Se aprecia las formas poco redondeadas (estas imágenes son tomadas dentro de la adyacente calicata PFYC-02 en su base, lo que no permitió obtener fotografías panorámicas).

Gtn+Ge: sección SC- Arenisca gruesa a conglomerádica, arcósica de color rosa cuando fresca y estructura entrecruzada en artesa mal definida. Los cristales varían, siendo los feldespáticos desde baja esfericidad y muy angulares (la mayoría frescos), los cuarzosos van desde muy esféricos y bien redondeados, a poco lustrados y angulosos en menor cantidad, encontrándose también clastos líticos graníticos. En la parte basal (Figura 54-SC1) aparecen dispersos clastos mayores a 2 cm, de baja esfericidad, sub angulares y redondeados. Esta sección hacia la cima comienza a ganar clastos mayores a 2 cm siendo los más grandes de 4-5 cm en estratos horizontales con gradación normal (Figura 54-SC2) que se repite hacia la cima, donde los niveles de clastos se hacen más frecuentes y los clastos de mayor tamaño hasta conformarse un conglomerado (Figura 54-SD). Este conglomerado consta de cantos rodados cuarzosos, algunos líticos, algunos xilópalos y escasos de composición de areniscas rojiza cementada (Figura 54-D). Los clastos son de diversas formas en las cuales dominan las aplanadas (Figura 55-D). Los cantos rodados de mayor tamaño son de 30 a 34 cm de arista y 20 cm de ancho, de forma ovoide y con estrías lineares en planos preferentes y marcas en media luna que parecen ser más recientes (Figura 55-A y B). Estas diferentes marcas



sobre estos grandes clastos parecen representar vaivén en el transporte (las estrías lineares) y de saltos o repiques (las de media luna). La matriz de este conglomerado es la misma arenisca que la inferior (SC1). Este conglomerado limita con la arenisca SB y SA mostrando un borde erosivo y adopta una forma de canal que en la cima parece cubrir a las demás litologías. Este comportamiento de cubrir de esta manera a las otras litologías es el que podría estar explicando la gran presencia de este conglomerado en muchas zonas topográficamente elevadas, así como el encontrar niveles de acumulación de cantos rodados en el suelo al realizar muestreos de taladro y la gran presencia de cantos rodados sueltos en superficie en varias zonas del departamento de Cerro Largo.

Figura 55. Sección SD del punto de campo PFY-023

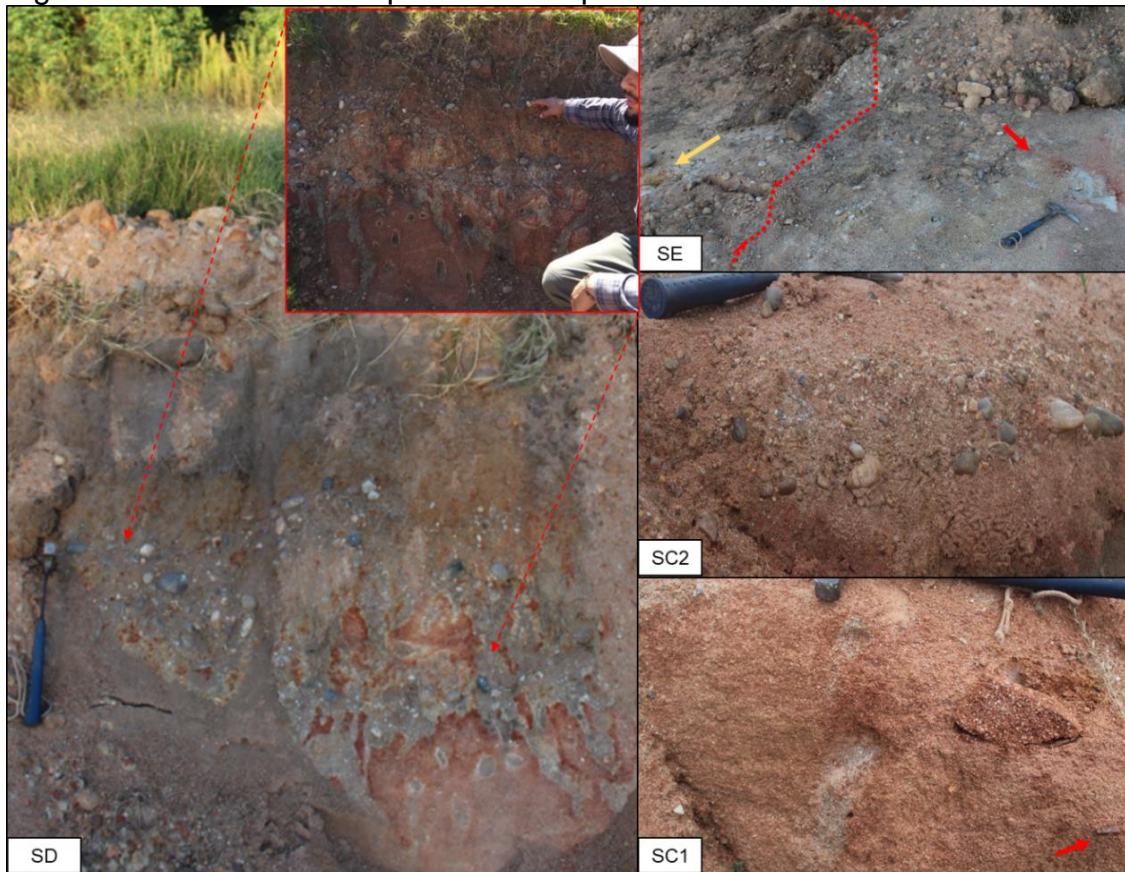


Imagen SD- Conglomerado matriz soportado en la parte superior y arenisca conglomerádica en la base SE- En línea roja punteada se marca el límite visto de planta y de perfil entre la arenisca gruesa conglomerádica SC (flecha roja) y la arenisca media SB (flecha amarilla). SC1- Arenisca gruesa a conglomerádica con poca notoria estratificación en artesa. La flecha roja indica los clastos depositados inclinados SC2- Primer nivel visible de estratificación gradada normal en la base

Figura 56. Clastos del punto de campo PFY-023

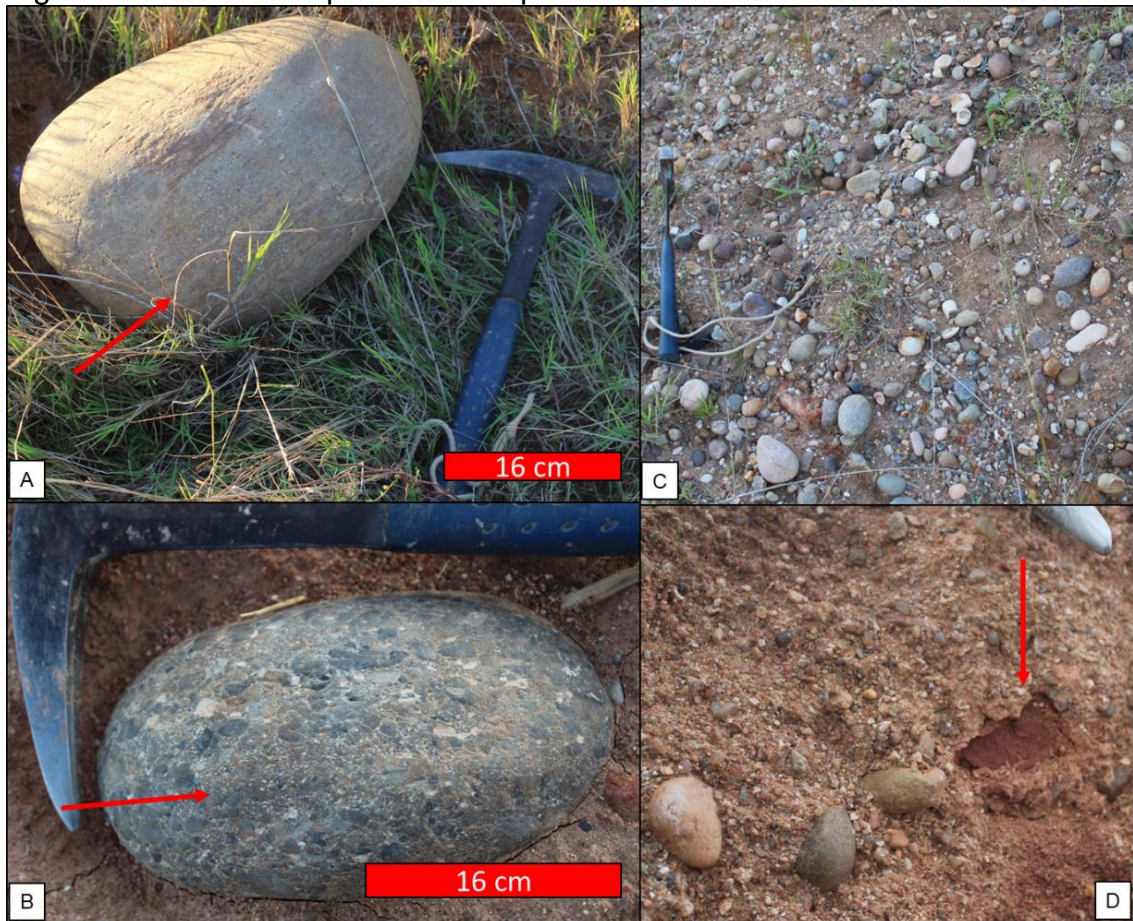


Imagen A y B Clastos ovoides de mayor tamaño y diferentes composiciones. Las flechas rojas marcan las estrías lineares. C- Clastos en la superficie donde se aprecia las diferentes morfologías D- clasto de arenisca rojiza cementada en uno de los primeros lechos basales.

En los puntos donde afloran los conglomerados o donde se realizaron canteras (PMZ-021, PFY-113, 125, 126 y 127) se encuentran concreciones de formas esféricas, ovoides, planeares o hasta en forma de pequeños cilindros (Figura 56). Estas concreciones tienen como esqueleto areniscas gruesas y en menor caso areniscas finas, que concentran algo similar a hierro o manganeso, dado el color y el peso que posee. Además, en su interior se suelen encontrar feldespatos caolinizados u otros minerales alterados a un material fino blanquecino. Este tipo de concreción es poco frecuente en otras litologías de la zona de estudio y es escaso o no existente en los alrededores de la zona de estudio, pudiendo estar marcando alguna condición ambiental particular que posibilite su formación. Materiales similares han sido observados como



moteados o acumulaciones en los horizontes profundos de suelos desarrollados sobre areniscas gruesas.

Figura 57. Concreciones posiblemente de hierro y manganeso

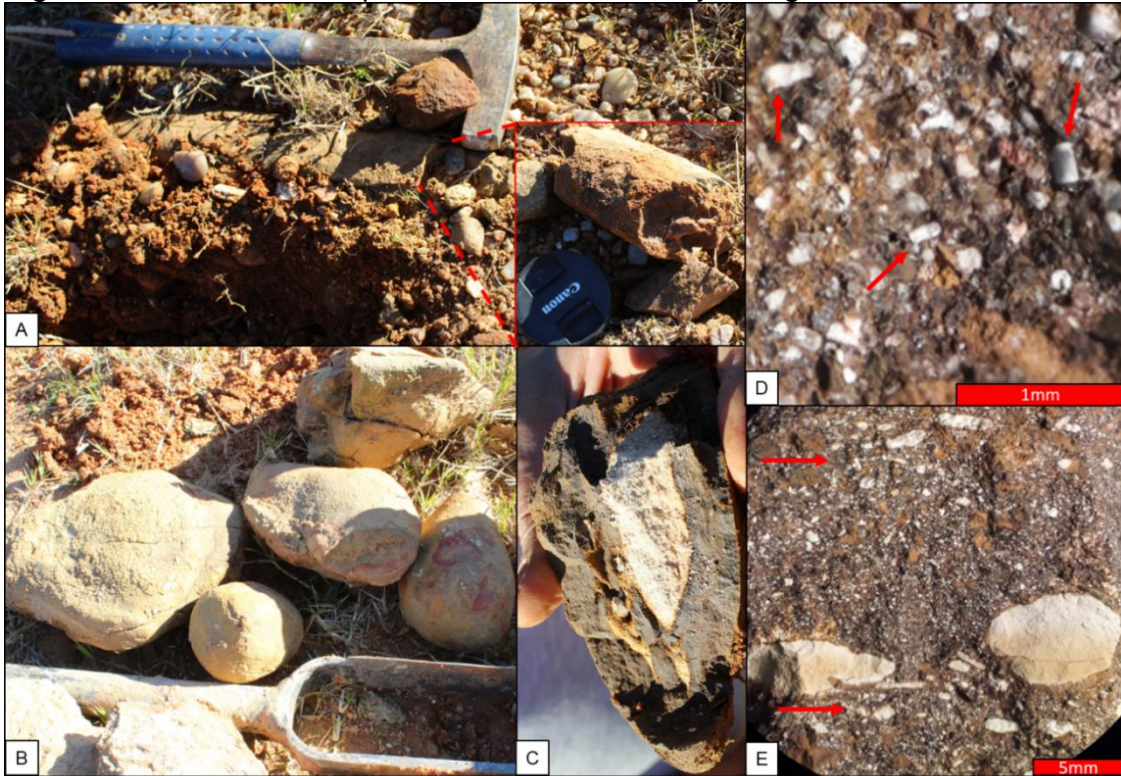


Imagen A- Concreción cilíndrica similar a un filón B- Diferentes morfologías encontradas C- concreción en areniscas fina con material alterado en el centro D- Imagen de concreción en arenisca gruesa donde se aprecian los feldespatos (flechas rojas) algunos alterados y otros conservando el brillo perlado E- Acumulación de materiales alterados (posiblemente caolinitizados) de gran tamaño que denotan la estratificación original (flechas rojas).

Litofacies Gtn+Ge: en el punto de campo PFY-108 se encuentra otra buena exposición de arenisca conglomerádica cuarzo-feldespática, con escasa biotita y con estructuras cruzadas en artesas y gradación normal. La arenisca es mal seleccionada, con clastos de tamaño máximo de 3mm. Estos clastos mayores a 2 mm son de feldespato en su mayoría, cuarzo o fragmentos líticos de composición granítica en menor medida, que van desde baja esfericidad y muy angulares (los feldespáticos) hasta muy esféricos y bien redondeados (los cuarzosos), que junto con la ocurrencia de feldespatos muy frescos y angulosos estaría indicando una escasa madurez textural. El color es de un rosa pálido a ocre. Las paleocorrientes son hacia el NW y el afloramiento presenta unas marcadas fallas EW en promedio que se condicen con la dirección del arroyo Zapallar. En la superficie del afloramiento y se observan varios agujeros



cilíndricos de entre 15 y 6 cm de diámetro que se desarrollan sin un patrón aparente que podrían ser de origen biológico.

Figura 58. Punto de campo PFY-108



Imagen A y B- Vistas laterales de la estratificación cruzada en artesas C- Gradación normal, las flechas indican el inicio de dos secuencias D-Vista de planta del afloramiento.

#### 4.1.1.5 Puntos de campo complementarios

Los siguientes puntos no se han integrado a ninguna facies de las elaboradas, pero se presentan dado que son relevantes para la caracterización ambiental de las unidades presentes y la consecuente cartografía.

Punto de campo PFY-145: se trata de areniscas medias y finas, cuarzo-feldespáticas de tonalidades amarillentas y blanquecinas. La selección es muy buena, con granos de alta esfericidad y redondeados a bien redondeados. Se observan grandes sets, con estructura cruzada planar de alto ángulo, presenta grietas en diferentes disposiciones que se encuentran rellenas por areniscas finas muy silicificadas. El afloramiento presenta una marcada fracturación NE-SW.

Figura 59. Punto de campo PFY-145

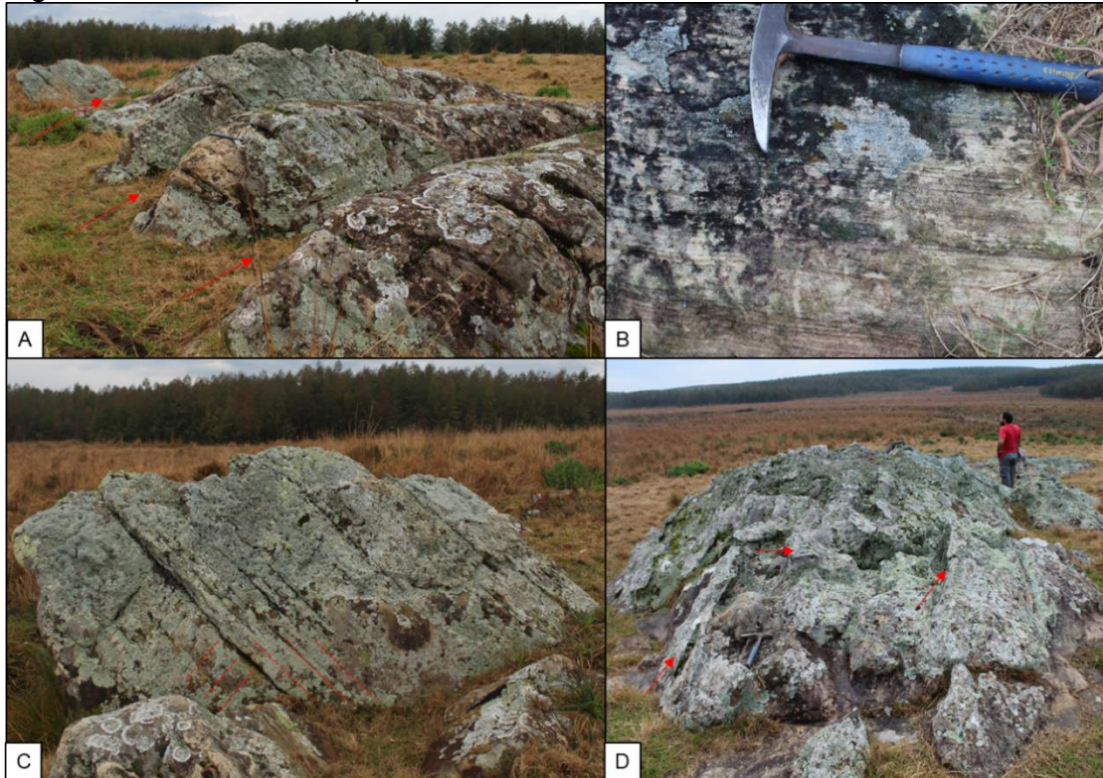


Imagen A- Fotografía general del afloramiento, con flechas rojas se indican la fracturación NE-SW. B- acercamiento de las areniscas mostrando bimodalidad y coloración amarillenta clara. C- Las barras rojas indican la estratificación cruzada de alto ángulo (no se descarta el posible acrecentamiento del ángulo por efectos tectónicos). D- Las flechas indican la fracturación en diferentes planos rellenos por materiales más finos silicificados que generan una apariencia menos arreglada del afloramiento.

Punto de campo PMZ-035: areniscas finas rojizas y con niveles blancos, de estratificación plano paralelas intercaladas con areniscas medias a finas cementadas por carbonato, que a medida que se asciende en el perfil comienzan a dominar y a cambiar a una estratificación cruzada incipiente. En este punto se interpreta un cambio hacia una corriente más marcada y de mayor energía. Del otro lado de la ruta, de forma paralela a la descripción anterior, se encuentran areniscas medias feldespáticas, de estructuras cruzadas en artesa y con algún lente de arenisca gruesa. Este otro perfil, de continuar la primera descripción, estaría indicando un cambio importante en el sistema de deposición, pasando a ambientes más cercanos a la costa y más energéticos. Presenta dirección  $N50^{\circ}E$  de paleocorrientes.



Figura 60. Punto de campo PMZ-035

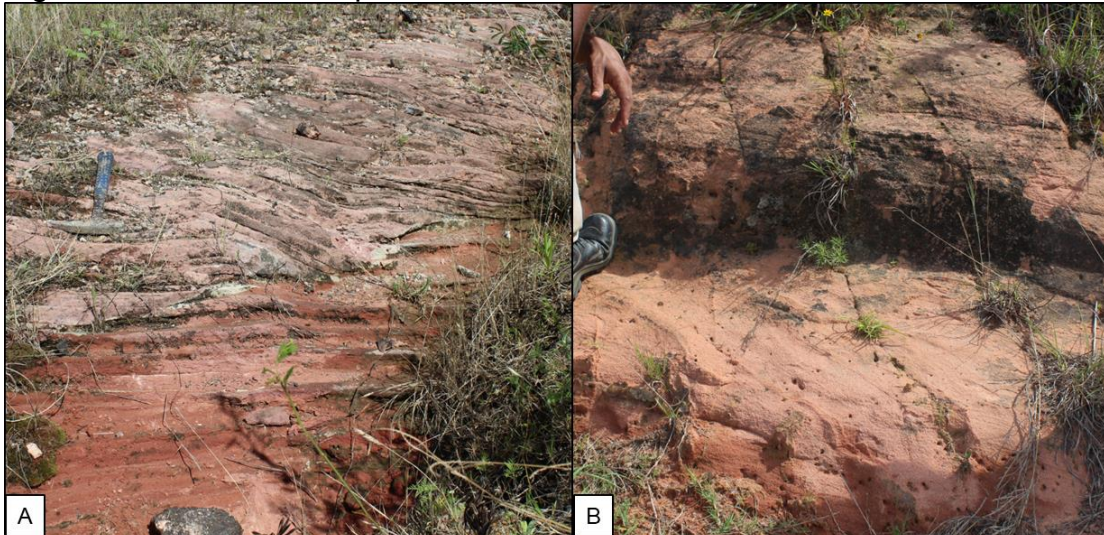


Imagen A-se observa el pasaje de la estratificación plano paralela a la cruzada y aumento de la granulometría B- estructura cruzada en artesa en areniscas medias.

Punto de campo PFY-162: arenisca muy finas, con abundante mica, en estratos paralelos horizontales con laminación interna, de colores rojizos a violáceos con niveles blancos. Por encima, con un contacto erosivo agudo (discordancia angular) aparecen areniscas medias a finas con estratificación cruzada planar, moderadamente bien seleccionadas y cementadas por carbonato al punto que recristaliza el carbonato de calcio. Dentro de las areniscas planares, aparecen niveles de areniscas medias a finas con la misma estructura y menor cementación. Presenta paleocorriente con dirección al SE.

Figura 61. Punto de campo PFY-162

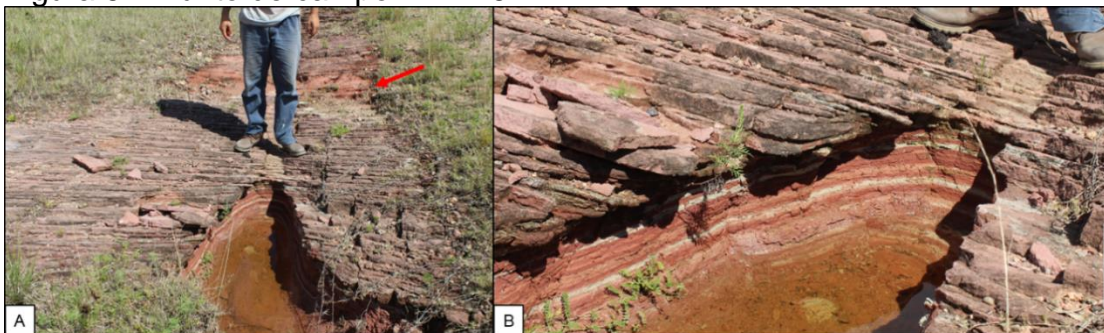


Imagen A- Panorámica del afloramiento donde se aprecian areniscas finas plano paralelas por debajo de areniscas medias cruzadas planares cementadas. La flecha roja indica otro nivel dentro de las areniscas plano paralelas de menor granulometría B- Acercamiento del contacto erosivo angular.



Punto de campo PFY-162.2: areniscas medias a finas cementadas, rojizas, que tienen variadas estructuras de deformación difíciles de describir vistas solamente desde planta. Se aprecian estructuras en domos y cubetas, pliegues muy cerrados, así como abiertos, que podrían considerarse como deformación por gravedad, ya que en el sector W del afloramiento la estructura no es tan caótica y se asemeja bastante en estructura en el buzamiento a lo visto en el punto PFY-162.

Figura 62 Punto de campo PFY-162.2

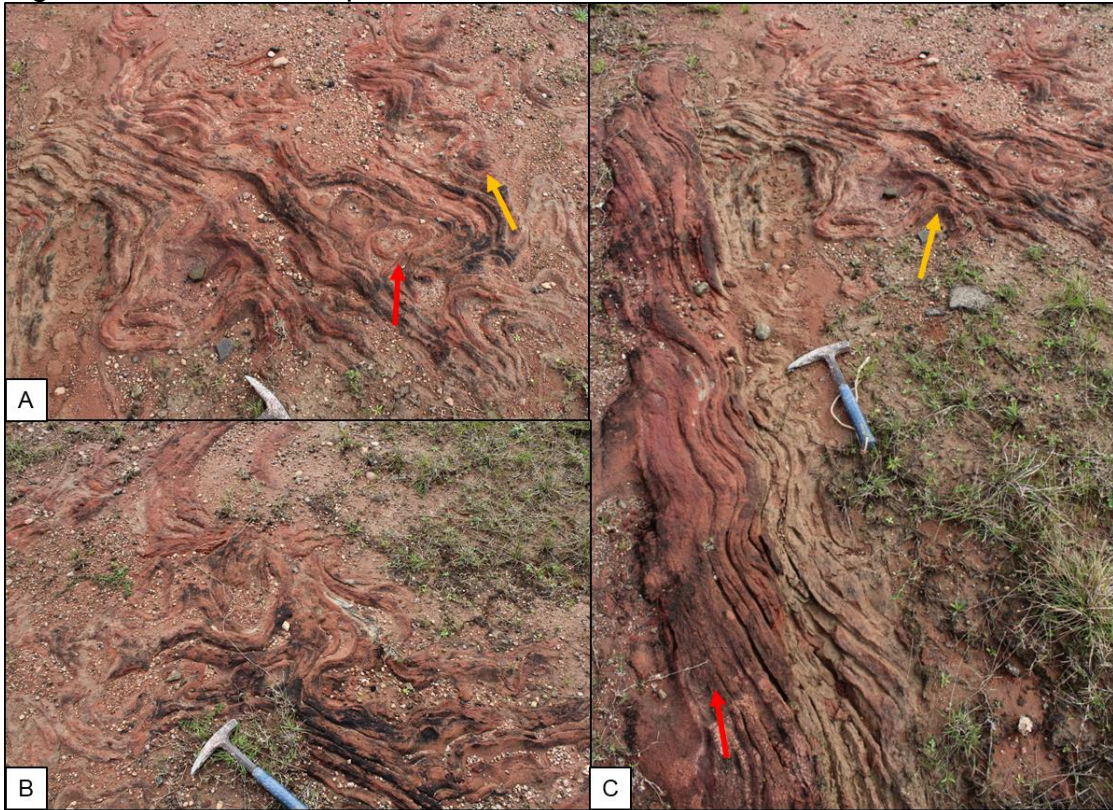


Imagen A- Diferentes pliegues y deformaciones. La flecha roja indica una forma en domo y en amarillo en cubeta. B- Deformaciones con patrones complejos C- Pasaje desde una forma más ordenada y similar a una estructura cruzada plano paralela muy inclinada (flecha roja) hacia estructuras deformadas.

## 4.1.2 Correlación entre litofacies y formaciones geológicas

### 4.1.2.1 Asociación de litofacies mfShc+Fm

Estas asociaciones de litofacies comprenden areniscas medias (o granulometría más fina en algunos casos) de color gris claro, interestratificadas de manera plano paralela con areniscas medias amarillo oscuro de escasos centímetros de espesor laminadas. Estratos potentes de areniscas finas masivas o laminadas, de colores gris oscuro, areniscas con estratificación flaser con colores oxidantes y pequeños ripples. Pelitas arenosas de color gris oscuro masivas y pelitas arcillosas masivas de color rojo, marrón y verde además de un nivel de carbonato de calcio con concreciones. Las areniscas presentan constantemente mucho feldespato y biotita, secuencias de estratos crecientes en potencia y en aumento de granulometría. Las pelitas grises masivas son portadoras de fósiles de megaplantas, encontrándose hojas y tallos de *glossopteris*, frondas de *Pecopteris* y numerosos tipos de ramas sin describir. Las características antes descritas se condicen muy bien con el miembro San Diego (Fm. Yaguari) propuesto por Bossi y Navarro (1988) y que los antecedentes cartográficos indican para esta zona (Bossi y Ferrando, 2001). A su vez las descripciones del Miembro Serrinha propuestas por Warren et al. (2008) para el centro-Sur del estado de Santa Catarina y Canile et al. (2016) para el Sur de Santa Catarina se ajustan muy bien. La asociación de fósiles se condice con el ensamblaje de megaplantas que se encuentra en el Miembro Serrinha en el estado de Paraná y en el Norte de Santa Catarina (Rohn y Rösler, citados por Holz et al., 2010). Las características que no ocurren o no se encuentran en este sitio puntal son la laminación cruzada tipo hummocky y swalley, así como la predominancia de colores verdosos y grises en el Miembro Serrinha. En cambio, para el Miembro Serrinha (Warren et al. 2008, Canile et al., 2016) no aparecen descriptos lentes o concreciones de carbonato.

En base a lo encontrado a campo, se considera el ambiente de deposición propuesto por Bossi y Navarro (1988), como un ambiente de aguas tranquilas, de reducida movilidad y gran capacidad de selección granulométrica, de clima árido y/o frío, pero no demasiado frío con estaciones contrastantes. Bossi y Navarro (1988) proponen una planicie costera, con intervención de ingresos marinos para permitir la precipitación de carbonatos, aunque el ritmo no puede asociarse a fluctuaciones de marea, pudiendo ser un ambiente marino o de lago salado. La Formación Rio do Rasto se deposita en un gran cuerpo de agua confinado, sin talud, de profundidad reducida y durante este periodo con limitada o ausente conexión marina con el océano Panthalassa (Warren et al., 2008). El ambiente del Miembro Serrinha es interpretado como un margen plano mareal progradante (Schneider et al., citados por Canile et al., 2016). El sistema por el cual se depositó del Miembro Serrinha es interpretado como lagos superficiales principalmente, a veces influenciados por olas de tormenta o

por incursiones fluviales (Rohn, citado por Holz 2010). Por lo tanto el ambiente a gran escala (Uruguay-Santa Catarina) sería prácticamente el mismo (planicie costera, ambiente marino o de lago –mar epicontinental-) pero con diferencias en cuanto a la predominancia de colores verdosos y grises en el Miembro Serrinha (Warren et al. 2008, Canile et al. 2016) que contrasta con la predominancia de colores oxidantes (Bossi y Navarro, 1988) y la presencia de carbonatos en el Miembro San Diego, que podrían estar indicando condiciones diferentes en cuanto a las posibilidades de renovación del oxígeno en las aguas a favor de mayor oxigenación en la zona de Uruguay y a un ambiente marino (alguna conexión con el océano) o de lago salado.

#### 4.1.2.2 Asociación de litofacies Fhf+vfShf + fmSr + vfSga

Esta asociación de facies, en su conjunto poseen, características generales de facies marinas poco profundas, encontrándose estructuras resultantes de olas y marea, las cuales se pueden vincular a la Fm. Yaguarí que se encuentra en los antecedentes para esta zona (Bossi y Ferrando, 2001).

Se presenta una sucesión lateral y ascendente, en la cual la proporción de arena aumenta y la acción de olas y marea se hace más marcada lo que podría estar indicando conexión oceánica. La secuencia inicia con pelitas arenosas horizontales y laminadas con estratificación flaser que gradualmente pasan a areniscas muy finas laminadas, algunas incipientes ondulaciones y estratificación flaser. Las areniscas siguen en aumento, mostrando diferentes y desordenadas estructuras entrecruzadas y ondulitas, que llegan a un nivel constante y reconocible de areniscas finas a medias muy cementadas (a veces con concreciones) con ripples de oleaje casi simétricos. Le siguen en algunos casos areniscas finas de estratificación de bajo ángulo rectas y curvas. Se finaliza en un nivel constante y frecuente de areniscas finas a muy finas de estratificación entrecruzada herringbone y cruzadas con caras de reactivación. Es constante en toda la sucesión la presencia de biotita, la buena selección y los colores rojizos (con alguna excepción de decoloración).

El Miembro Villa Viñoles definido por Bossi y Navarro (1988) comprende la alternancia de limolitas y areniscas finas y muy finas dominantes, bien seleccionadas, feldespáticas y micáceas, con cemento arcilloso dominante y calcáreo. Las estratificaciones dominantes son paralela o cruzada, los colores son netamente oxidantes. El Miembro Morro Pelado está formado por areniscas finas a medias principalmente (Rohn, citado por Holz et al., 2010). Muestra una sucesión de litofacies ascendente que se torna a textura más gruesas, desde pelitas rojas hasta areniscas, que puede interpretarse como un gradual descenso de un cuerpo de agua (como un área de inundación o un lago). Estas descripciones concuerdan a grandes rasgos con lo observado a campo,

pero tienen algunos rasgos estructurales e indicadores ambientales diferentes, principalmente la acción de marea. En la bibliografía de Brasil relevada para este trabajo no se hace mención a la acción de mareas, lo que implicaría una conexión al océano Phantalassa, por lo contrario, según Warren et al. (2008) la Formación Rio do Rasto representa la porción superior del ciclo transgresivo regresivo Permo-Triásico en la Cuenca Paraná, periodo en el cual había una limitada o ausente conexión marina con el océano Panthalassa, probablemente relacionada con la orogenia en el margen continental del Gondwana. Según Holz et al. (2010) el sistema por el cual se depositó el Miembro Morro Pelado, tiene muchas interpretaciones distintas, variando de meandros fluviales a ambientes mixtos lacustres, deltaicos y eólicos. Una de las características más marcadas del patrón arquitectural de la Fm. Rio do Rasto es la constante intercalación de elementos depositados en diferentes posiciones fisiográficas de la cuenca. La alternancia de unidades formadas en aguas más distales y profundas con elementos proximales a la línea de costa puede ocurrir por diversos factores (Warren et al., 2006). Por otro lado, el tope de la Formación Rio do Rasto está marcado por una superficie erosiva muy extendida (Holz et al., 2010) lo cual puede interferir en que ciertas litofacies no estén presentes de forma muy amplia, que existiese una parcial desconexión fisiográfica entre la Cuenca Norte y la Cuenca Paraná la cual no permitiera la completa sincronía ni arreglo de litofacies con el lado brasileño, o bien que se trate de una facies conservada tectónicamente dada la configuración local.

Se considera tentativamente a esta asociación de litofacies como parte del Miembro Villa Viñoles (Bossi y Navarro, 1988), con la apreciación de la diferencia en cuanto a posible acción de mareas dentro del mar epicontinental.

#### 4.1.2.3 Asociación de Litofacies vfSp+fSt+cSGtie, mfSf+Gi, Gtn+Ge y litofacies Gtn

Todas estas litofacies corresponden a ambientes fluviales, dadas sus asociaciones de areniscas inmaduras muy finas hasta conglomerádicas, con estructuras cruzadas planares y en artesa y depósitos en canal. Pero, dadas las diferencias en algunas de sus características y la falta de relación certera entre todas las litofacies al no estar completamente conectadas las exposiciones, es conveniente desde un punto de vista práctico para este trabajo separarlas, además de facilitar la comparación con los antecedentes.

La primera asociación de litofacies (vfSp+fSt+cSGtie) consta de areniscas muy finas, estructuras cruzadas planares de alto ángulo y hacia la cima estratigráficamente se pasa a estructuras cruzadas de menor ángulo. Le siguen areniscas finas con estructuras cruzadas en artesa. Se intercalan con

niveles más cementados con carbonato de calcio. Esta secuencia continua hacia la cima con areniscas finas a medias de estructuras cruzadas en artesa que se vuelven de mayor porte y el carbonato de calcio se torna más presente, rematando en una arenisca conglomerádica con clastos de pelita de unos 5 cm (máximo) arcillosa laminada de un rojo intenso además de presentar cantos de cuarzo y líticos de menor tamaño, angulares a muy angulares y subredondeados. Todas estas litofacies tienen en común una gran proporción de feldespato, la buena selección y el color rojizo constante con algunas decoloraciones blanquecinas. Esta asociación estaría marcando un incremento en la energía del agente de transporte, por lo tanto, del tipo de río, con la particularidad de que los conglomerados que aparecen en la cima poseen intra y extraclastos. No hay niveles apreciables de limolitas o lutitas.

Las asociaciones de litofacies mfSf+Gi y Gtn+Ge presentan areniscas medias a finas de color amarillo, con estratificación levemente ondulada y acumulaciones de materiales finos, que lateralmente pasan a un intraconglomerado. Este intraconglomerado tiene la misma arenisca amarilla como matriz, y los clastos angulosos de gran tamaño son pelíticos con poca laminación interna. Estas litologías mencionadas se encuentran en contacto erosivo por un canal conformado por areniscas gruesas conglomerádicas arcósicas, con estratificación en artesa mal definida y hacia la cima aparecen con más frecuencia niveles horizontales de grandes cantos rodados en gradación normal, hasta alcanzar a formar un ortoconglomerado matriz soportado.

La litofacies Gtn presenta areniscas conglomerádicas cuarzo-feldespáticas de color rojizo suave con estructuras cruzadas en artesas y gradación normal con paleocorrientes son hacia el NW. La composición y la textura de esta litofacies es muy similar a la Gtn mencionada anteriormente, pero no se puede confirmar completamente su relación.

Las litofacies anteriores se pueden incluir dentro de la Formación Buena Vista en términos generales, la cual esta descripta para la zona.

de Santana et al. (2006) se basan en Goso et al. (2001) para definir al Miembro Colonia Orozco, en el cual comprende una definición que no se ajusta plenamente a lo observado, principalmente porque propone que las areniscas gruesas son escasas, la presencia de intraconglomerados fosilíferos, de litologías arcillosas y gradación inversa en los sets. Las paleocorrientes (NE y NW) si se condicen. La definición brindada en Bossi y Navarro (1988) se ajusta al ser más general, y específicamente se condicen en la composición feldespática de las areniscas, falta de lutitas y rocas limosas, la mayor relevancia de las areniscas gruesas, conglomerádicas y ortoconglomerados. De



estos últimos se hace la descripción más detallada. Pero, así como también sucede con las otras definiciones, los intraconglomerados fosilíferos están ausentes en las observaciones de este trabajo. Los ortoconglomerados y las areniscas conglomerádicas son mencionadas por Bossi (1966), Elizalde et al. (1970), este último aportando además que las areniscas conglomerádicas de partículas angulosas, arcósicas, a veces con mica en la matriz, de cementación parcialmente silíceas, de estructura masiva y de color amarillento rojizo.

La descripción de la Formación Sanga do Cabral es muy similar a la de Fm. Buena Vista, con la excepción de que los ortoconglomerados son más abundantes y potentes en la Fm. Buena Vista y por las areniscas eólicas del Miembro Cerro Conventos (Da-Rosa et al., 2010).

Se considera entonces que todas estas asociaciones dentro de la Fm. Buena Vista, dado su carácter fluvial dominante, y siguiendo lo propuesto por Andreis et al. (1980) para la Fm. Sanga do Cabral y Ferrando y Andreis (1989), se considera un sistema braided, pero no se considera medio-distal. La carencia de intraconglomerados exclusivos en las litofacies aluviales de areniscas más finas, así como la carencia de litologías finas asociadas, podrían estar indicando que llanuras de inundación no se han formado todavía o en locaciones que estos sistemas fluviales los pudieran retrabajar. Las litofacies fluviales más gruesas contienen un intraconglomerado, el cual consiste en una arenisca media a fina, micácea y amarillenta e intraclastos pelíticos rojos angulosos y grandes, por lo que la competencia cambió de forma abrupta y la fuente de los clastos no podría estar muy lejana (además de su forma angulosa y tamaño). A este intraconglomerado lo recorta un canal lateralmente y además lo sobreyace cubriéndolo, lo que podría estar indicando no una falta de acomodamiento, sino un cambio en la zona de origen de las corrientes lo que sería respaldado por el cambio importante en el aumento del tamaño y naturaleza de los sedimentos, pasando a areniscas gruesas a conglomerádicas, arcósicas inmaduras y extraclastos de diversa composición y tamaños que pueden llegar a grandes tamaños (30 cm x 20 cm). Estas litofacies conglomerádicas no se condicen con ninguno de los miembros propuestos por de Santana et al. (2006) y tampoco afloran en los márgenes del Arroyo Zapallar sobre la ruta 44 o en una zona cercana fácilmente accesible como han propuesto Bossi y Navarro (1988). Podrían estar representando la parte proximal de un sistema braided como otros autores han propuesto (Piñeiro et al., citados por Dias-da-Silva et al. 2017, Ernesto et al., 2019), provocado quizás por cambios en la zona de aporte de sedimentos o por subsidencias en la Cuenca Norte, lo que explicaría porque estos conglomerados se encuentran diseminados en las partes topográficamente altas de la zona de estudio, así como en una extensa área cercana, tal como ha sido confirmado al realizar recorridos de reconocimiento.

#### 4.1.2.4 Puntos de campo complementarios

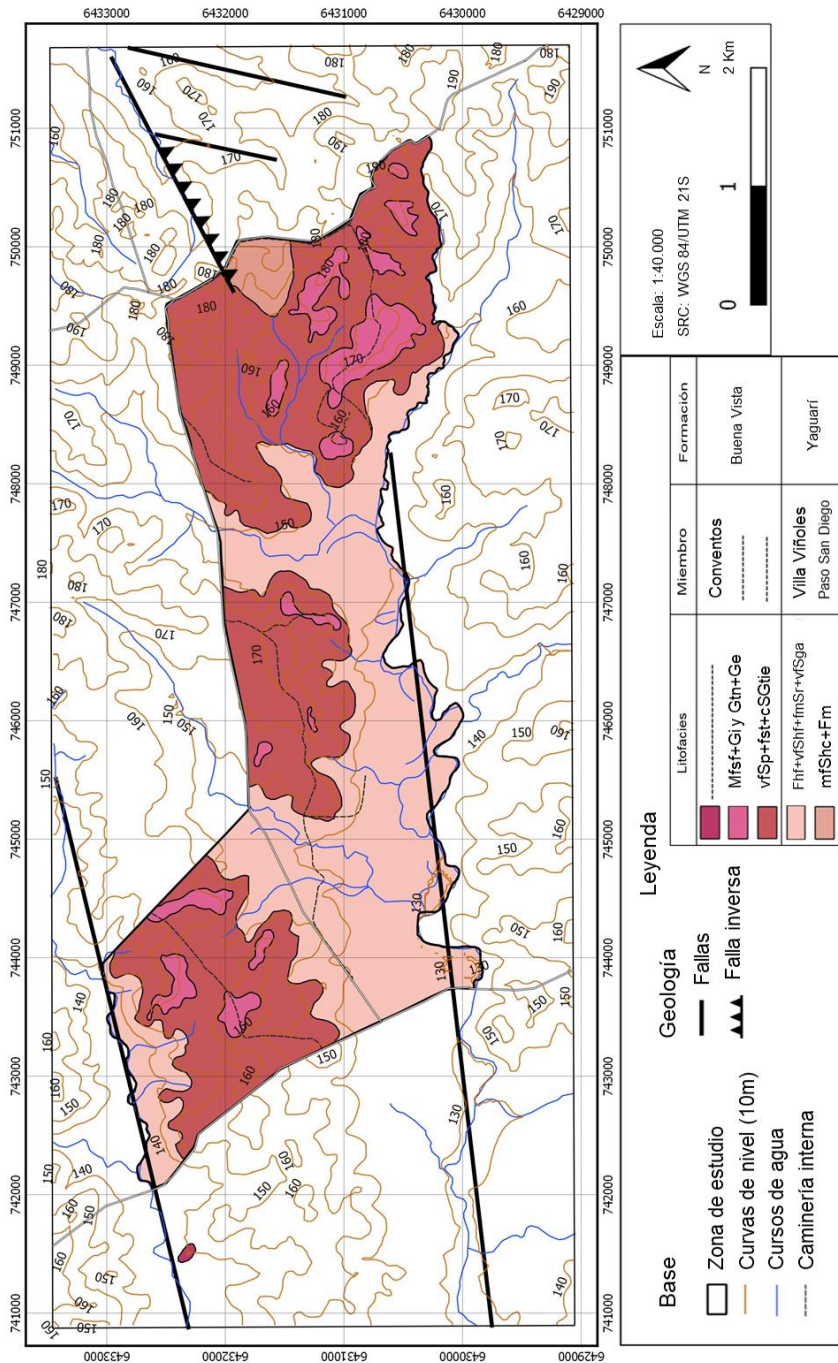
El Punto de campo PFY-145 presenta areniscas de buena selección, bien redondeadas, con notables estructuras entrecruzadas planares de alto ángulo de inclinación, con sets potentes. Se trata de depósitos eólicos, que se pueden incluir dentro del Miembro Conventos (de Santana et al., 2006b). No se pudo establecer una relación estratigráfica con las otras litologías asociables a la Fm. Buena Vista, por lo que su posición queda no definida para este trabajo.

El punto PFY 162 –y muy posiblemente el PMZ-035 dadas las similitudes- indican una discordancia en los depósitos. Muy cercanos a ellos en las mismas litologías ocurre el punto PFY-162.2 que presenta deformaciones. No se puede afirmar el origen de estas estructuras, pueden tratarse de sismos, la base de la formación de una duna eólica y puede resultar en el límite entre formaciones. Tentativamente se toma como un apoyo más para la cartografía, dado que a la cota que estos puntos se presentan, también se presentan aproximadamente los cambios de litofacies de oleaje de marea y litofacies fluviales.

#### 4.1.3 Mapa geológico

Se presenta a continuación (Figura 62) el mapa geológico confeccionado con los criterios anteriormente expuestos de litofacies y su correlación con las formaciones geológicas. En los Anexos se encuentran la ubicación de todos los puntos de campo relevados.

Figura 63. Mapa geológico



La distribución de las unidades geológicas en el mapa elaborado muestra que el Miembro Paso San Diego (Fm. Yaguarí) ocupa solo el 1,9% (27,5 ha/1450 ha) en una zona de relieve y de mayor altura topográfica, siendo

limitado una falla que lo ascendió. Este Miembro se puede considerar como impermeable desde el punto de vista hidrogeológico, pero por las fracturas que posee se podría comportar en cierta medida como un acuífero de fisura.

El Miembro Villa Viñoles (Fm. Yaguarí) ocupa un 42% (609 ha/1450 ha) topográficamente ocupa las zonas más bajas de lomadas y de llanuras, por lo que se vincula fuertemente con las zonas de desagües y zonas con excesos de humedad lo que afecta a las plantaciones que se desarrollan sobre él. Este Miembro se comporta como un acuífero dadas las litologías conectadas arenosas finas, porosas y poco cementadas, o como un acuitardo si las pelitas arenosas llegasen a ser muy potentes y extendidas, lo cual no parece ser el caso, además de que se encuentran en la parte más basal y continua.

Las litofacies asociadas a ambientes fluviales, relacionables con la Formación Buena Vista, ocupan la mayoría del área, abarcando un 48,8% (708 ha/1450 ha) las litofacies más finas (Fhf+vfShf+fmSr+vfSga) en las zonas de lomadas medias y altas, y las litofacies más gruesas (mfSf+Gi y Gtn+Ge) abarcan un 7,3% (106,4 ha/ 1450 ha) encontrándose en principalmente en las zonas más altas de las lomadas. Estas litologías se pueden considerar como un acuífero, dadas las carencias de fracciones finas y su porosidad, pero su posición topográfica y poca potencia limitaría su continuidad hidráulica. Estas litofacies son las que presentan mejores posiciones topográficas para plantaciones.

#### 4.1.4 Discusiones y resultados de geología

El estudio geológico detallado fue posible de desarrollarse por medio de litofacies y el análisis de litofacies permitió interpretar ambientes y condiciones deposicionales.

La asociación mfShc+Fm se atribuyen al Miembro San Diego (Fm. Yaguarí) descrito en los antecedentes para la zona. Esta asociación se correlaciona con el Miembro Serrinha (Fm. Rio do Rasto) en Brasil, en particular por el registro fósil de megaplantas hallado. El ambiente deposicional se considera como el de una planicie costera, mar epicontinental o gran lago (Uruguay-Santa Catarina) pero con la diferencia de que en Uruguay alteran colores oxidantes y reductores con presencia de carbonatos, mientras que en Santa Catarina predominan los colores verdosos y grises con ausencia de carbonatos. Estas diferencias podrían estar indicando diferentes condiciones en la renovación de oxígeno en las aguas y una posible conexión con el océano, o de condición de lago salado en Uruguay.

La asociación de litofacies Fhf+vfShf+fmSr+vfSga se atribuyen el Miembro Villa Viñoles (Fm. Yaguarí) descrito para los antecedentes para la zona. Esta asociación se correlación con el Miembro Morro Pelado (FM. Rio do

Rasto). Se considera el ambiente deposicional regional el de un mar epicontinental o un gran lago, donde se registra un gradual descenso del agua. Se plantea que durante el depósito de esta unidad se genera una conexión con el océano dadas las estructuras observadas (herringbone y caras de reactivación) confirmando este evento para Uruguay, no registrado en Brasil.

Las observaciones anteriormente mencionadas en las asociaciones de litofacies pertenecientes a la Fm. Yaguarí pueden dar indicios de diferencias en la Cuenca Paraná, como que pudiese estar dividida o desfasada en sus secuencias deposicionales entre Uruguay y Brasil.

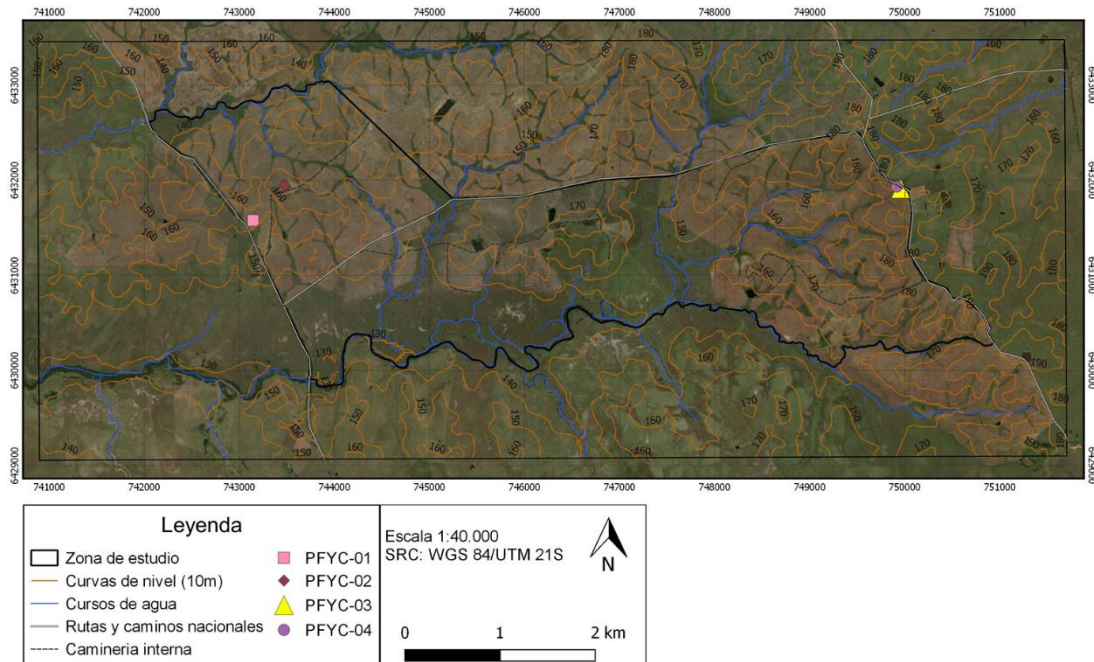
La asociación de litofacies vfSp+fSt+cSGtie, mfSf+Gi, Gtn+Ge y litofacies Gtn se atribuyen todas a la Fm. Buena Vista, descrita para la zona en los antecedentes. Las litofacies observadas no se ajustan a la descripción del Miembro Colonia Orozco (de Santana et al., 2006) pero si en términos generales de Fm. Buena Vista (Bossi y Navarro, 1988). Si bien estas asociaciones se encuentran de manera discontinua, se puede proponer un ambiente de río medio a distal, que pasa a uno proximal. Esto se interpreta por ya que las areniscas finas rojizas inferiores gradualmente pasan a areniscas medias y medias conglomerádicas rojizas con pequeños intra y extraclastos. La siguiente secuencia se encuentra siempre topográficamente por encima de las anteriores, ocurriendo areniscas medias e intraconglomerados de color amarillo con intraclastos pelíticos rojos, que son recortadas y cubiertas erosivamente por areniscas gruesas inmaduras que gradan a conglomerados con extraclastos de gran tamaño. La Fm. Buena Vista se correlaciona en Brasil con la Fm. Sanga do Cabral, para la cual no hay descritos potentes ortoconglomerados como los descritos en este trabajo. Tampoco se observaron niveles o lentes de carbonato como están descritos para Uruguay y Brasil.

Dentro de los puntos de campo complementarios se publica aquí un nuevo registro de areniscas eólicas correspondientes al Miembro Conventos (Fm. Buena Vista). Los otros puntos de campo complementarios representan una discordancia angular entre pelitas horizontales de la Fm. Yaguarí (base) y areniscas medias con estratificación de gran ángulo (superiores) que posiblemente continúen lateralmente con estructuras de deformación. Las estructuras de deformación pueden ser de origen sísmico, pero lo más probable es que se traten de estructuras de deformación asociadas a la base de una duna eólica en formación, dadas las estructuras de alto ángulo y el afloramiento eólico cercano. Dada la interpretación anterior, las areniscas eólicas del Miembro Conventos puede que se desarrollen lateralmente al Miembro Villa Viñoles si la discordancia es menor, o puede representar un hiato mayor que podría colocar a las areniscas eólicas lateralmente con las litologías más basales de la Fm. Buena Vista.

## 4.2 CALICATAS PROFUNDAS

La ubicación de las calicatas profundas (Figuras 64 y 65, y Cuadro 9) fue realizada según lo propuesto en la sección 3.4.2 y con la confirmación de la idoneidad por medio del mapa geológico. La calicata PFYC-04 fue realizada con el propósito de corroborar la extensión de la litología particular de esa zona, por lo que no cuenta con plantaciones en su parte superior ni es utilizada más que para la sección de geología.

Figura 64. Ubicación de las calicatas profundas



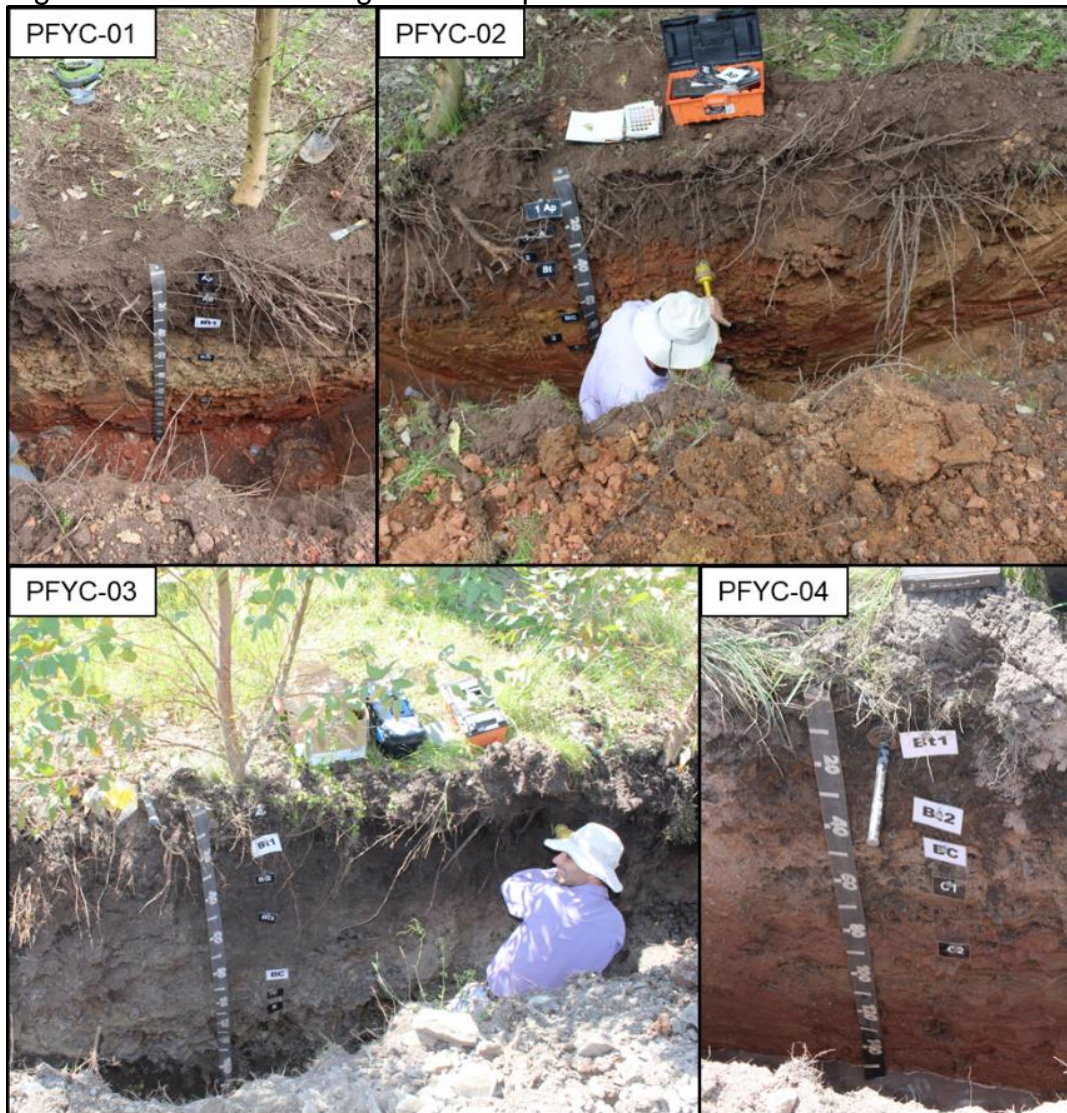
Cuadro 9. Ubicación y características relevantes de las plantaciones en las calicatas profundas

	Coordenadas UTM 21 S (m)		Elevación (m)	Plantación	Fecha	Edad a la fecha de la calicata
PFYC-01	743147 E	6431576 S	154	E. grandis	09/2016	2 años y 1 mes
PFYC-02	743479 E	6431945 S	164	E. grandis	09/2016	2 años y 1 mes
PFYC-03	749958 E	6431912 S	178	E. grandis	03/2017	1 año y 6 meses
PFYC-04	749916 E	6431932 S	177	*	*	*

\*No se realizó en un rodal



Figura 65. Imágenes panorámicas de las calicatas



Una vez realizadas las calicatas profundas, se confirmó para las 3 calicatas la presencia de raíces provenientes de los *E. grandis* en todo el desarrollo del perfil en profundidad. Confirmada la exploración radicular profunda se procedió a utilizar los criterios propuestos en la sección 3.4.4 y a utilizar la metodología para la descripción cualitativa macroscópica para horizontes y capas profundas del SSR (Cuadro 6) propuesta para este trabajo. La descripción del SSR permitió clasificar los distintos horizontes y capas en profundidad y espesor, obteniéndose así el marco de a cuáles profundidades detallar los comportamientos de las raíces, siguiendo los criterios propuestos en la sección 3.4.3. A su vez, la descripción macroscópica permitió identificar morfologías particulares de raíces profundas que fueron estudiadas por medio



de cortes histológicos. Posteriormente se estudiaron las capas profundas de los SSR de manera microscópica, lo cual permitió observar las características de las raíces finas profundas y su interacción con el medio.

## 4.2.1 Descripciones cualitativas macroscópicas de los SSR

### 4.2.1.1 Perfil SSR PFYC-01

En el Cuadro 10 se sintetiza la descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-01.

Cuadro 10. Descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-01

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Descripción	Perfil
Ap	0-10	Color 7,5YR 3/2 seco, 7,5YR 2,5/1 húmedo; franco arenoso; transición gradual.	
AB	0-25	Color 7,5YR 3/2 seco, 7,5YR 2,5/1 húmedo; franco arenoso; transición gradual.	
Bt1	25-50	Color a 7,5YR 2,5/3 seco, 7,5YR 2,5/2 húmedo; Películas de arcilla; transición clara.	
Bt2	50-100	Color 10YR 6/1 seco, 10YR 5/1 húmedo; franco arcillo arenoso; estructura granular a pequeños bloques; transición clara; concentración iluvial marcada de arcilla y de óxidos de hierro; moteados abundantes, bordes difusos de color 7,5YR 5/8; la estructura de la roca original ya no se reconoce como tal.	
C	100-140	Color 7,5 YR 5/8 seco, 7,5YR 4/6 húmedo; decoloraciones a colores blancos frecuentes; acumulación de arcillas notoria al tacto; acumulación de material fino muy arcilloso oscuro alrededor de las raíces más grandes; concreciones de Fe-Mn y moteados muy frecuentes; estructuras prismáticas y columnares incipientes; estratificación original apenas conservada, difícil de observar fácilmente apreciable al romper los bloques; algunos núcleos pequeños conservados de la capa CrR apreciables por el color y mayor tenacidad.	
	~140	Línea blanca donde hay fuerte decoloración, lixiviación y concreciones de Fe-Mn, quedando acumulación de arena fina	
CrR	140-200	Color 5R 5/6 seco, 5R 4/4 húmedo; decoloraciones blancas asociadas a raíces y acumulación de agua; estratificación original de la roca conservada; pequeñas fracturas que provocar roturas en bloques angulares de máximo 10 cm de lado o en formas planas siguiendo la estratificación; fracturas rellenas con raíces y materiales finos asociados a la rizosfera; manchas pequeñas negras de Fe-Mn en los planos de fracturas; percolación de agua importante.	
R	Cantera de referencia	Color 5R 4/8 seco, 5R 3/6 húmedo; areniscas muy finas cuarzo feldespáticas con poca biotita; estructuras cruzadas planares de alto ángulo que hacia la cima son de menor ángulo; buena selección; color rojizo constante que se decolora en diversos patrones acompañando la estratificación; fracturas distanciadas a más de 30 cm.	

#### 4.2.1.2 Perfil SSR PFYC-02

En el Cuadro 11 se sintetiza la descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-02.

**Cuadro 11. Descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-02**

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Descripción	Perfil
Ap	0-15	Color 7,5YR 3/4 seco, 7,5YR 2,5/3 húmedo; franco arenoso; bloques subangulares débiles < 5 a 5 - < 10 mm; transición abrupta.	
1A	15-30	Color 7,5YR 3/3 seco, 7,5YR 2,5/1 húmedo; nivel de acumulación de cantos rodados de diversos tamaños.	
Bt	30-62	Color 2,50YR 3/6 seco, 2,5YR 2,5/4 húmedo; textura arcillosa; bloques subangulares 10 - < 20 mm; transición clara; concentración marcada de arcilla iluvial; la estructura de la roca original ya no se reconoce como tal.	
C	62-85	Color 10YR 5/8 seco, 10YR 4/6 húmedo; franco arcillo arenoso; bloques angulares 10 - < 20 mm; transición gradual; la acumulación de arcilla en esta capa probablemente no sea iluvial, sino producto de los clastos pelíticos meteorizados; muchos moteados de Fe-Mn pequeños y difusos; láminas de Fe-Mn; la estratificación original no es apreciable; algunos clastos de arcilla de hasta 5 cm todavía definibles pero muy meteorizados; fracturas no reconocibles.	
CrR	85-120	Color 2,5YR 4/8 seco, 2,5YR 3/6 húmedo; decoloraciones blancas; color 10R 4/6 en clastos pelíticos; franco arcillo arenoso; láminas de Fe-Mn; la estratificación original todavía es apreciable; clastos de arcilla más fragmentados pero identificables, con algunos núcleos todavía frescos; fracturas más frecuentes que dan apariencia de pequeños bloques angulosos; moteados laminares negros en planos de fractura o sobre restos de clastos de arcilla conservados.	
	120-130	Línea blanca donde hay fuerte decoloración y lixiviación, quedando acumulación de arena fina.	
Rr	130-170	Color matriz 10YR 7/6 seco, 10YR 6/4 húmedo; color clastos 5R 4/6; decoloraciones escasas blanquecinas en la arenisca y algunos moteados negros en los clastos pelíticos; estructuras sedimentarias conservadas, niveles marrones muscovíticos; intraconglomerado con clastos pelítico y arenisca media a fina arcósica; matriz soportado; fracturas presentes en clastos pelíticos que deberían de continuar en la matriz arenosa pero no se aprecian a simple vista ni por rotura.	
R	Referencia	Color 10YR 6/8 seco, 10YR 5/6 húmedo; arenisca media a fina arcósica, con mucha muscovita y cuarzo muy lustrado; color amarillento y pigmentaciones bordó; niveles de acumulación de micas, arenisca gruesa cuarzosa y clastos pequeños de cuarzo en una matriz barrosa marrón/bordó.	

#### 4.2.1.3 Perfil SSR PFYC-03

En el Cuadro 12 se sintetiza la descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-03.

**Cuadro 12. Descripción cualitativa macroscópica del SSR PFYC-03**

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Descripción	Perfil
Ap	0-15	Color 7,5YR 2.5/1 seco, 10YR 2/1 húmedo; franco arcillo limoso; bloques subangulares débiles 10 - < 20 mm; transición gradual.	
AB	15-30	Color 10YR 2/1 seco, 10YR 2/2 húmedo; franco arcillo limoso; bloques angulares moderados 10 - < 20 mm; transición clara; revestimientos de arcilla, pocos y medios.	
Bt1	30-45	Color 7,5YR 2,5/3 seco, 10YR 2/2 húmedo; arcilloso; bloques angulosos moderados a fuertes 10 - < 20 mm; transición clara; revestimientos de arcilla, pocos y gruesos; fragmentos líticos conservados de pelita de color interno naranja rojizo.	
Bt2	45-90	Color 2,5Y 3/1 seco, 2,5Y 2,5/1 húmedo; arcilloso; bloques angulares moderados a fuertes 20 - < 50 mm; transición gradual; revestimientos de arcilla, pocos y gruesos; fragmentos líticos conservados de pelita de color interno naranja rojizo.	
C	90-100	Color 2,5Y 5/1 seco, 2,5Y 4/1 húmedo; arcilloso; bloques angulares moderados 20 - < 50 mm; transición gradual a clara; revestimientos arcillosos pocos y medios; aumento en el contenido de arcilla por translocación; revestimientos laminares negros de Fe-Mn; en algunos bloques angulares de 3 cm se conserva fresca la pelita masiva; abundantes fragmentos líticos pequeños ovoides conservados de pelita de color naranja a amarillentos que dan la apariencia de moteados; la fracturación ya no es reconocible dada la estructura en bloques.	
CrR	110-130	Color 5Y 4/1 seco, 5Y 3/1 húmedo; frecuentes decoloraciones a gris claro, asociadas a las fracturas; la pelita se conserva fresca en los bloques que se forman; los lentes de arena fina se encuentran modificados en forma y color ; muchas fracturas 3 a 5 cm de lado rellenas que forman bloques angulares; muchas fracturas rellenas de material arcilloso; frecuentes revestimientos laminares de Fe-Mn en las caras de los bloques; se encuentran fósiles pero alterados.	
R	130-160	Color 5Y 6/1; pelita de iguales proporciones de limo, arcilla y arena muy fina; presenta esporádicos niveles lenticulares de 1 cm de ancho y menos de 15 cm de largo de arena fina amarillo-ocre; la estructura de la pelita es masiva, presenta diaclasas sub-verticales espaciadas entre 30 y 50 cm produciendo grandes bloques angulares; presenta numerosos fósiles de megaplantas bien conservados como impresiones en disposición al azar, dada la estructura masiva de la roca; la roca presenta poca decoloración solamente en las fracturas donde las raíces han ingresado.	

#### 4.2.1.4 Discusión sobre los perfiles SSR obtenidos

Se realizaron 3 calicatas con profundidades de 1,60 m, 1,70 m y 2 m en tres litologías diferentes: areniscas finas (Fm. Buena Vista), arenisca conglomerádica (Fm. Buena Vista) y pelita arenosa masiva del Miembro San Diego (Fm. Yaguarí). Se lograron identificar diferentes capas por medio de la propuesta elaborada (cuadro 6) específica para saprolitos generados a partir de rocas sedimentarias detríticas.

Se marcan tres diferencias importantes respecto a la clasificación de Pedron et al. (2010):

- 1- se descartan los criterios de resistencia a la excavación con pala o golpe de piqueta dada la inherente subjetividad de estos métodos,
- 2- la descripción radicular se realiza con mayor intensidad, dado que lo propuesto por Pedron et al. (2010) se basa en pasturas y
- 3- dada la carencia de repeticiones para un mismo sitio en este trabajo no se puede utilizar los datos de penetrómetro para relacionarlos confiablemente con las clases de meteorización.

La descripción brindada por MGAP. DGRN (2014) es la más útil en términos generales, se toman y se expanden conceptos de la misma, además de implementar el termino saprolito no utilizado en dicha propuesta, pero al no ser específica para rocas sedimentarias como si lo es la descripción de Pedron et al. (2010) es insuficiente.

En la descripción de los perfiles se pudo definir con seguridad los horizontes Ap, AB y Bt. La característica acumulación de arcilla de los horizontes Bt hace que su delimitación a campo sea confiable, delimitaciones que luego fueron corroboradas por los análisis de texturas realizados en laboratorio.

Un factor fundamental para las descripciones completas del SSR es el conocer con seguridad las litologías frescas que actúan como materiales parentales de los suelos excavados para poder identificar las modificaciones que las litologías sufren por medio de la meteorización y el avance de los procesos pedogenéticos. De no conocerse claramente las litologías y de no utilizarse los criterios propuestos en el Cuadro 6, las capas R en el perfil PFYC-01 y PFYC-02 se hubieran considerado como las últimas capas encontradas en la excavación, cuando en realidad no se tratan de rocas frescas, sino con ciertas alteraciones. Dada la limitante del tiempo pautada por la excavadora, y el que se conocían las litologías frescas en estos dos casos al estar cercanas canteras abiertas, se optó por no seguir la excavación en profundidad en estas calicatas.

El horizonte C fue el que presentó más dificultades, sobre todo en el perfil PFYC-02 en el cual, si no se utilizaban los nuevos criterios propuestos, este horizonte C de 62 cm de espesor seguramente sería dividido en diferentes subhorizontes C sin un criterio claro.

En ninguno de los perfiles se encontró una secuencia continua de meteorización como la que se plantea en el Cuadro 6, pero no hubo impedimentos para delimitar las capas en los términos como fueron planteados.

Estos criterios a futuro necesitarían del apoyo de un número apropiado de repeticiones para confirmar su utilidad, pero su utilización se justifica dada su practicidad a ser usada a campo y que las nuevas categorías de capas planteadas para el saprolito permiten discernir mejor sobre posibles dudas en divisiones del horizonte C o de la roca alterada. Además, como se verá en el siguiente apartado, estos nuevos criterios tienen una relación importante con la exploración radicular profunda.

#### 4.2.2 Descripciones macroscópicas de raíces en los perfiles SSR

A continuación, se describen macroscópicamente las raíces encontradas en las tres calicatas profundas en cada horizonte o capa determinados en la sección 4.2.1.

##### 4.2.2.1 Perfil SSR PFYC-01

Profundidad 0 a 25 cm (horizontes Ap y AB): se observan muchas raíces de 3, 1 y 0,5 cm de diámetro, leñosas y resistentes al corte (Figura 66). Estas raíces gruesas, así como sus numerosas ramificaciones, se desarrollan de manera notoria lateral y superficialmente. Si bien han sido cortadas al realizar la excavación, su grosor y lateralidad indicaría que como mínimo los sistemas radiculares de las filas se pueden solapar (distancia entre filas 4 m). Estas raíces gruesas cumplen las funciones de anclaje y de transporte, y sus ramificaciones principalmente laterales de 4<sup>to</sup> a 1<sup>er</sup> orden cumplen las funciones de absorción y transporte respectivamente. -Clasificación tentativa: dominan raíces gruesas leñosas laterales con función de anclaje y transporte. De las anteriores se generan numerosas ramificaciones de 4<sup>to</sup> a 1<sup>er</sup> orden con funciones de transporte y absorción.

Profundidad 25 a 50 cm (horizonte Bt1): a esta profundidad las raíces gruesas mayores a 0,5 cm no son observables (Figura 67 A). Las raíces gruesas de 3 mm con cierto grado de tejido leñoso y horizontales disminuyen notoriamente (Figura 67 C) con un solo orden de ramificación, por lo que se consideran como de función principal de transporte. Las ramificaciones constan de muy pocas raíces menores de 2 mm horizontales sin ramificaciones (Figura 67 B).

-Clasificación tentativa: muy pocas a nulas raíces gruesas y leñosas de 5<sup>to</sup> orden laterales y de transporte . Muy pocas finas laterales principalmente de transporte de 4<sup>to</sup> y 3<sup>er</sup>.

Profundidad 50-100 cm (horizonte Bt2): a los 60 cm se observan pocas raíces gruesas de 4 a 3 mm, leñosas y horizontales (Figura 68 A). Hasta los 100 cm se observan frecuentes raíces finas verticales de 1 mm (Figura 68 B en rojo) que ramifican en abundantes raíces más finas (Figura 68 B en amarillo). Las raíces de 3 mm se consideran como las de 5<sup>to</sup> orden, las de 1 mm se consideran de 4<sup>to</sup> orden cuyas ramificaciones por lo menos alcanzan al 2<sup>do</sup> orden, por lo que se presume que la actividad de absorción aumenta notoriamente a esta profundidad respecto al horizonte Bt1 suprayacente.

-Clasificación tentativa: escasas raíces gruesas leñosas horizontales de transporte de 5<sup>to</sup> orden. Frecuentes verticales de 4<sup>to</sup> orden de transporte, con abundantes ramificaciones hasta 2<sup>do</sup> orden de actividad absorbente.

Profundidad 100-140 cm (horizonte C): pocas raíces de 2 mm duras algo leñosas, mayormente laterales. Las raíces de 1 mm son abundantes y notorias, de neto desarrollo vertical, las cuales presentan decoloración blanca asociada, que en muchas secciones se observan con formas dendríticas pequeñas, por lo que se presume que en estas decoloraciones dendríticas pequeñas se vinculan a raíces muy finas imperceptibles a la vista o que se dañan al refrescar la cara del perfil (Figura 69). Las raíces de 2 mm se comportarían como las de transporte (4<sup>to</sup> orden) y las otras numerosas y pequeñas ramificaciones indicarían ordenes hasta el 1<sup>er</sup>, por lo que la absorción sería muy importante en esta profundidad.

-Clasificación tentativa: pocas finas algo leñosas laterales mayormente de 4<sup>to</sup> orden de transporte. Abundantes raíces finas verticales de todos los órdenes y de función absorbente dominante.

Profundidad 140-200 cm (capa CrR): se puede observar un cambio de comportamiento de las raíces al llegar a los 140 cm, que pasan de ser verticales, abundantes y finas a muy finas (Figura 70 A en amarillo) a ser horizontales de menor abundancia y mayor grosor en general (Figura 70 A en rojo). Las raíces en esta profundidad son pocas, en su mayoría de 1 mm de diámetro, frecuentes, laterales y duras (Figura 70 B), las de menor diámetro se ramifican de las anteriores, siendo muy cortas y de poca o aparente nula ramificación de desarrollo lateral (Figura 70 C). Se consideran a las de 1 mm como de 4<sup>to</sup> orden por ser origen de ramificaciones muy finas y cortas (o que se quiebran) de 3<sup>er</sup> y quizás 2<sup>do</sup> orden, por lo que se supone una inclinación hacia la función de transporte comprando con la absorción a esta profundidad.

-Clasificación tentativa: raíces finas laterales de 4<sup>to</sup> orden de transporte dominantes. Ramifican muy finas de 3<sup>er</sup> y quizás 2<sup>do</sup> orden laterales de absorción. Igual actividad de absorción y transporte.



Figura 66. Raíces en 0-25 cm (horizontes Ap y AB) en PFYC-01





Figura 67. Raíces en 25 a 50 cm (horizonte Bt1) en PFYC-01

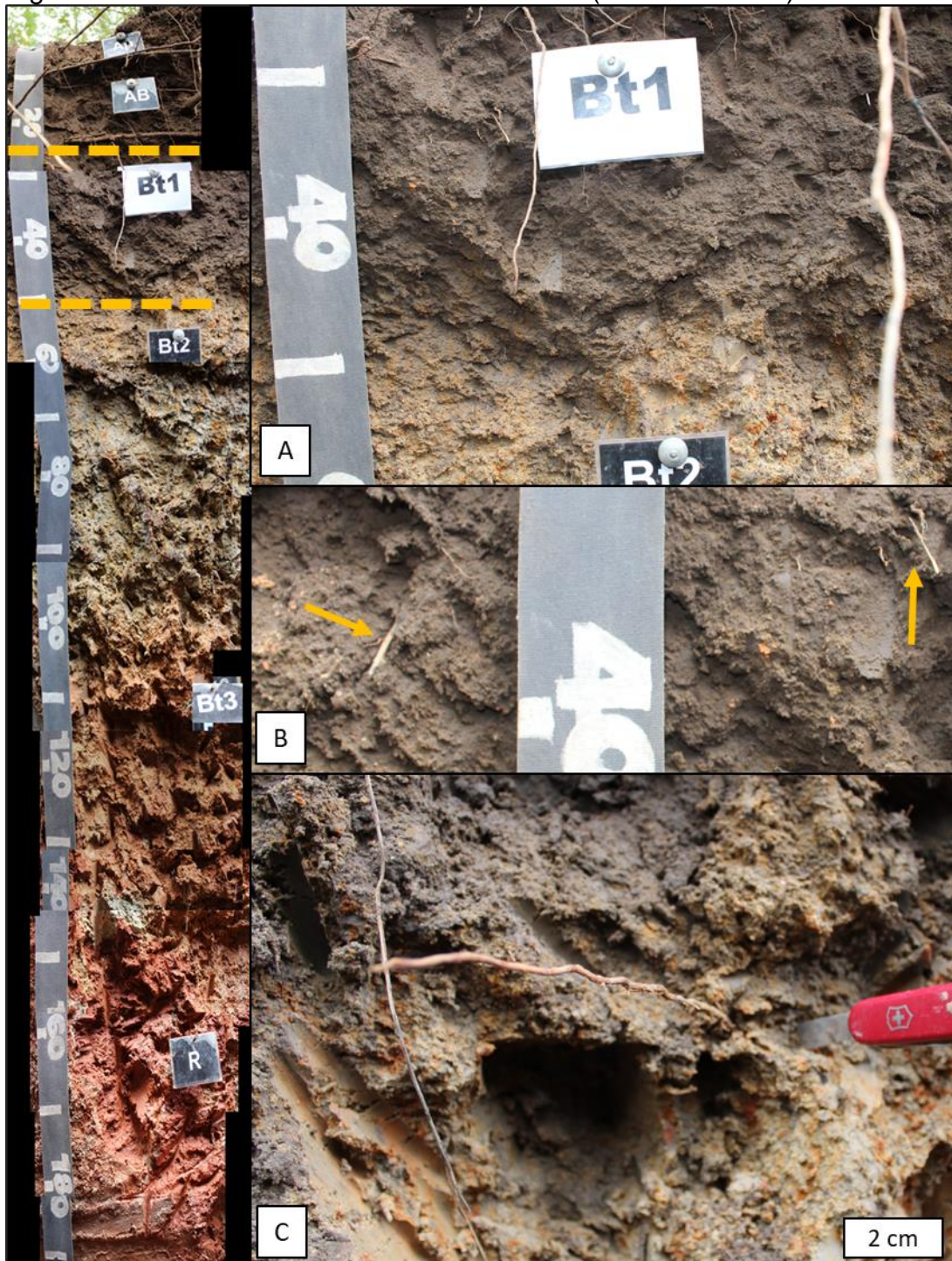




Figura 68. Raíces en 50 a 100 cm (horizonte Bt2) en PFYC-01

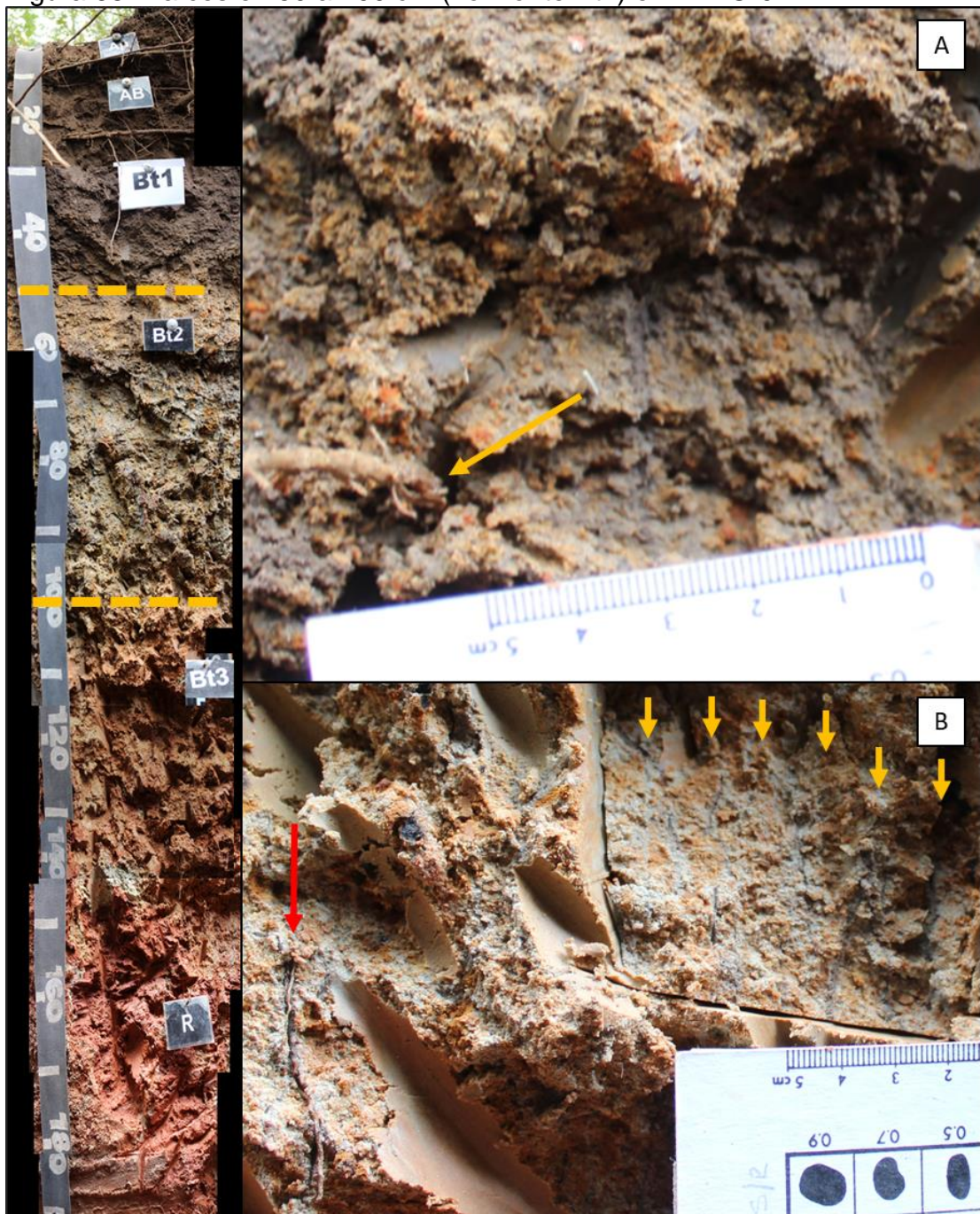




Figura 69. Raíces en 100 a 140 cm (horizonte C) en PFYC-01

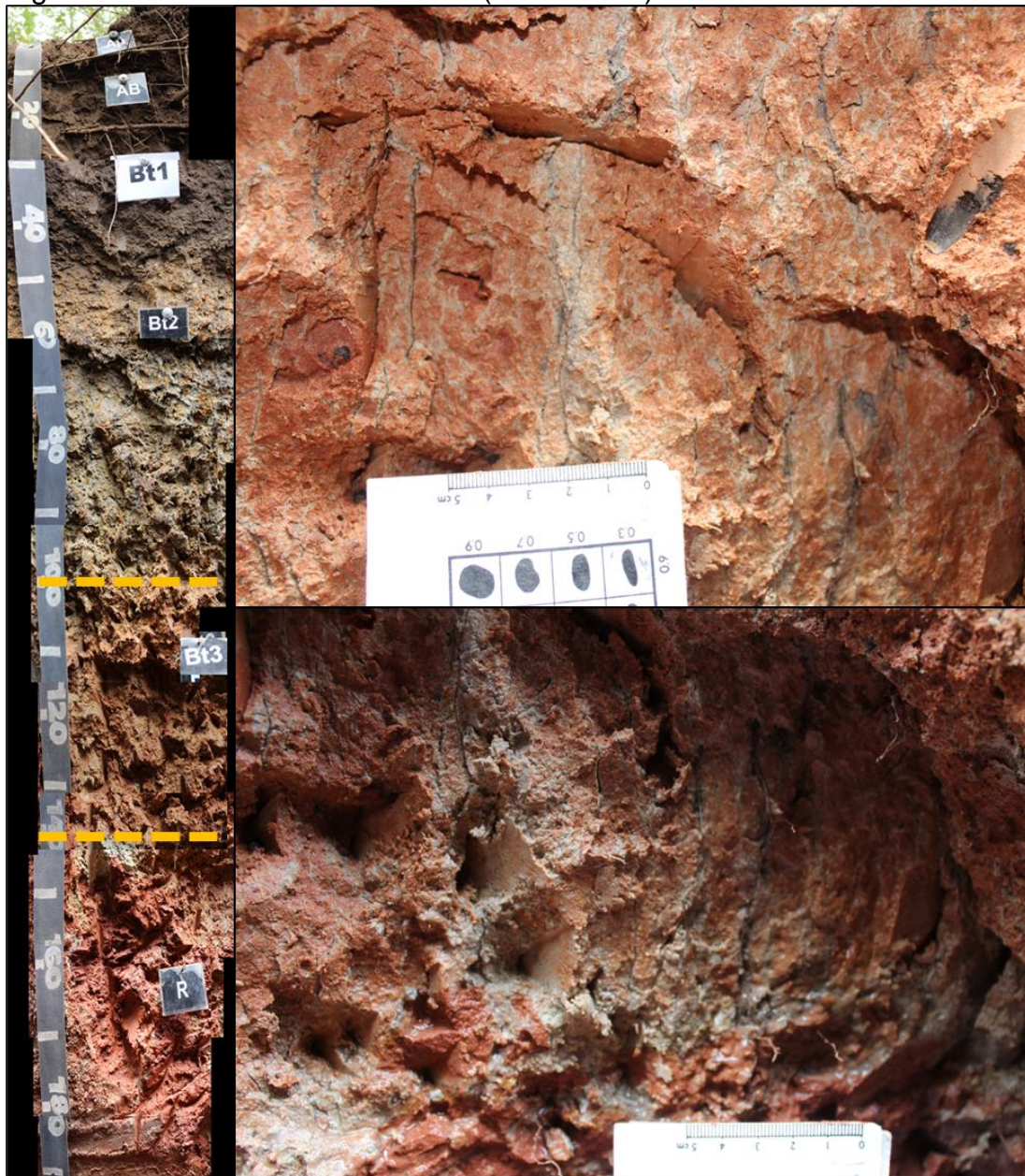
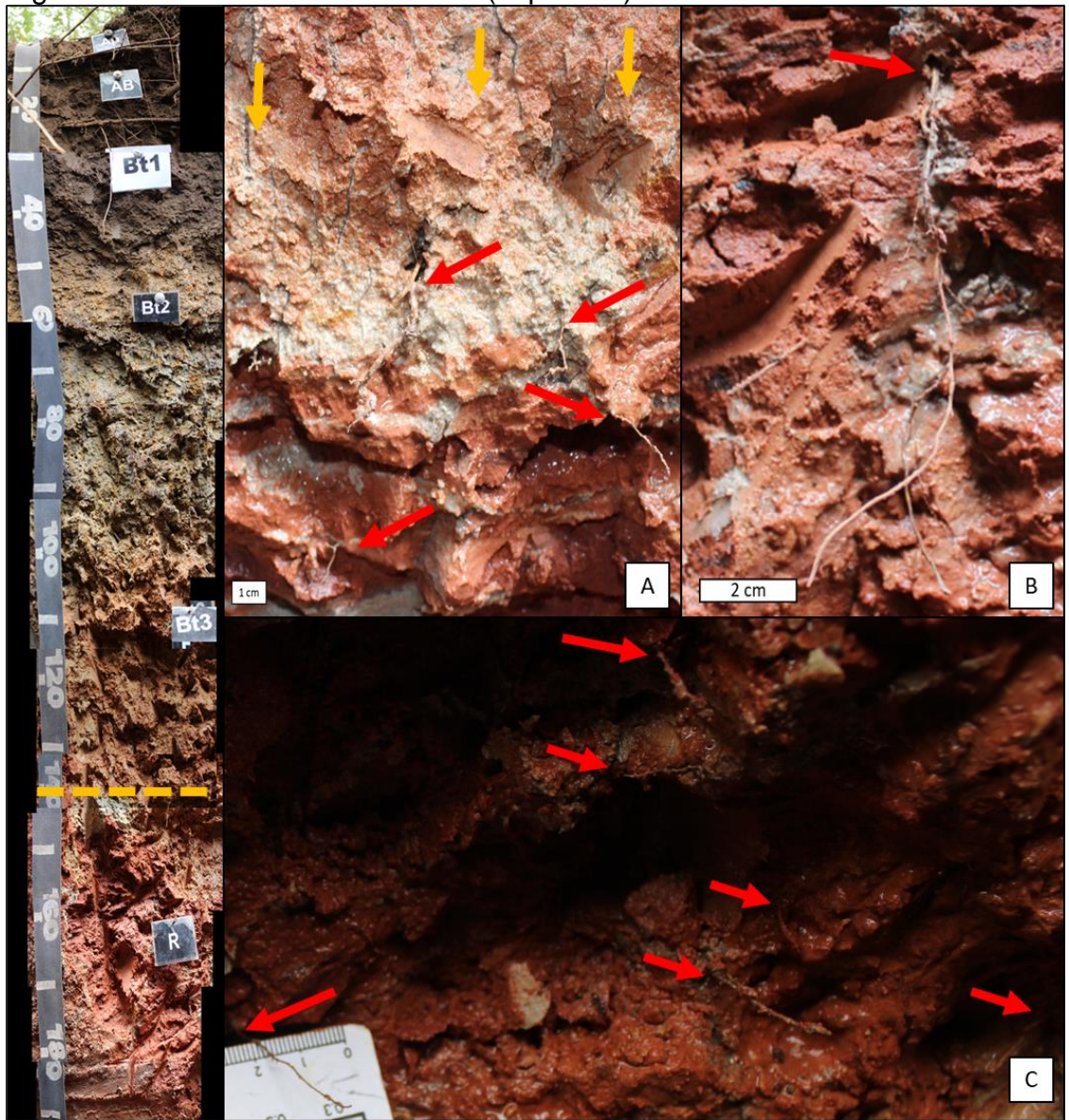




Figura 70. Raíces en 140 a 200 cm (capa CrR) en PFYC-01



#### 4.2.2.2 Perfil SSR PFYC-02

Profundidad 0 a 30 cm (horizontes Ap y A1): se observan abundantes raíces gruesas de 5 cm hasta 0,5 cm de diámetro, leñosas y resistentes al corte. Estas raíces gruesas y sus numerosas ramificaciones se desarrollan de manera horizontal dominante. Si bien han sido cortadas al realizar la excavación, su grosor y lateralidad indicaría que como mínimo los sistemas radiculares de las filas se pueden solapar a distancia entre filas de 4 m (Figura 71). Estas raíces gruesas cumplen las funciones de anclaje y transporte, sus ramificaciones de 1<sup>er</sup> a 4<sup>to</sup> orden que se desarrollan de manera vertical también, cumplen las funciones de absorción y transporte (4<sup>to</sup> orden). -Clasificación tentativa: dominan raíces gruesas, leñosas, laterales con función de anclaje y transporte de 5<sup>to</sup> orden. De las anteriores se generan numerosas ramificaciones de 4<sup>to</sup> a 1<sup>er</sup> orden con función de transporte y absorción.

Profundidad 30 a 62 cm (horizonte Bt): muchas raíces gruesas de 0.5 cm leñosas y resistentes al corte de desarrollo laterales con función de transporte. Le siguen en frecuencia otras leñosas, pero menos resistentes de 2 mm de desarrollo lateral. Se pueden observar muchas ramificaciones de 1 mm verticales algo resistentes al corte con la mano distribuidas en todo el perfil por igual, con dos niveles de ramificación observable que indicarían una mayor capacidad de transporte que de absorción en este nivel (Figura 72). -Clasificación tentativa: muchas raíces gruesas leñosas laterales de 5<sup>to</sup> orden con función de transporte. Muchas laterales de probable 4<sup>to</sup> orden de transporte y muchas raíces finas verticales de 3<sup>er</sup> orden con ramificaciones de hasta 1<sup>er</sup> orden con función de absorción. Actividad de transporte por igual a la de absorción.

Profundidad 62 a 85 cm (horizonte C): muchas raíces gruesas de 3 mm, algo leñosas y resistentes al corte, laterales en su mayoría, de las cuales se ramifican otras pocas de menor tamaño y menor resistencia al corte. Estas ramificaciones son raíces finas verticales de 1 mm (Figura 73). Se interpreta que la actividad radicular está centrada al transporte en esta sección. -Clasificación tentativa: muchas raíces gruesas algo leñosas, mayormente laterales de 5<sup>to</sup> orden. Escasas ramificaciones finas verticales de 4<sup>to</sup> orden. Predominio de función de transporte.

Profundidad 85-120 cm (capa CrR): son abundantes las raíces finas de 1 mm o menores, su desarrollo ocurre en todos los planos siguiendo las fracturas (Figura 74 A) o utilizan debilidades en el material como remanente de estratificación en las areniscas o clastos pelíticos y la periferia de los mismos (Figura 74 C, D y E). Comienzan a observarse frecuentes formas dendríticas muy ramificadas con abundantes pelos radiculares blanquecinos (Figura 74 B). Pequeñas formas dendríticas se observan en los planos de fractura donde se

acumulan moteados negros, lo que podría indicar uno de los orígenes de los mismos. Se consideran a las raíces de 1 mm como las de mayor orden y las de menor tamaño dendríticas y muy ramificadas como pertenecientes a todos los otros ordenes menores, por lo que la actividad de transporte y de absorción podrían estar equilibradas a esta profundidad.

-Clasificación tentativa: abundantes raíces finas siguiendo fracturas en todos los planos de 4<sup>to</sup> orden con funciones de transporte. Frecuentes raíces muy finas en todos los planos siguiendo las fracturas, de todos los órdenes menores con dominancia en la actividad de absorción. Se considera a las actividades de absorción y de transporte como de igual relevancia en esta profundidad.

Profundidad 130-170 (capa Rr): pocas raíces de 1 a 2 mm resistentes de comportamiento predominante vertical que atraviesan a la arenisca fácilmente (Figura 75 A) y que rodean y atraviesan a los clastos de arcilla (Figura 75 B) que se consideran de 4<sup>to</sup> orden. De estas de 1 mm se ramifican muchas más finas de forma dendrítica muy ramificadas hasta que no son visibles a simple vista, que producen decoloraciones negras en las areniscas y en los clastos con formas dendríticas (Figura 75 C) lo que se asociaría con actividad de absorción y exudados radiculares.

-Clasificación tentativa: pocas raíces finas verticales de 4<sup>to</sup> orden con función de transporte. Ramifican muy finas de todos los restantes ordenes en todos los planos preferenciales. Predominante función absorbente.



Figura 71. Raíces en 0 a 30 cm (horizontes Ap y AB) en PFYC-02

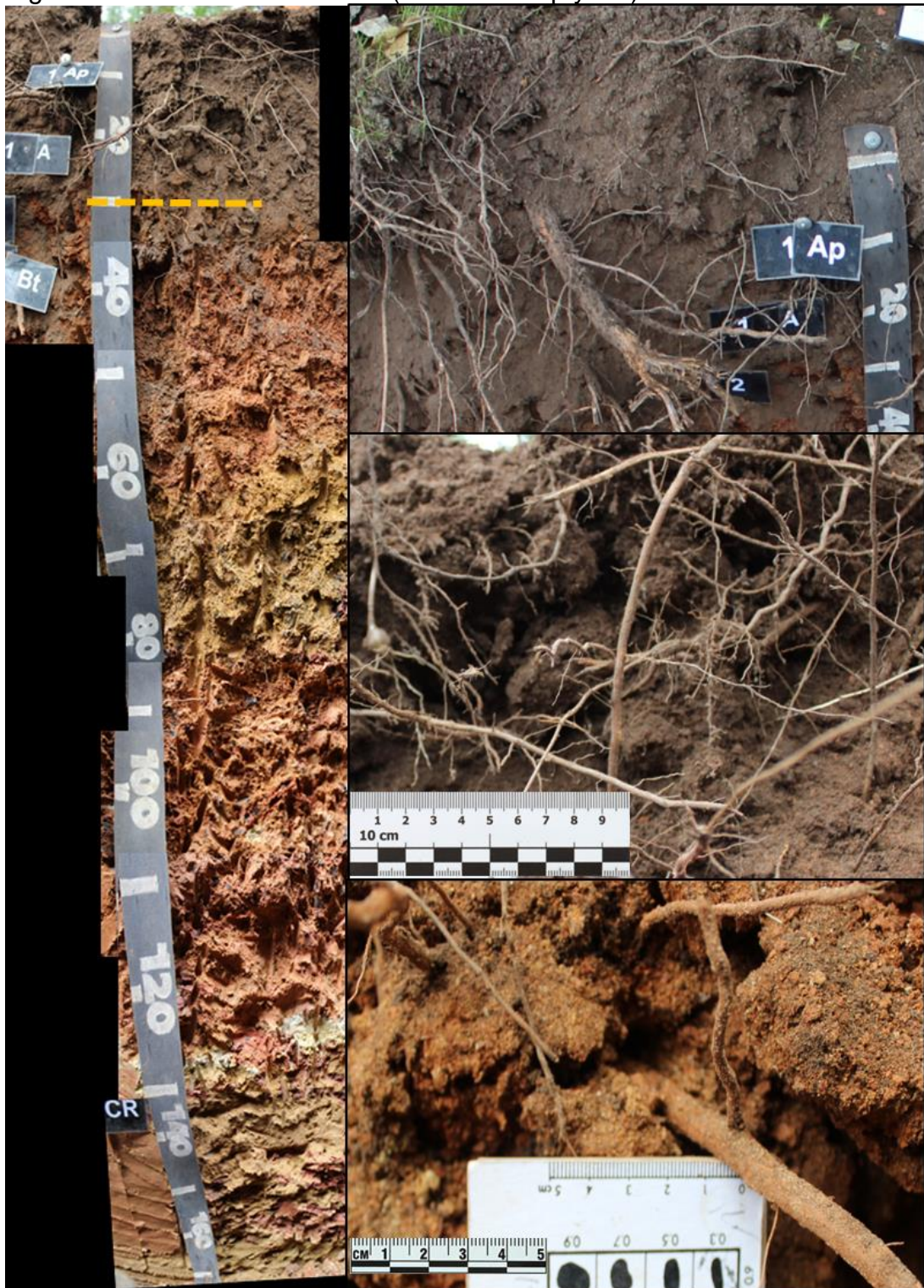




Figura 72. Raíces en 30 a 62 cm (horizonte Bt) en PFYC-02

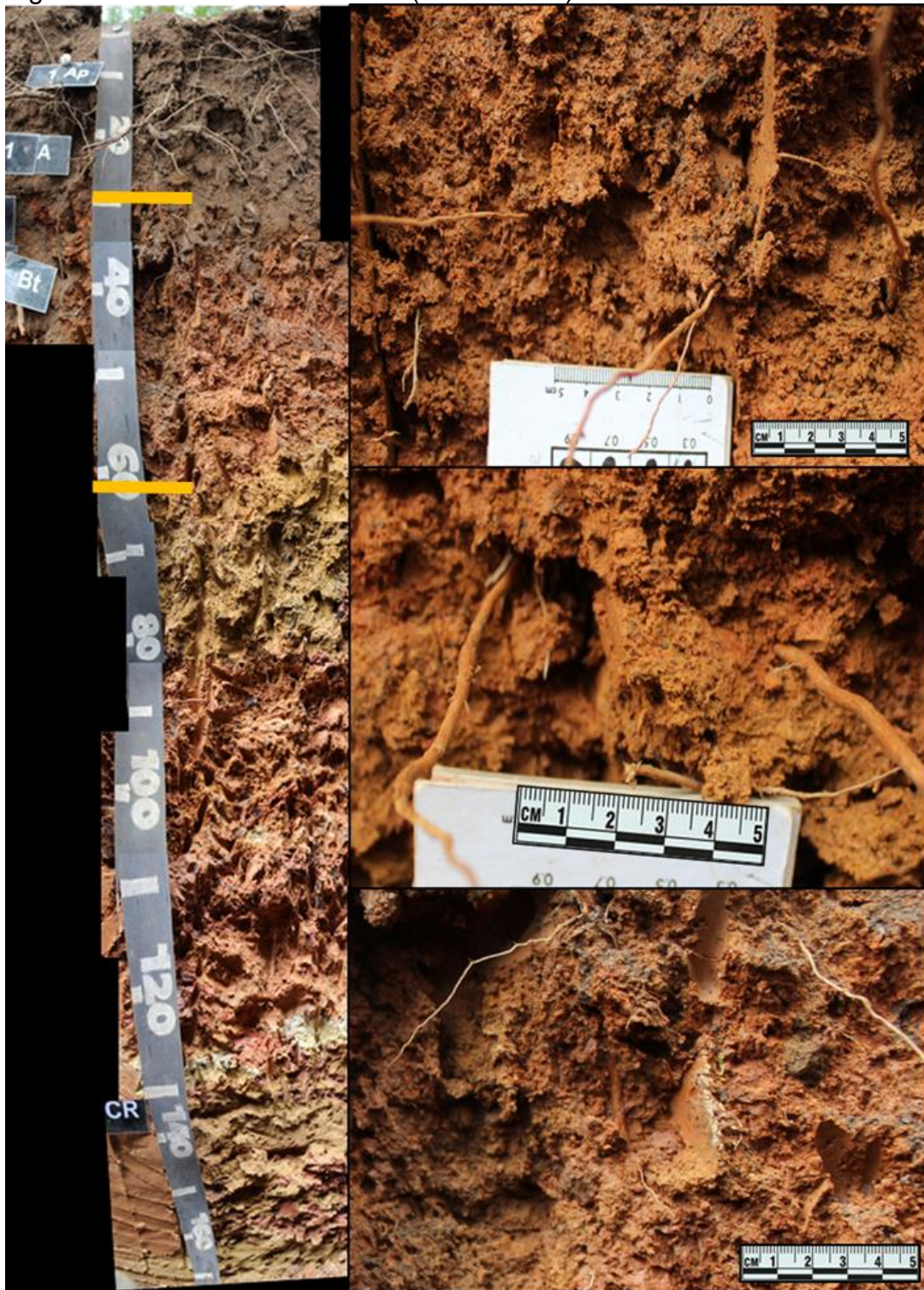




Figura 73. Raíces en 62 a 85 cm (horizonte C) en PFYC-02

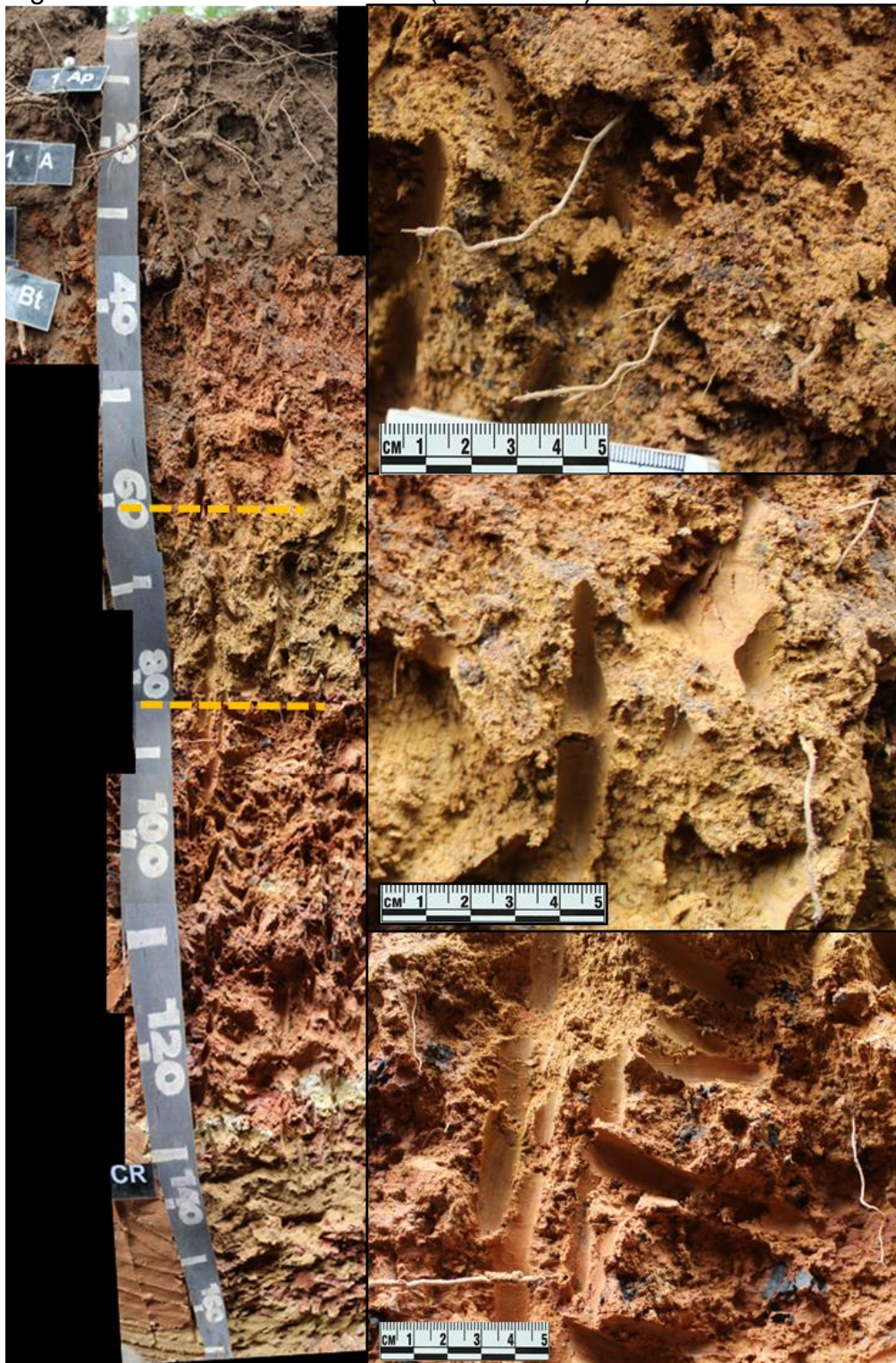




Figura 74. Raíces en 85 a 120 cm (capa CrR) en PFYC-02

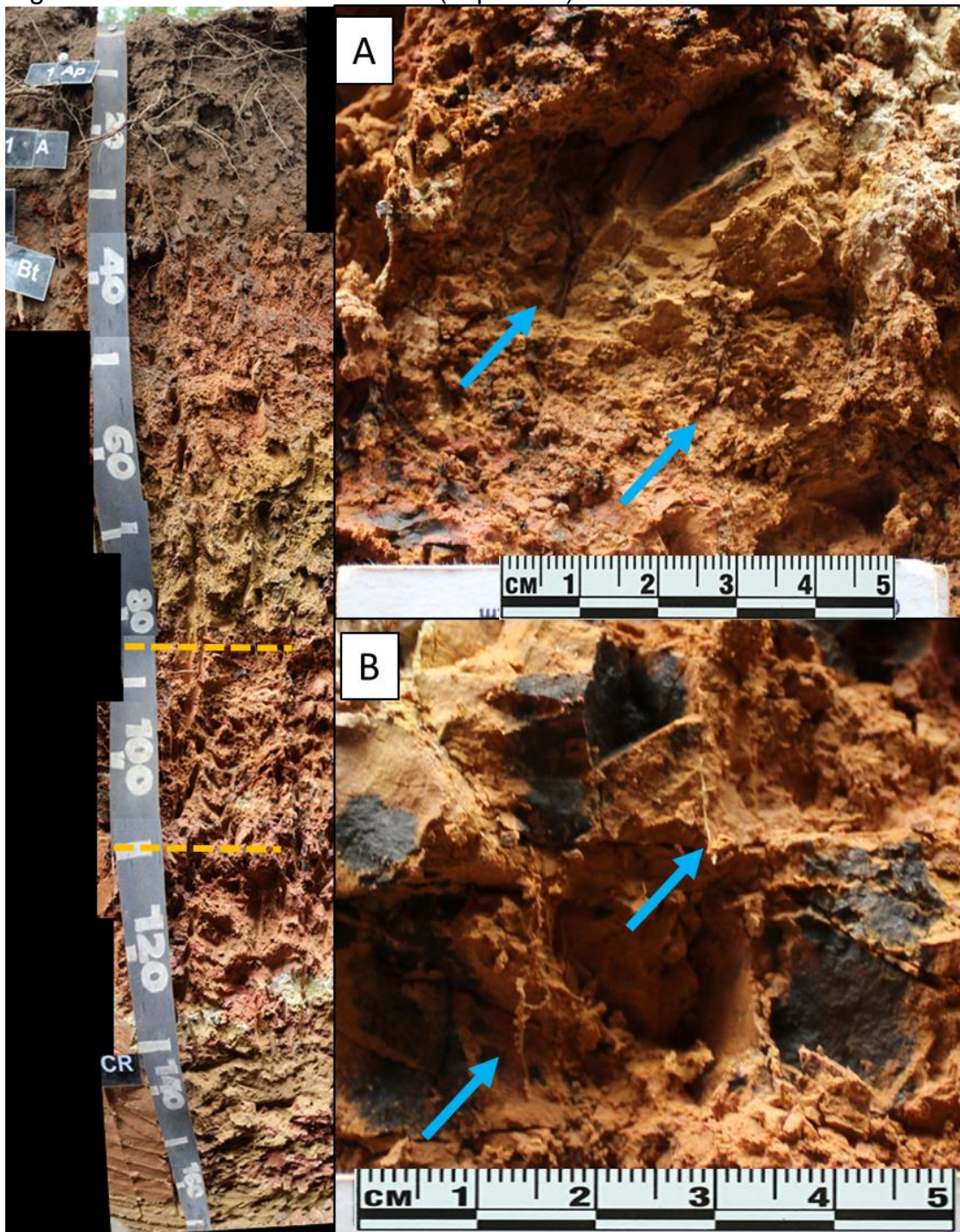




Figura 75. Raíces en 85-120 cm (capa CrR) en PFYC-02

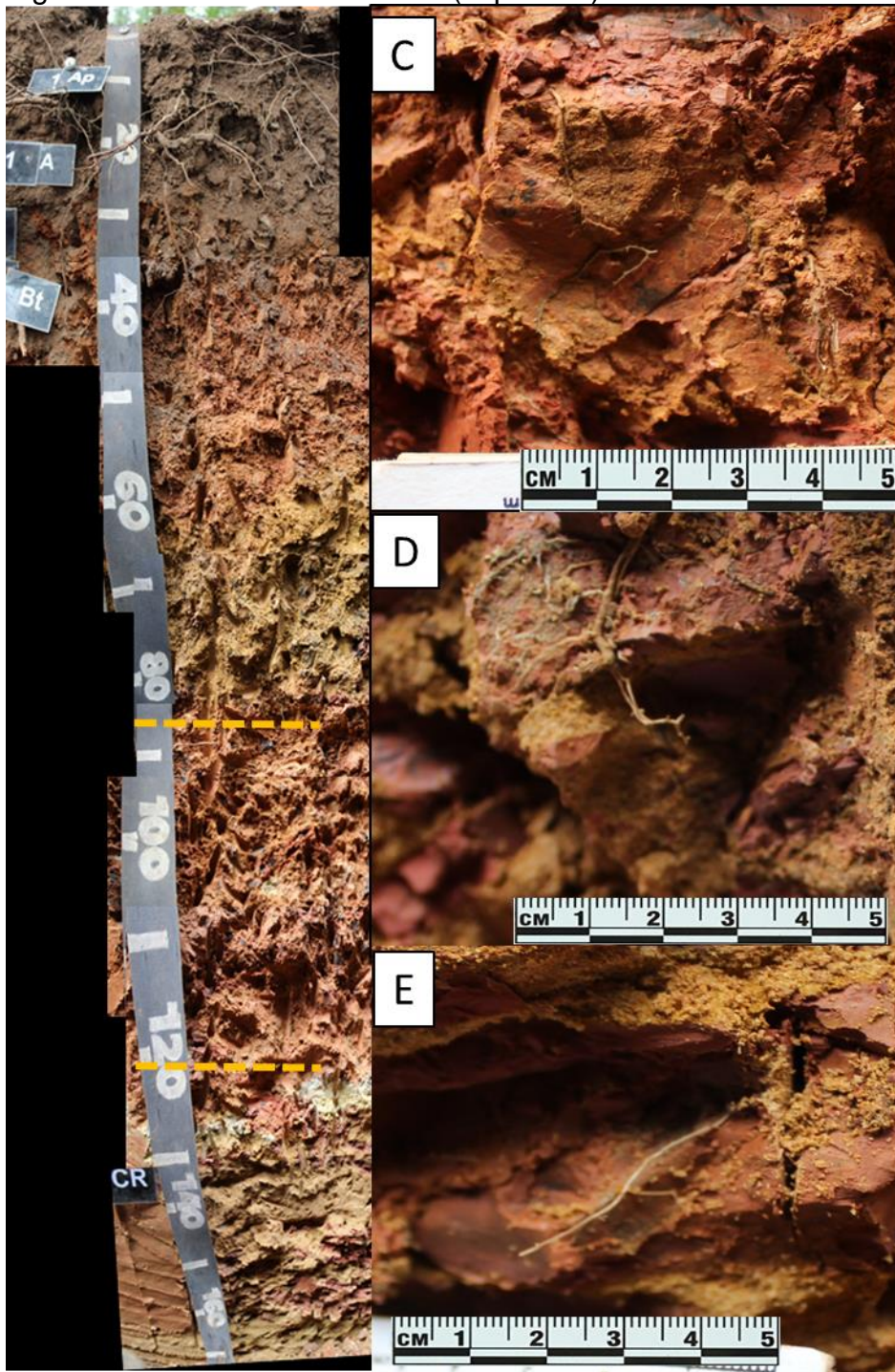




Figura 76. Raíces en 130 a 170 cm (capa Rr) en PFYC-02





#### 4.2.2.3 Perfil SSR PFYC-03

Profundidad 0 a 15 cm (horizonte Ap): se observan pocas raíces de 3 cm y abundantes de 0,5 cm de diámetro, leñosas y resistentes al corte. Estas raíces gruesas de 5<sup>to</sup> orden y sus numerosas ramificaciones se desarrollan preferentemente de manera horizontal, aunque son notorias las verticales (Figura 77). Las raíces gruesas cumplen las funciones de anclaje y de transporte y sus ramificaciones de 1<sup>er</sup> a 4<sup>to</sup> orden que se desarrollan de manera horizontal mayoritariamente cumplen funciones de absorción y transporte. -Clasificación tentativa: abundantes raíces gruesas de 5<sup>to</sup> orden con actividad de transporte y anclaje. Ramifican numerosas raíces finas, laterales mayormente de todos los órdenes cumpliendo funciones de absorción y transporte.

Profundidad 15 a 30 cm (horizonte AB): muchas raíces gruesas de 0,5 cm de diámetro, leñosas y resistentes al corte con desarrollo laterales dominante. De las anteriores se observan muchas ramificaciones de diversos grosores, siendo las más gruesas todavía leñosas (Figura 78). Las ramificaciones se distribuyen tanto horizontal como verticalmente siendo un área de activa absorción y transporte. -Clasificación tentativa: muchas raíces gruesas de 5<sup>to</sup> orden laterales con función de transporte y posiblemente anclaje. Ramifican muchas finas, laterales y verticales, de todos los órdenes indicando una posible área de mucha absorción y transporte.

Profundidad 30-45 cm (horizonte Bt1): pocas raíces gruesas de 0,5 a 0,3 cm de desarrollo vertical (Figura 79 A), leñosas y resistentes a la rotura, de las cuales se ramifican muchas raíces muy finas de menos de 0,1 mm extensas y poco ramificadas, muy probablemente de 4<sup>to</sup> a 3<sup>er</sup> orden, (Figura 79 B) de desarrollo vertical, lo que podría estar indicando un dominio en la función de transporte y colonización vertical. -Clasificación tentativa: pocas raíces gruesas de 5<sup>to</sup> orden verticales de transporte. Ramifican frecuentes raíces muy finas de 4<sup>to</sup> orden y pocas de 3<sup>er</sup> orden, todas verticales, Posible mayor actividad de transporte que de absorción.

Profundidad 45-90 cm (horizonte Bt2): muchas raíces gruesas de 3 mm algo leñosas, de distribución homogénea en el perfil y de desarrollo lateral (mayormente). Estas raíces en algunas secciones son ovaladas hasta levemente planas. Muchas raíces de 2 a 1 mm con distribución homogénea en el perfil y de desarrollo lateral. Presentan pocas ramificaciones en todas direcciones de desarrollo de todos los órdenes menores, hasta que no son visibles a simple vista (Figura 80). Se puede considerar una facilidad en la colonización radicular y un aumento en la función de absorción. -Clasificación tentativa: frecuentes raíces gruesas de 5<sup>to</sup> orden, laterales

mayormente de morfología levemente aplanada. Frecuentes ramificaciones en todos los planos y en todos los órdenes, indicando una posible igualdad en capacidad de absorción y transporte.

Profundidad 90-100 cm (horizonte C): se observan nuevamente pocas raíces gruesas de 0,5 cm verticales leñosas y resistentes al corte y muchas raíces de 1-2 mm algo leñosas verticales con frecuentes ramificaciones verticales de menores ordenes observables a simple vista (Figura 81). Se puede considerar un aumento en esta zona de la actividad radicular dada la presencia de grandes raíces de transporte y abundantes raíces de absorción. -Clasificación tentativa: pocas raíces gruesas de 5<sup>to</sup> orden, verticales de transporte. Muchas raíces de 4<sup>to</sup> de transporte con frecuentes ramificaciones en todos los órdenes de raíces finas verticales con actividad de absorción. Posiblemente similar nivel de actividad de transporte y absorción.

Profundidad 100-115 cm (capa Cr): muchas raíces circulares y aplanadas de 1 mm de 4<sup>to</sup> orden, algo leñosas, laterales y verticales desarrollándose por medio de las fracturas presentes (Figura 81). Estas raíces cuentan con muchas ramificaciones de las cuales se llegan a observar fácilmente las de 3<sup>er</sup> orden, siendo difíciles de ver las más finas y de menor orden. Se podría considerar que en esta zona la actividad de transporte y absorción se encuentran igualadas. -Clasificación tentativa: muchas raíces finas laterales y verticales por fracturas de 4<sup>to</sup> orden y actividad de transporte. Ramifican raíces más finas de hasta 3<sup>er</sup> orden en todos los planos de las fracturas con actividad de absorción. Igual de transporte y absorción.

Profundidad 115-160 cm (capa CrR y R): pocas raíces gruesas de 1 a 0,5 cm leñosas, muy aplanadas que se desarrollan a través de las fracturas en todas las direcciones (Figura 81 E). De estas se ramifican frecuentes raíces de todos los órdenes menores siempre de formas planas dado que se localizan en los planos de fractura, siendo algunas algo leñosas (Figuras 82 A y B). Las más finas de menos de 0,5 mm son de formas dendríticas (Figura 82 C) hasta plumosas (Figura 82 D). La gran cantidad de raíces de bajos ordenes muy ramificadas y con pilosidad que cumplen mayoritariamente funciones absorbentes podrían estar indicando una gran actividad de absorción que es canalizada por escasas de 5<sup>to</sup> orden de transporte. -Clasificación tentativa: pocas raíces gruesas muy aplanadas de 5<sup>to</sup>, con desarrollo en todos los planos siguiendo las fracturas y actividad de transporte. Frecuentes raíces finas planas siguiendo las fracturas en todos los planos, de todos los órdenes predominando las de función de absorción por encima de las de transporte.

Figura 77. Raíces en 0 a 15 cm (horizonte Ap) en PFYC-03

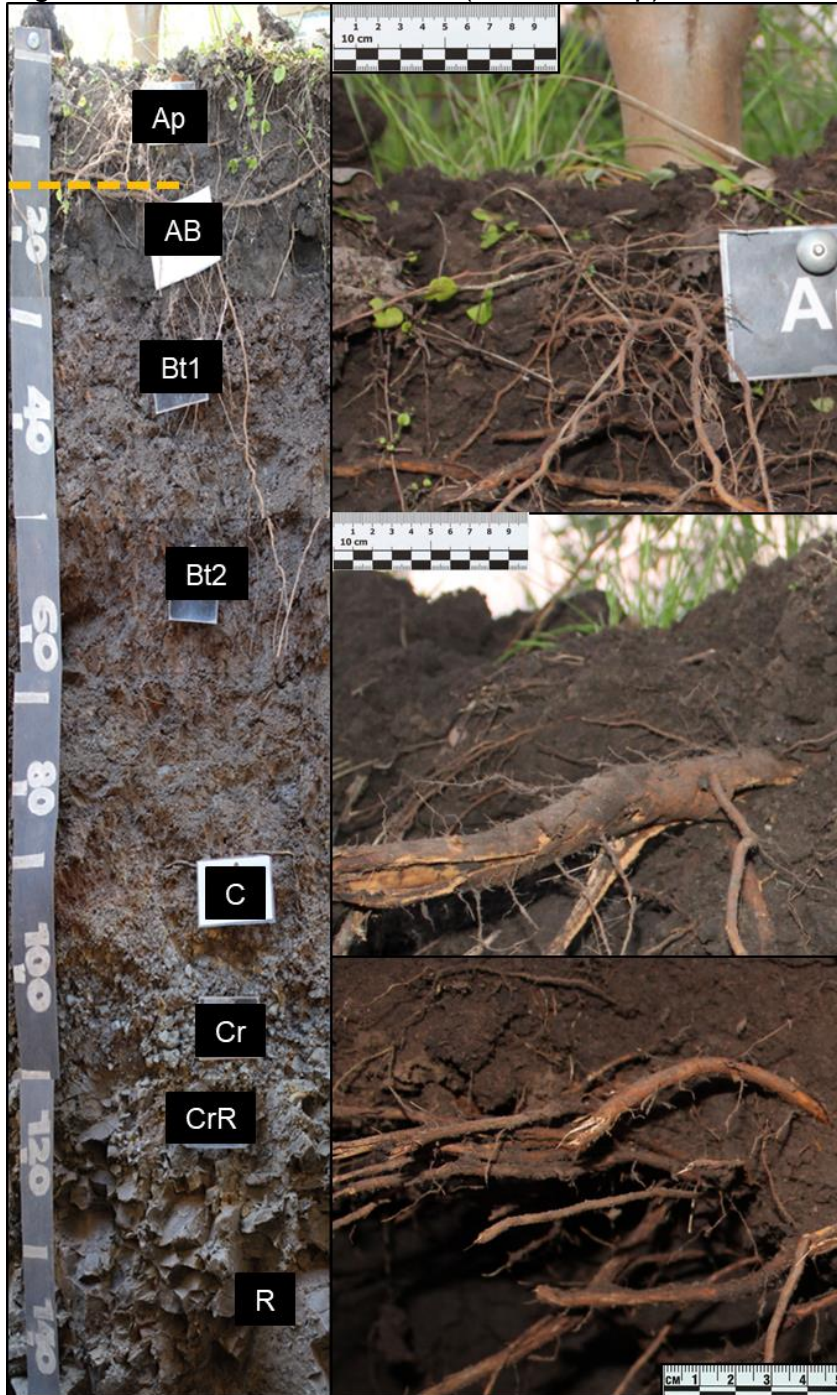




Figura 78. Raíces en 15 a 30 cm (horizonte AB) en PFYC-03





Figura 79. Raíces en 30 a 45 cm (horizonte Bt1) en PFYC-03

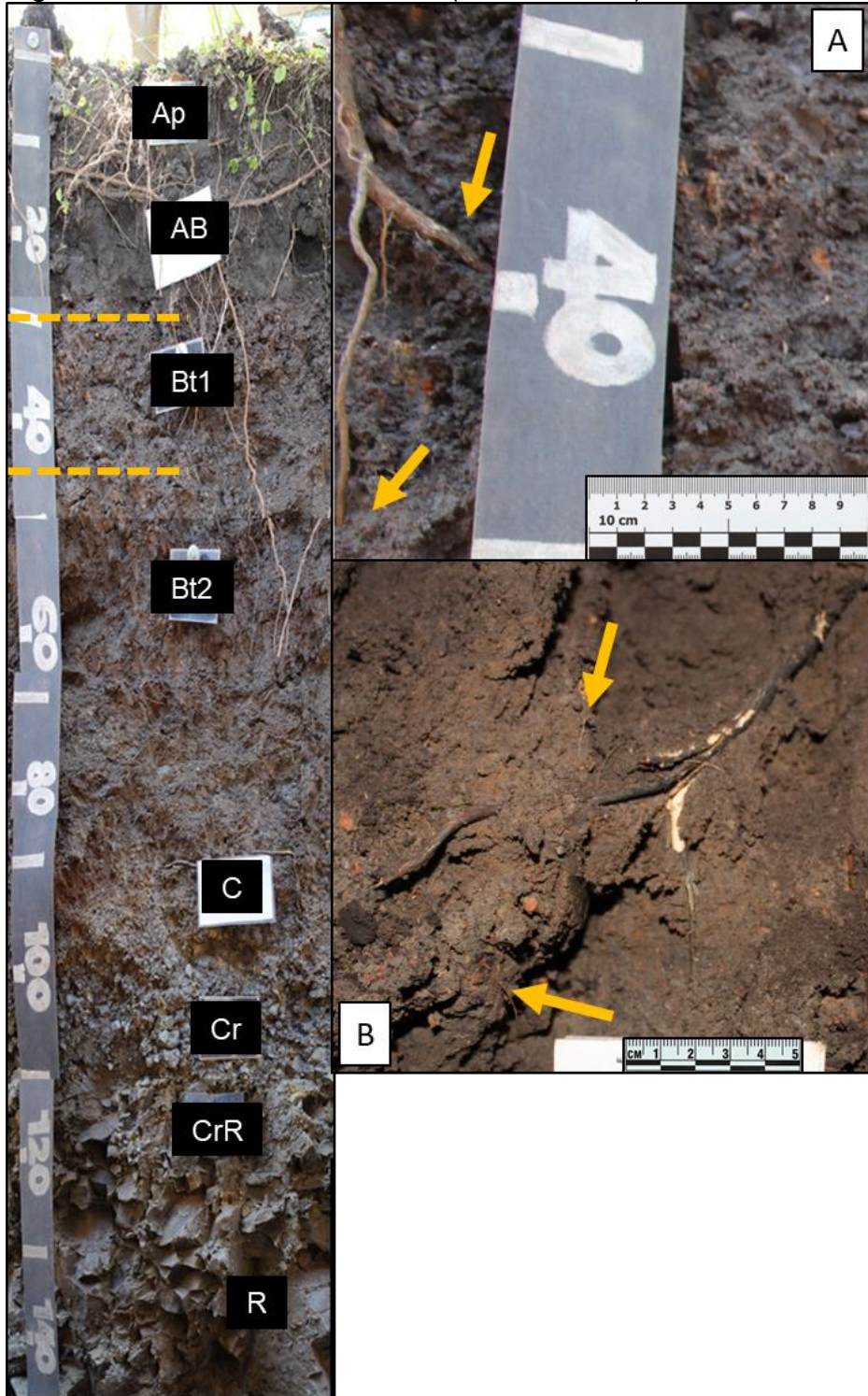




Figura 80. Raíces en 45 a 90 cm (horizonte Bt2) en PFYC-03

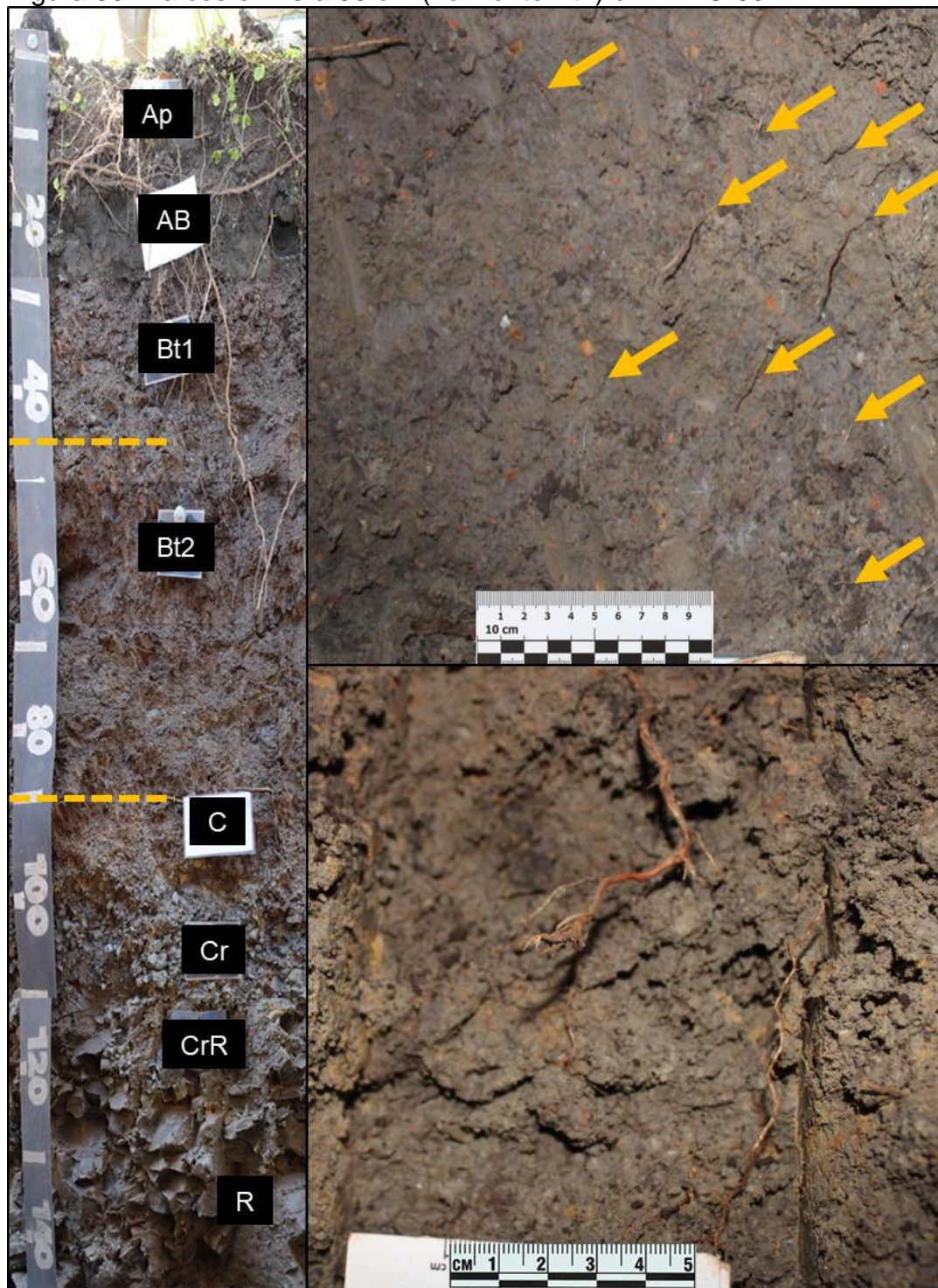




Figura 81. Raíces en 90 a 100 cm (horizonte C) en PFYC-03

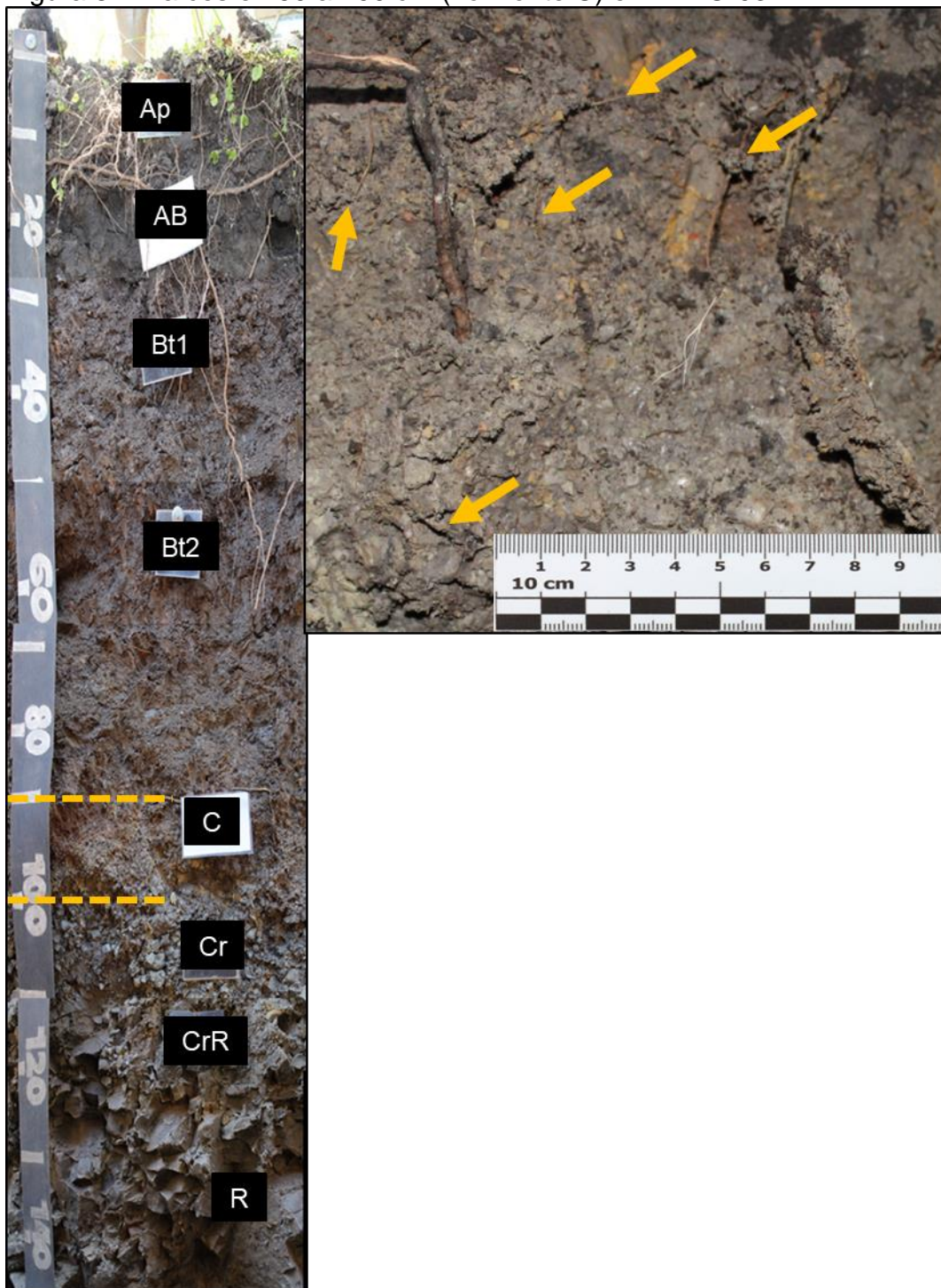


Figura 82. Raíces en 100 a 115 cm (capa Cr) en PFYC-03

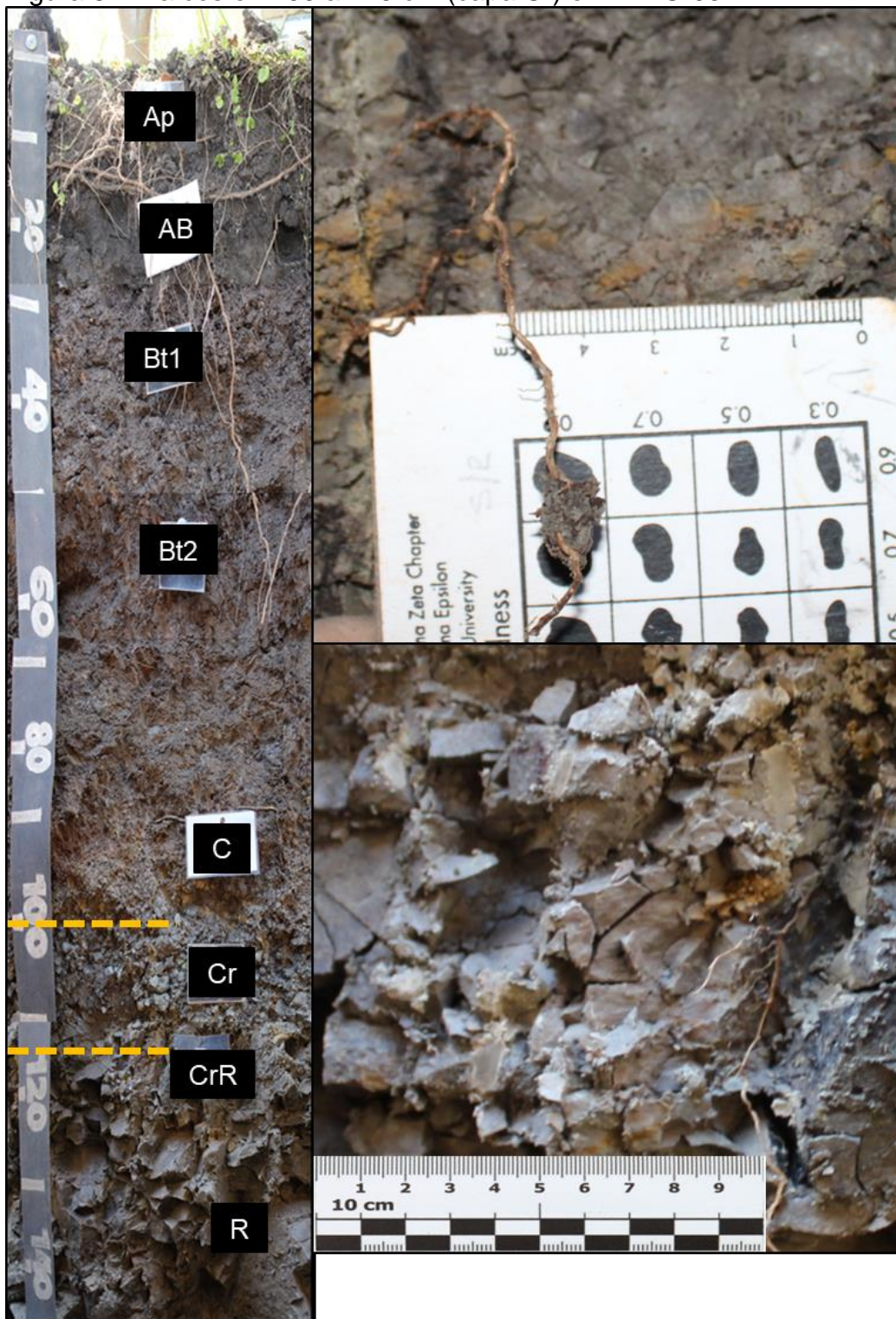
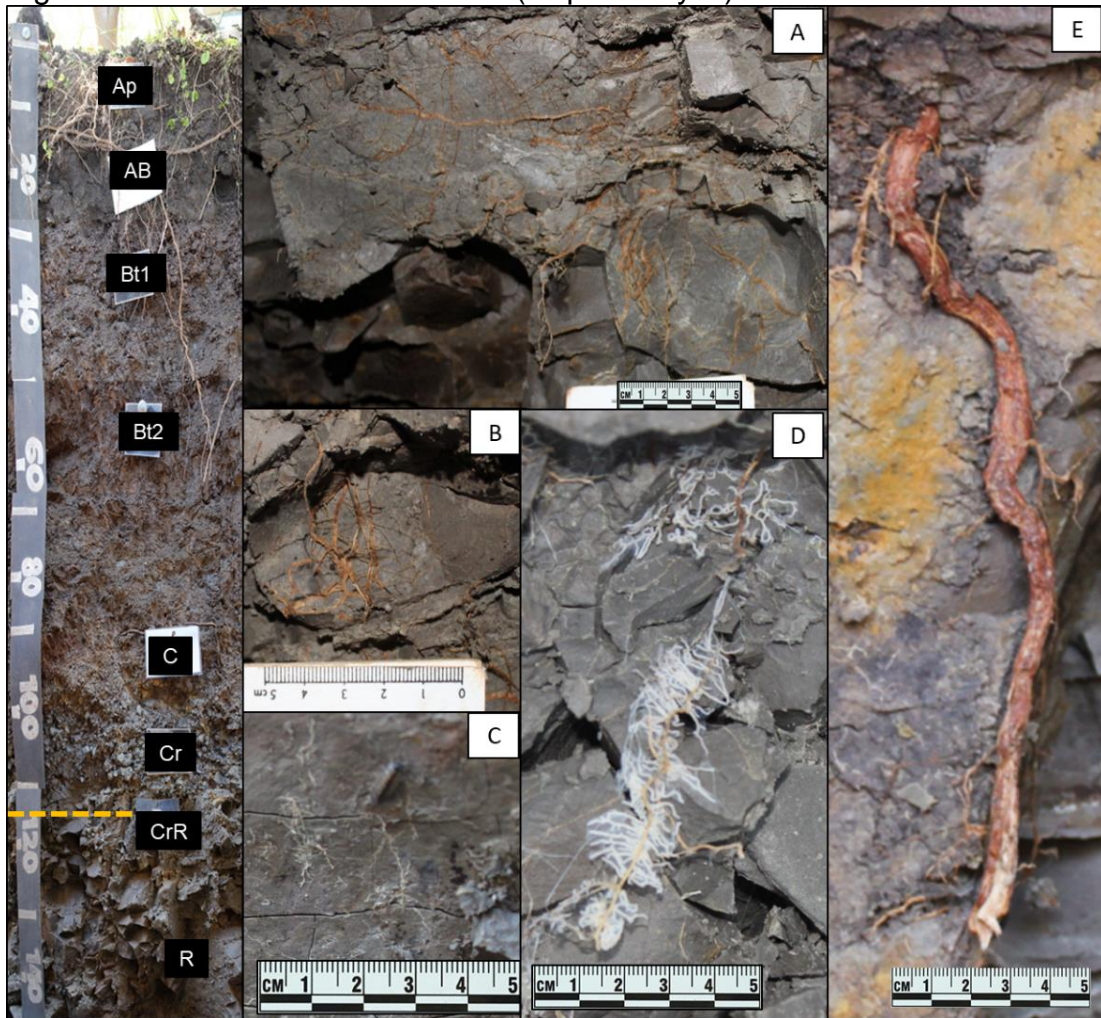




Figura 83. Raíces en 115 a 160 cm (Capa CrR y R) en PFYC-03



#### 4.2.2.4 Discusión sobre las descripciones de raíces obtenidas

Por medio de apertura de calicatas profundas se accedió al sistema radicular procedente del cultivo comercial para pulpa de *Eucalyptus grandis*. Se confirmó por medios visuales que las raíces finas de *Eucalyptus* son notoriamente diferentes a las de las escasas gramíneas que estaban presentes, siendo más gruesas, de color más oscuro y más resistentes a la rotura. La raíz de la vegetación herbácea no generaba raíces gruesas.

Lo primero en confirmarse es la extensión radicular profunda, al menos hasta los 2 metros de profundidad en plantaciones de *E. grandis* con edad de 2 años y 1 mes, y al menos hasta 1,70 metros en plantaciones de *E. grandis* con edad de 1 año y 6 meses. Cabe resaltar que el máximo de profundidad fue

pautado hasta que se llegó al material litológico que estuviera lo menos alterado posible, además de la limitación por la dinámica de la operativa de la máquina retroexcavadora, por lo que no se puede descartar que la expansión radicular en profundidad no sea mayor. Estas observaciones van en sintonía con lo publicado por diversos autores (Bouillet et al. 2002, Jama et al., Pacheco y Louzada, citados por Bouillet et al. 2002) para el cultivo de *Eucalyptus* en el Congo, Kenya y Brasil, donde han observado que con edades de 3 meses ya logran alcanzar profundidades de 3 metros y con 2 años 6,2 metros. Christina et al. (2011) observaron desarrollos radiculares a 9,2 metros de profundidad para la edad de 1,5 años y 19,2 metros con 3,5 años en *Eucalyptus*. Según el estudio de Laclau et al. (2013) la mayoría del volumen del suelo fue explorado por raíces finas en los primeros 3 m de suelo, desde el 1 año de plantado en adelante y Christina et al. (2011) proponen una extensión vertical aérea y subsuperficial casi simétrica (sincronicidad), situación que se cumple hasta que el frente de desarrollo radicular alcanza un 85% de la altura del árbol de altura promedio de 20 metros, pero por la causa de que las raíces finas alcanzaron la cercanía de la napa freática. De acuerdo a Pinheiro et al. (2016) la exploración radicular profunda en sincronicidad con la parte aérea aplica tanto para arboles procedentes de semillas como de clónales comerciales, por lo que un muestreo preciso de las capas profundas del suelo es una prioridad en plantaciones de *Eucalyptus*. Según lo aportado por Christina et al. (2016) se podría esperar una sincronicidad en el crecimiento entre la parte aérea y la parte subsuperficial, dado que hay una fuerte determinación ontogénica de la exploración radicular profunda por parte de los *E. grandis*, buscando una ocupación rápida del espacio que puede llevar a una ventaja competitiva, sobre todo para acceder al agua profunda, capacidad heredada de sus condiciones ambientales naturales. En este trabajo implicaría que en las calicatas PFYC-01 y 02 las raíces podrían llegar hasta cerca de los 9 metros de profundidad y en la calicata PFYC-03 podrían llegar hasta los 5 metros en profundidad ya que los arboles presentaban respectivamente esas alturas en promedio. Pero, las investigaciones realizadas en el Congo, Kenya y Brasil sobre exploración radicular profunda por los autores anteriormente mencionados poseen características de sitio muy diferentes a las de Uruguay: fueron realizadas en Ferralsoles o suelos similares, siendo suelos muy profundos (orden de decena de metros) con horizontes difusos, sin limitantes físicas o químicas notorias y baja fertilidad natural. Si se compara, por ejemplo, a los suelos de Uruguay con los suelos de Brasil usados para forestación, los suelos de Uruguay son notoriamente más fértiles (Zamalvide y Ferrando, 2010a) siendo los más profundos de apenas 3 m de espesor o superficiales de rocosidad o pedregosidad asociada (Hernández, 2010) y las exigencias o requisitos más importantes de los árboles en Uruguay se relacionan con la disponibilidad de agua y adecuado arraigamiento (Herbert, citado por Durán y

García, 2007), por lo que mejorar el conocimiento del sistema radicular profundo en condiciones de Uruguay se hace imperioso.

Dada la limitante de tiempo por la operativa de apertura de las calicatas no se pudo realizar un estudio cuantitativo o con parámetros más detallados de las raíces, pero se obtuvieron descripciones cualitativas básicas de las raíces en diferentes profundidades. El criterio de división de raíces finas propuesto por McCormack et al. (2015) fue útil como guía para describir raíces con el fin de mejorar el entendimiento de sus funciones (transporte y/o absorción) pero la imposibilidad de obtener grandes secciones de raíces limpias para corroborar el grado de ramificación hace que los resultados obtenidos en cuanto a funcionalidad de las raíces sean tentativos. Sin embargo, se logró corroborar que en efecto las raíces finas a diferentes profundidades poseen diferentes grados de ramificación, por lo que este criterio a futuro sería aplicable y brindaría información muy valiosa para generar heterogeneidad en este pool de raíces.

Los estudios de raíces más detallados se suelen realizar en las capas superficiales del suelo, donde las mismas se encuentran en mayor concentración (Jackson et al., Eamus et al., Brassard, Chen y Bergeron, citados por da Silva et al., 2011), encontrándose raíces gruesas (mayores a 2 mm) con función de anclaje y de transporte además de raíces finas (menores a 2 mm) con función de transporte y absorción. En los tres perfiles SSR se observó este comportamiento claramente, encontrándose la gran mayoría de raíces en los horizontes Ap y AB definidos. Las raíces más notorias en estos horizontes son las gruesas (de 5 cm máximo a 2 mm de grosor), leñosas de desarrollo lateral marcado con función de anclaje y de transporte. De estas raíces gruesas se ramifican numerosas raíces finas en todos los órdenes posibles de ramificación. La conjunción de estas abundantes raíces gruesas y finas implica que estos horizontes son sectores de gran absorción que necesita grandes raíces de transporte, además de jugar el importante rol de operar como el sustrato de anclaje.

Según Durán y García (2007) la condición física del horizonte B determina la primera barrera para la exploración radicular en árboles, donde si el horizonte B es argilúvico de textura fina, estructura gruesa y compacta, puede presentar una penetrabilidad muy restringida y el horizonte C situado por debajo no será fácilmente accesible a las raíces. En los horizontes Bt observados claramente se aprecia una reducción en la cantidad de raíces respecto a los horizontes A y AB, pero todavía se observan escasas raíces gruesas leñosas laterales (mayormente) y verticales con función de transporte, por lo que este medio representa una primera barrera pero que no es una limitante absoluta. Además de estas escasas raíces gruesas se ramifican finas, que pueden ser escasas o muy frecuentes, de todos los órdenes, mayormente verticales lo que

implicaría que este horizonte es utilizado como medio de absorción y representa en cierto grado un medio apto para los árboles, dado que no solamente se limitan a traspasarlo para llegar a horizontes o capas inferiores, sino que destinan recursos en colonizarlo. Será necesario mejorar la precisión de medición de estos horizontes para cuantificar el cambio en tipo y cantidad de raíces respecto los horizontes A y AB superiores.

Durán y García (2007) indican que los parámetros claves para el suelo y el subsuelo en la determinación de la calidad del sitio son, entre otros la profundidad efectiva del enraizamiento y la naturaleza del saprolito (friabilidad, volumen de enraizamiento, espesor y acceso al agua almacenada en profundidad). La litología del sustrato es importante para evaluar la calidad de sitio forestal, siendo las propiedades que influyen decisivamente sobre el potencial de enraizamiento -que determina el anclaje y la exploración por el agua- el espesor de los sedimentos, la profundidad de meteorización, el drenaje interno, la dureza, cementación y el tipo de arcilla. Se ha observado que los mayores crecimientos de árboles se obtienen en suelos profundos, sin horizontes limitantes para el desarrollo de las raíces, horizonte C meteorizado y fácilmente penetrables por las raíces (Herbert, citado por Durán y García, 2007). En las tres calicatas realizadas los saprolitos, divididos con los criterios del Cuadro 6, pasan a tener relevancia en cuanto a espesor y a características del desarrollo radicular. En las calicatas PFYC-01, 02 y 03 los horizontes C y las capas suprayacentes que comprenden el saprolito (menos la capa R) implican el 50%, 63,5% y 25% del volumen respectivamente, para dos de las calicatas el saprolito como parte del perfil representa la mitad y más de la mitad del volumen potencial a ser explorado. La división en capa C y las infrayacentes tiene relevancia desde el punto de desarrollo de las raíces, dado que en el horizonte C en todos los perfiles todavía se encuentran escasas raíces gruesas leñosas tanto verticales como laterales con posible función de transporte. En las capas Cr, CrR y Rr las gruesas no parecen estar presentes, encontrándose frecuentes raíces finas de todos los órdenes con la particularidad de que en todos los casos las raíces utilizan fuertemente a las fracturas o estratificación original de la roca para crecer, característica clave para definir estas capas. Cabe resaltar que en la calicata PFYC-03 donde el saprolito es menos potente, fue en el único sitio donde se observaron raíces muy gruesas en la capa CrR y en la R. Las fracturas o estratificación conservada en estas capas del saprolito, y seguramente en la capa R, son un medio importante para el crecimiento radicular profundo, por lo que la división de capas de saprolito con este criterio es fundamental al describir un perfil SSR para definir la calidad potencial de sitio forestal.

Las raíces utilizan preferentemente los planos de fracturas o de estructuras sedimentarias para crecer en profundidad, por lo que dependiendo



de la distribución de estas estructuras preferentes las raíces pueden estar canalizadas. Esto lleva a que el estudio de raíces desarrollado en un solo plano de corte de calicata lleve a observaciones erróneas, debiéndose hacer planos de corte que expresen mejor los canales preferenciales. En la calicata PFYC-02 ocurre un nivel compacto de cantos rodados a entre los 15-30 cm de profundidad, limitando parcialmente a las raíces más gruesas de anclaje y transporte (5 cm) dando paso a raíces gruesas de 0,5 cm y no limitando a las raíces finas. En la calicata PFYC-03 donde la litología es una pelita arenosa masiva sin porosidad apreciable, se da la particularidad de que las raíces desde le Bt2 comienzan a adoptar formas aplanadas, siendo esto de máxima expresión en los niveles inferiores. Esta adaptación se debe a que las raíces se acomodan entre las fracturas y que los bloques masivos no porosos las aprietan en procesos de contracción y dilatación. Dado que se han observado raíces gruesas en capas profundas, inclusive en la capa R, pero de manera discontinua, se plantea que debe de haber raíces gruesas en todo el perfil, solo que no se registran dada la limitante de observación.

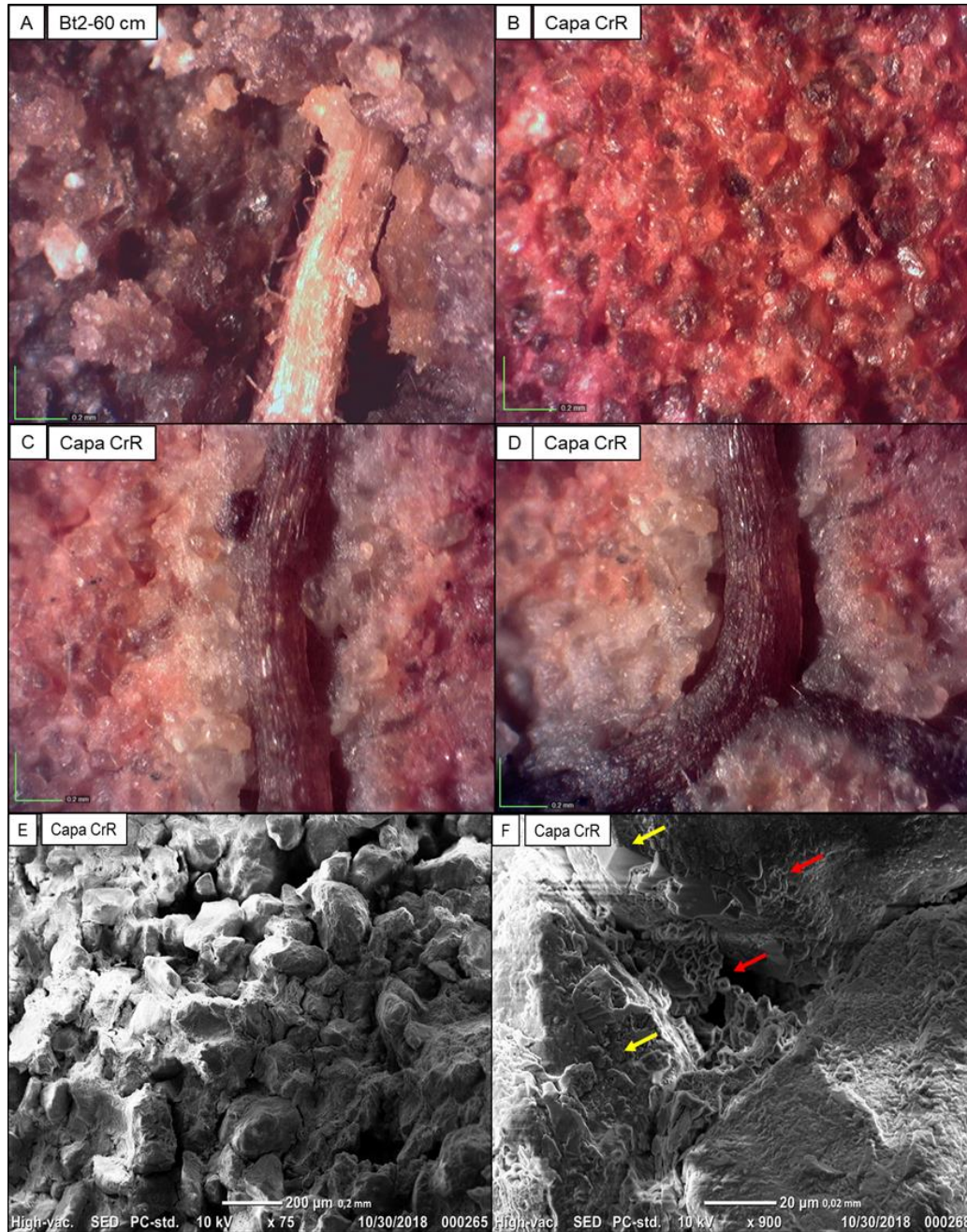
#### 4.2.3 Descripciones microscópicas de las raíces obtenidas de los perfiles SSR

McCormack et al. (2015) mencionan que todas las raíces menores a 2 mm se caracterizan como raíces finas, con la premisa de que todas las raíces que entren en esta categoría tienen una función similar, pero estos autores en su investigación han asignado menores diámetros dentro de las raíces finas con el fin de resaltar a las raíces más finas y absorbentes. Estudios recientes basados en raíces extirpadas bajo condiciones estandarizadas han mostrado diferencias fisiológicas y funcionales entre raíces profundas y superficiales (Göransson et al., Göransson, Fransson y Jönsson-Belyazid, citados por da Silva et al., 2011). Debido a lo expuesto anteriormente se realizaron diferentes observaciones bajo lupa, microscopio electrónico y cortes histológicos. Además, se realizan observaciones para conocer mejor la interacción de las raíces con los horizontes/capas profundas y el microambiente que en ellas existe.

##### 4.2.3.1 Perfil SSR PFYC-01

Por medio de lupa y microscopía electrónica se observaron el horizonte Bt1 y en la capa CrR.

Figura 84. Raíces observadas por lupa y microscopía electrónica en calicata PFYC-01



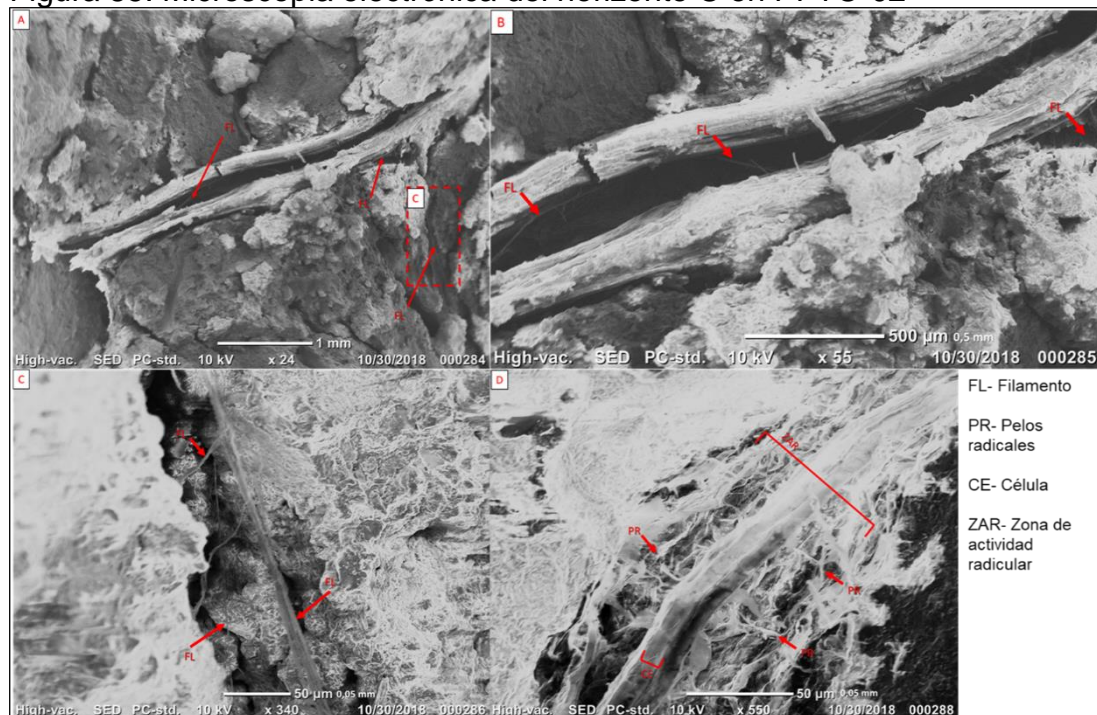
Las raíces observadas son poco mayores a 0,2 mm de diámetro, cilíndricas, lo que las hace difícilmente observables a campo, tanto en el Bt2 como en el CrR. En el Bt2 (Figura 84 A) se observa porosidad, por la cual la

raíz puede crecer, y pelos radicales denotando actividad absorbente, actividad que no era presumible por medio de observación macroscópica ya que la definición tradicional de raíces mayores a 2 mm las restringe exclusivamente a la actividad de transporte. La capa CrR parece presentar mucha cementación y poca porosidad primaria por la cual las raíces pudieran desarrollarse (Figura 84 B), pero como se observan en las Figuras 84 C y D, las raíces pueden penetrar por este medio por la porosidad que sí es observable en la Figura 84 E, donde también se aprecia porosidad que ronda los 0,2 mm como máximo y una porosidad menor incipiente general, como se observa en la Figura 84 F en la cual se aprecian recristalizaciones (flechas amarillas) y minerales arcillosos sin aparente alteración (flechas rojas), denotando un medio potencial químicamente activo. En la descripción macroscópica se observaron frecuentes raíces muy finas que pueden estar colonizando este medio poroso si bien no fueron captadas en estas imágenes.

#### 4.2.3.2 Perfil SSR PFYC-02

Por medio microscopia electrónica se observaron el horizonte C y la capa Rr (Figuras 85 y 86).

Figura 85. Microscopia electrónica del horizonte C en PFYC-02



En A y B de la Figura 85 se observan dos raíces paralelas de 1,7 mm de diámetro, con apariencia leñosa o rígida, sin pelos radicales visibles por lo que se podría tratar de raíces con función de transporte, observación que es

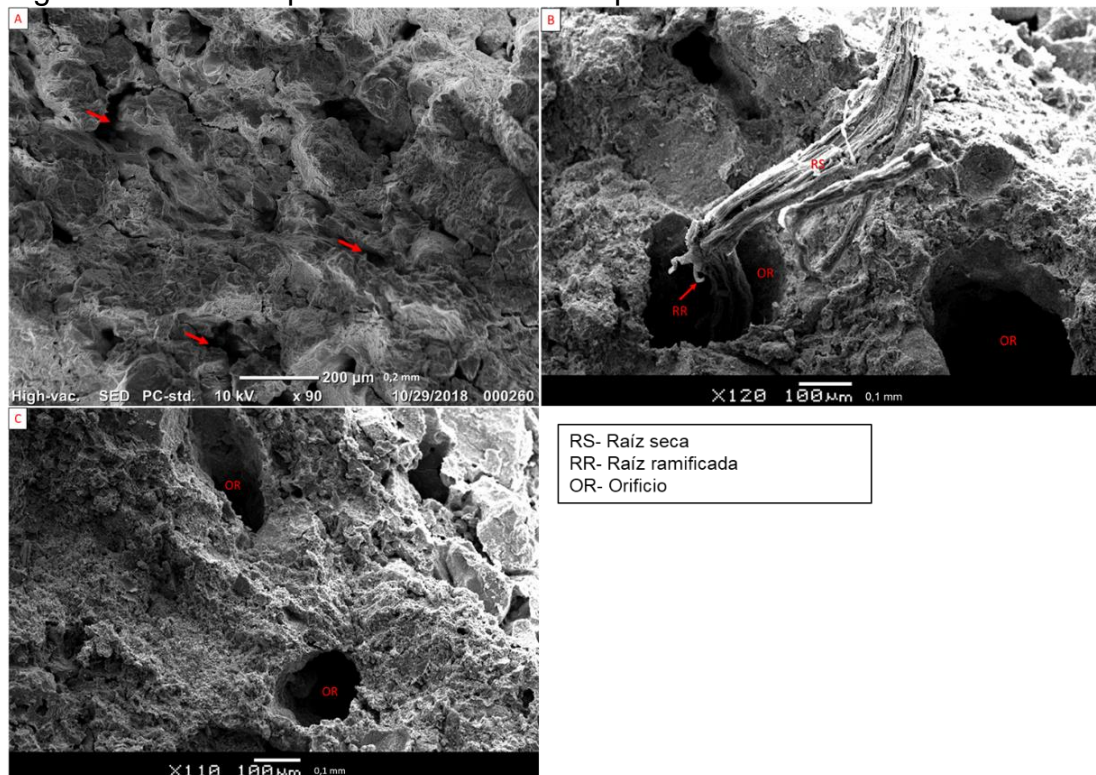


acorde con lo visto macroscópicamente. En la Figura 85 A y B se observan pequeños filamentos (FL) muy finos que se asocian a la raíz, que posiblemente sean hifas de hongos, pero podría caer la opción de que sean generadas posteriormente de la recolección de la muestra.

En la Figura 85 D se observa una raíz de un par de células de espesor, formando una raíz de 28  $\mu\text{m}$  (0,028 mm) de diámetro. Esta raíz posee pelos radicales y posiblemente algún desprendimiento de tejido o exudado, que están en contacto con la superficie del suelo, lo que indicaría que estas raíces poseen actividad de absorción, no observable macroscópicamente.

La Figura 85 C muestra un acercamiento de los filamentos de la Figura 85 A, en los cuales se pueden observar ramificaciones que poseen un grosor de 10  $\mu\text{m}$  (0,01 mm) a 1  $\mu\text{m}$  (0,001 mm), lo cual las hace ser cercanas o inferiores al grosor de la célula vegetal anteriormente observada, por lo que se propone con mayor firmeza que se trate de micelio fúngico.

Figura 86. Microscopia electrónica de la capa Rr en PFYC-02



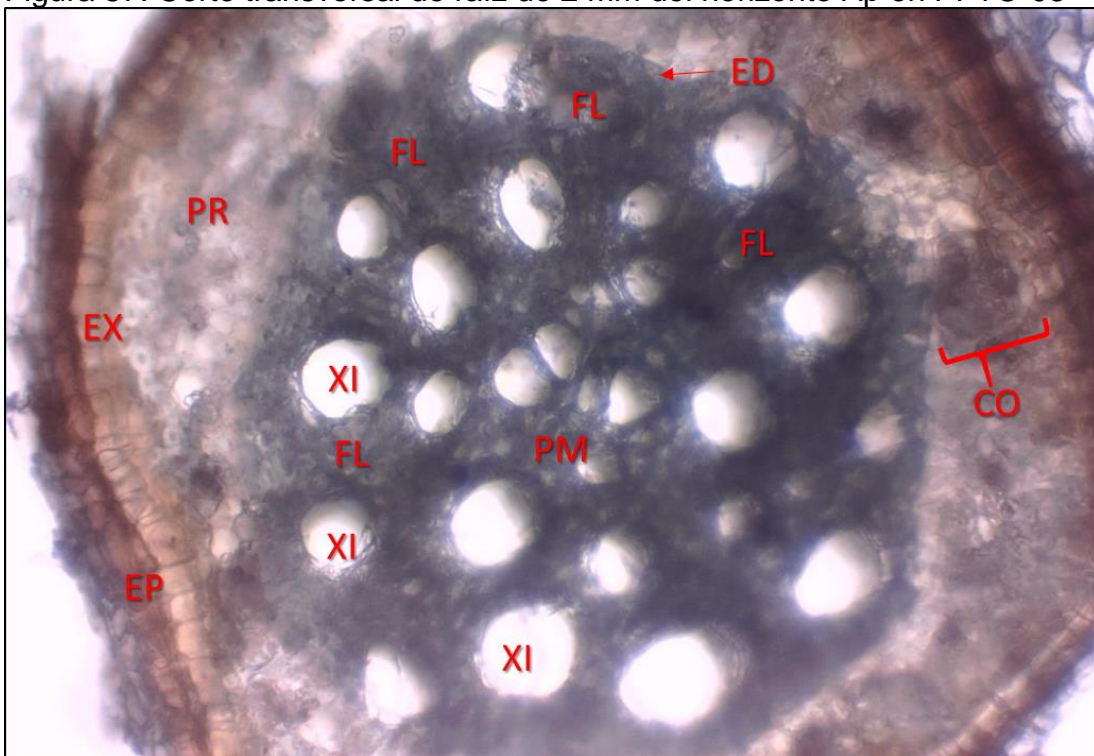
En la Figura 86 A se observa la porosidad primaria, en la cual los poros de mayor tamaño presentan diámetros de 200 a 40  $\mu\text{m}$  (0,2 a 0,04 mm) (flechas rojas) conectados entre sí por poros de menor tamaño, dando una apariencia friable, por la cual las raíces podrían hacerse camino. En la Figura 86 B se

puede apreciarse una raíz seca en orificios de 300 y 200  $\mu\text{m}$  (0,3 y 0,2 mm) de diámetro, siendo de mayor o igual tamaño que los máximos observados en la Figura 86 A, que junto a la forma redondeada y suavizada (Figura 86 B y C) de la pared del orificio podrían estar mostrando la capacidad de penetración y labrado de las raíces de este tamaño en este material. Este comportamiento se condice con lo observado macroscópicamente en cuanto a que las raíces pueden atravesar fácilmente a la arenisca que conforma esta capa.

#### 4.2.3.3 Perfil SSR PFYC-03

Por medio de cortes histológicos se observaron raíces del horizonte Ap y del CrR/R (Figuras 87, 88 y 89), y por medio de microscopía electrónica se observaron las capas Cr y CrR/R (Figuras 90, 91 y 92).

Figura 87. Corte transversal de raíz de 2 mm del horizonte Ap en PFYC-03

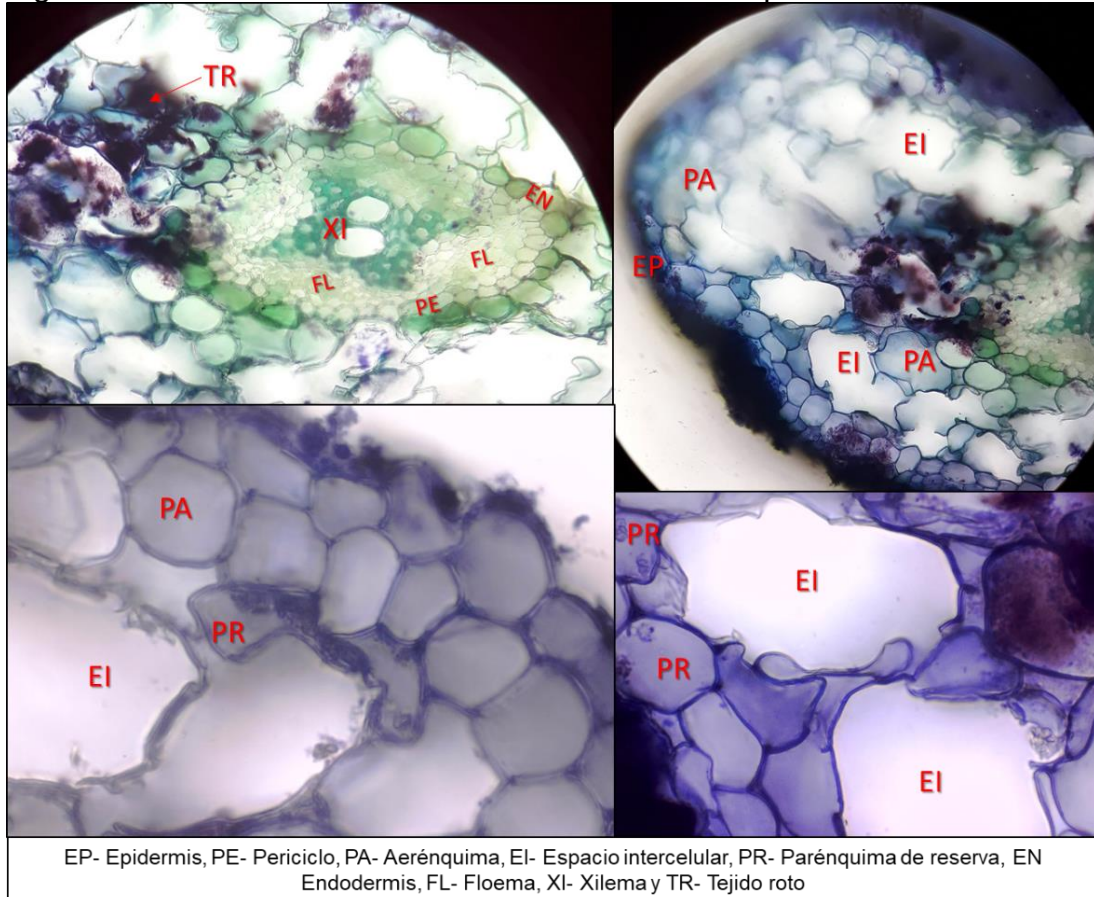


EP- Epidermis, EX- Exodermis, PR- Parénquima de reserva, ED- Endodermis, CO- Cortex, FL- Floema, XI- Xilema y PM-Parénquima medular

En la Figura 87 se puede observar una raíz cilíndrica con vasos xilemáticos bien desarrollados, un floema no tan notorio posiblemente por la falta de tinción del preparado, parénquima de reserva donde se pueden apreciar gránulos de color oscuro dentro de las células y epidermis poco desarrollada,

que junto con la carencia de tejidos secundarios muestra una raíz de actividad absorbente más que de transporte, además de alojar reservas. Este tipo de raíz es la típica encontrada en el horizonte A, mostrando la fisiología y función característica de una raíz de este diámetro.

Figura 88. Corte transversal de raíz de 1 mm de la capa CrR/R en PFYC-03



En la Figura 88 se puede observar una raíz con un xilema y floema menos desarrollado (posiblemente protoxilema y floema), escaso parénquima de reserva y una delgada epidermis que denota su actividad absorbente. Además, se aprecia el parénquima modificado en aerénquima, el cual se produce por grandes uniones de células parenquimáticas que por medio de lisogénesis estarían brindando grandes espacios intercelulares por los cuales circula el aire. Esta parece ser una modificación acorde a la profundidad y condiciones de la capa CrR/R, indicando modificaciones fisiológicas y funcionales respecto a las superiores.



Figura 89. Cortes transversales sin tinción de raíces aplanadas en la capa CrR/R en PFYC-03



EP- Epidermis, PA- Aerénquima, EN- Endodermis, PE- Periciclo y EI- Espacio intercelular

Estas raíces profundas (Figura 89) presentan la particularidad de poseer una morfología externa claramente aplanada (0,4 mm en su mínimo), que es acompañada por la modificación de todos sus tejidos internos para poder adoptar dicha forma. Los tejidos vasculares poco desarrollados se encuentran aplanados, presenta una epidermis muy fina y tejido parenquimático modificado en aerénquima en sus extremos. Esta raíz, de probable actividad principal absorbente, dado sus tejidos, se encuentra adaptada a la profundidad y al medio que es la capa CrR/R, lo cual implica alojarse entre las fracturas de la pelita arenosa masiva, escasos de aire y probables excesos hídricos estacionales dada la carencia de porosidad primaria.

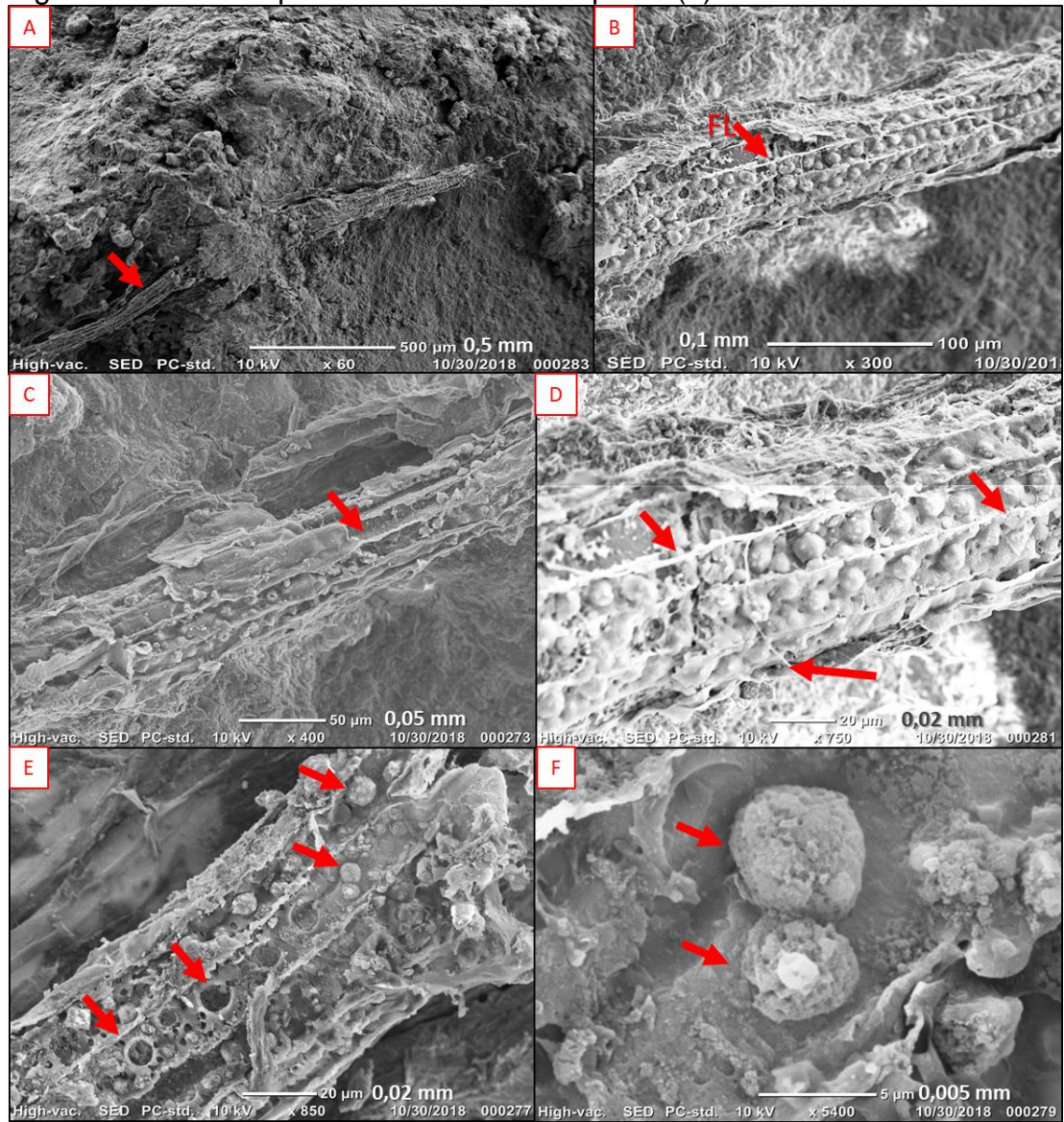
Las imágenes tomadas por microscopia electrónica muestran la interacción de estas raíces profundas adaptadas con el material alterado Cr y CrR, así como la roca fresca R, como se aprecia en las siguientes imágenes.

Figura 90. Microscopia electrónica de la capa Cr (1) en PFYC-03



En la Figura 90 se puede observar una raíz menor a  $18\ \mu\text{m}$  ( $0,018\ \text{mm}$ ) de morfología cilíndrica, a una profundidad de  $105\ \text{cm}$ , penetrando en el material poco alterado de la capa Cr donde no se aprecia prácticamente porosidad. Esta raíz no parece haber utilizado un orificio o porosidad primaria del material alterado, lo cual no se puede descartar, sin embargo, haya utilizado o no un poro, estas raíces extremadamente finas parecen tener la capacidad de penetrar materiales extremadamente finos y compactos.

Figura 91. Microscopia electrónica de la capa Cr (2) en PFYC-03

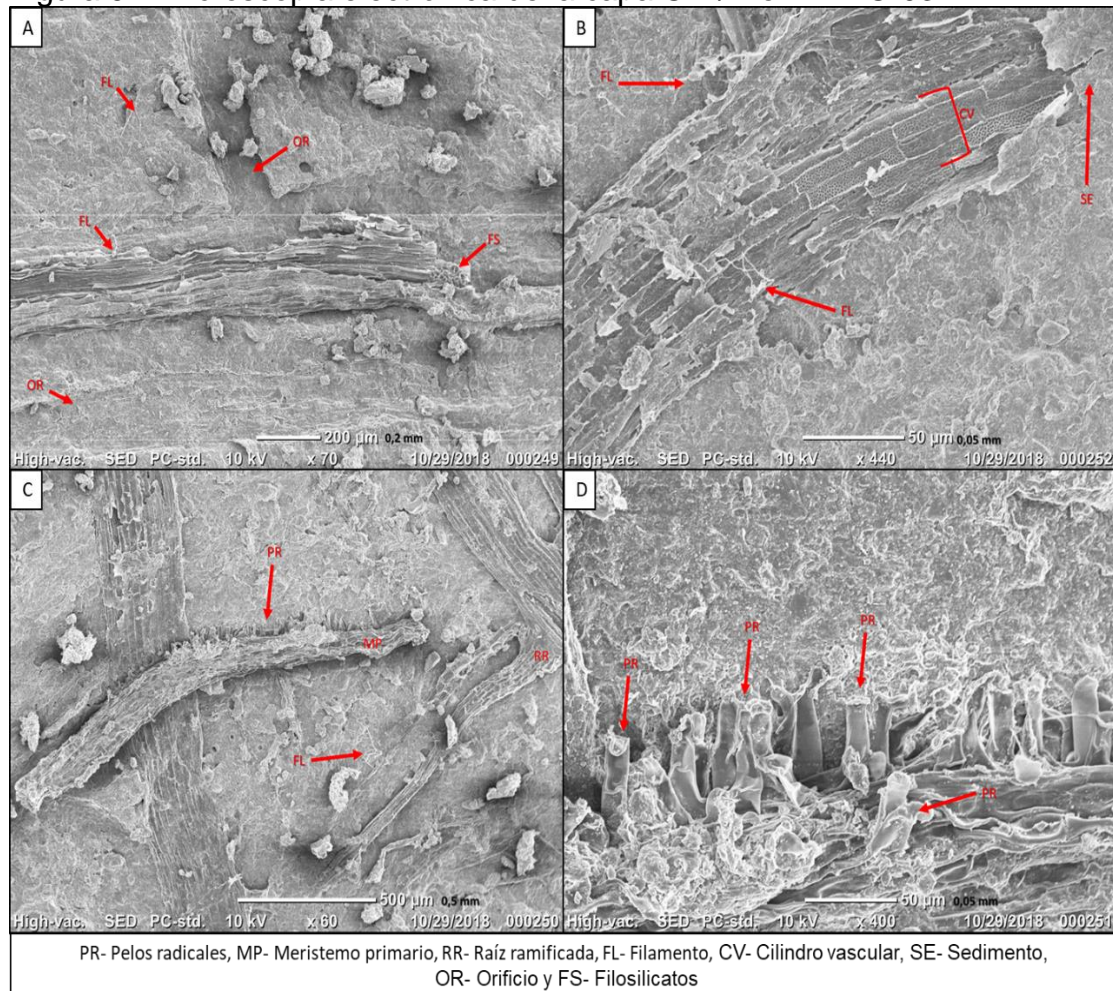


En la Figura 91 se puede observar una raíz de 110  $\mu\text{m}$  (0,11 mm) de diámetro y morfología cilíndrica, que atraviesa sedimentos sin porosidad primaria, observándose en la Figura 91 A que penetra por el sedimento (flecha roja), por lo menos parcialmente. En el extremo de la raíz se pueden observar estructuras dentro de la raíz que no corresponden a tejido vegetal (Figura 91 B). Estas estructuras constan de cuerpos globosos conectados por filamentos dentro las células vegetales. Como se observa en la Figura 91 C (flecha roja) las células vegetales en algunos sectores se encuentran vacías y muertas, quedando solamente las paredes vegetales resistentes. En otros sectores



(Figura 91 D) dentro de las células vegetales se encuentran los filamentos que se ramifican o que conectan a las estructuras globosas de manera longitudinal a la raíz. En la Figura 91 E se observan modificaciones dentro del tejido vegetal, donde se ven orificios correspondientes a las estructuras globosas, que parecen ser acumulaciones sin un orden interno aparente (Figura 91 F). Estos filamentos, estructuras globosas y modificaciones estructurales internas en el tejido vegetal probablemente correspondan a un micelio interno fúngico (filamentos) y las estructuras globosas sean arbuscúlos (acumulaciones de nutrientes o gránulos de fosfatos), que en su conjunto corresponderían a endomicorizas.

Figura 92. Microscopia electrónica de la capa CrR/R en PFYC-03



En la Figura 92 se observan diferentes raíces obtenidas a una profundidad de 130 cm. En la Figura 92 A se observa una raíz en descomposición en la cual todavía son apreciables las paredes celulares.

También se puede observar que esta raíz, y otra paralela que se perdió en la parte inferior de la imagen, han penetrado o labrado (OR) a la pelita que no posee porosidad primaria. Se observan minerales arcillosos en formación (FS), posiblemente montmorillonita, y filamentos (FL) que podrían ser hifas. En la Figura 92 B se puede observar una raíz parcialmente rota, en la cual se pueden apreciar células individuales de  $7,7 \mu\text{m}$  ( $0,0077 \text{ mm}$ ) de grosor, con puntuaciones en las células centrales del cilindro vascular (CV) que indican la función de transporte de estos tejidos. En la esquina superior derecha se puede apreciar que la raíz se introduce por debajo de la pelita (SE) sin porosidad primaria, quedando además visible que esta raíz es extremadamente aplanada. En la Figura 92 C se pueden observar tres raíces de morfología aplanada, ramificaciones (RR), una sección terminal de una raíz con meristemo primario (MP), pelos radicales (PR) y filamentos (FL). En la Figura 92 D se hace un acercamiento de los pelos radicales, en la cual se pueden apreciar los pelos radicales unicelulares interactuando con la roca, la cual no posee ninguna porosidad. La Figura 92 C muestra de manera directa el proceso de meteorización biológica a escala microscópica.

#### 4.2.3.4 Discusión de las observaciones microscópicas de los perfiles SSR

Por medio de los diferentes métodos de observación realizados en este apartado se obtuvieron resultados preliminares que respaldan el asignar menores diámetros dentro de la tradicional clasificación de raíces finas menores a 2 mm para resaltar otras raíces más finas y absorbentes (McCormack et al., 2015) que han sido encontradas, así como realizar otras descripciones más detalladas para encontrar diferencias fisiológicas y funcionales (Göransson et al., Göransson, Fransson y Jönsson-Belyazid, citados por da Silva et al., 2011) en estas raíces finas como las que se han observado.

Se han observado raíces levemente mayores a los 2 mm, que deberían ser clasificadas como gruesas y de transporte, pero que presentan pelos radiculares absorbentes. Si bien estas raíces son levemente mayores a 2 mm y a campo no serían indudablemente definidas como gruesas, el hecho de seguir la definición al pie de la letra pudo haber llevado a no observar raíces de mayores tamaños que estuvieran cumpliendo otra función que no sea de transporte. En futuras investigaciones sería prudente revisar las características de las raíces mayores a 2 mm, sobre todo en los horizontes superiores. Como proponen McCormack (2015) lo más prudente sería catalogar las raíces de acuerdo al desarrollo primario o secundario de los tejidos ya que esta diferenciación afecta la funcionalidad de las raíces.

Se han observado raíces de diámetros de 300, 100, 28 y  $18 \mu\text{m}$ , de configuración cilíndrica o extremadamente planas que están muy por debajo de



lo que se puede observar a simple vista y que probablemente no sean tomadas en cuenta para modelar la arquitectura radicular. Se observaron raíces menores a 1 mm de formas aplanadas y cilíndricas excavando, perforando y desarrollando pelos radiculares absorbentes en una pelita arenosa masiva sin poros, un medio que a priori no parecería útil para las raíces, pero que por lo observado no solo pasa a ser un medio colonizable, sino que las raíces directamente pueden estar absorbiendo nutrientes de la misma. Los sistemas radiculares profundos son pobremente comprendidos y representados en modelos (Pierrete et al., Radville et al., citados por Lambais et al. 2017, Woodward y Osborne, citados por Butler et al. 2010) sin embargo una medición precisa y fisiológicamente significativa del índice de área radicular es de importancia fundamental para establecer un entendimiento funcional del intercambio de energía y el ciclado de nutrientes (Butler et al., 2010).

Las adaptaciones morfológicas externas de las raíces que se aplanan para adaptarse a las fracturas o condiciones particulares del medio profundo son acompañadas de modificaciones en los tejidos internos que se aplanan, se estiran o se afinan respecto a las raíces superiores. Además, se han observado variaciones fisiológicas que pueden repercutir en la función y clasificación de las raíces. Las raíces superiores e inferiores presentan en alguna medida parénquima de reserva, el cual puede estar involucrado en la longevidad de las raíces. Las raíces inferiores y alojadas en las grietas de la pelita masiva presentan aerénquima, una modificación del tejido parenquimático que permite una mayor circulación de aire lo que implica que las raíces de esta especie tienen la capacidad de adaptarse a medios poco oxigenados.

Para el caso específico de los *Eucalyptus*, Grove et al. (1996) plantean que un mecanismo importante que contribuye al consumo eficiente de nutrientes por estos árboles, es el de la simbiosis de las raíces finas con un amplio rango ectomicorrizas. Hay dos tipos principales de micorrizas: micorrizas vesiculares-arbusculares (AV), en las cuales la penetración del hongo en la raíz forma estructuras intracelulares que tienen poco efecto en la apariencia externa de las raíces finas (Harley y Smith, citados por Grove et al., 1996) y ectomicorrizas, en las cuales los tejidos del hongo forman una envoltura alrededor de la raíz fina, resultando en una raíz engrosada lateralmente con un hábito pinnado distintivo (Chilvers y Pryor, citados por Grove et al., 1996). Las ectomicorrizas son las dominantes, pero las AV se pueden desarrollar en plántulas siendo poco comunes en árboles viejos, por lo que las VA pueden estar ayudando en el establecimiento (Grove et al., 1996). Los filamentos observados en varias imágenes tomadas por microscopio electrónico pueden ser hifas pertenecientes a ectomicorrizas asociadas a las raíces de los *Eucalyptus*, pero no fueron observadas las modificaciones externas que implican este tipo de micorrizas en la raíz. Se observaron endomicorrizas o

micorrizas vesiculares-arbusculares, las cuales están dentro de la raíz, formando estructuras intracelulares con grandes modificaciones internas que fueron visibles dada la rotura de la epidermis de la raíz. La presencia de micorrizas a profundidad puede jugar un rol importante si son frecuentes o están presentes en momentos cruciales del cultivo en ambientes de bajos nutrientes o en ambientes donde las micorrizas puedan explorar nichos que las raíces no puedan.

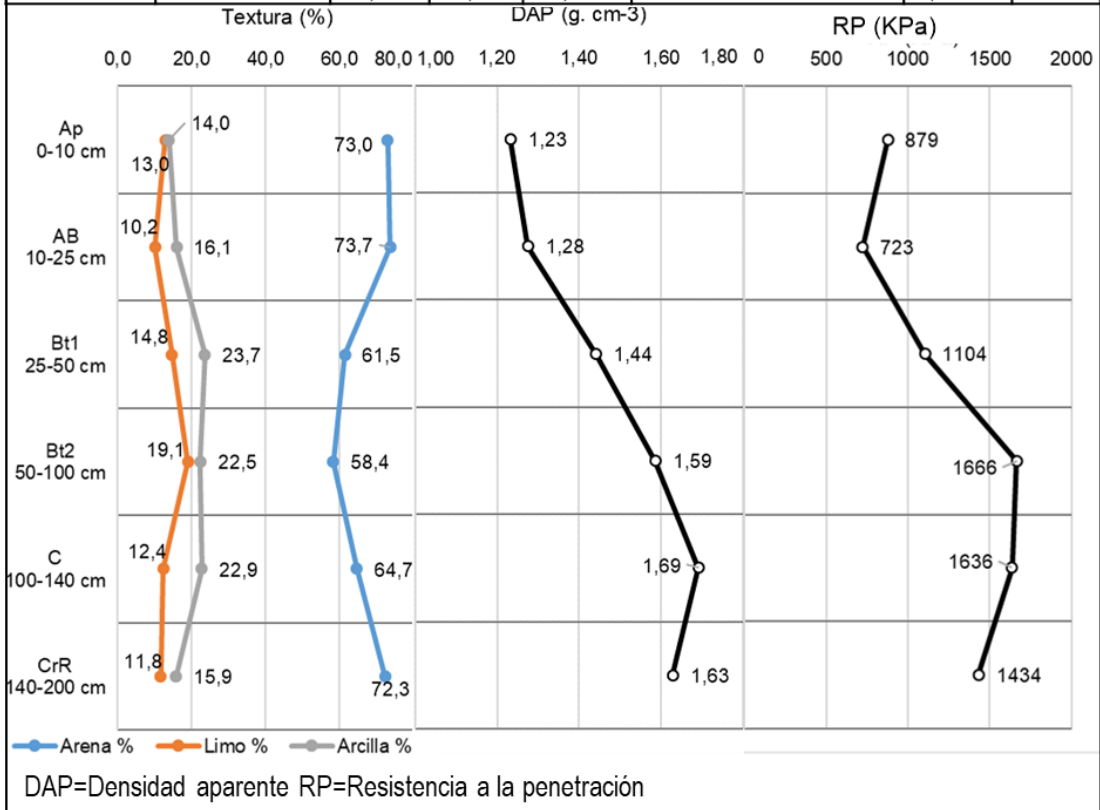
#### 4.2.4 Análisis físicos y químicos de los perfiles SSR

##### 4.2.4.1 Resultados de la calicata PFYC-01

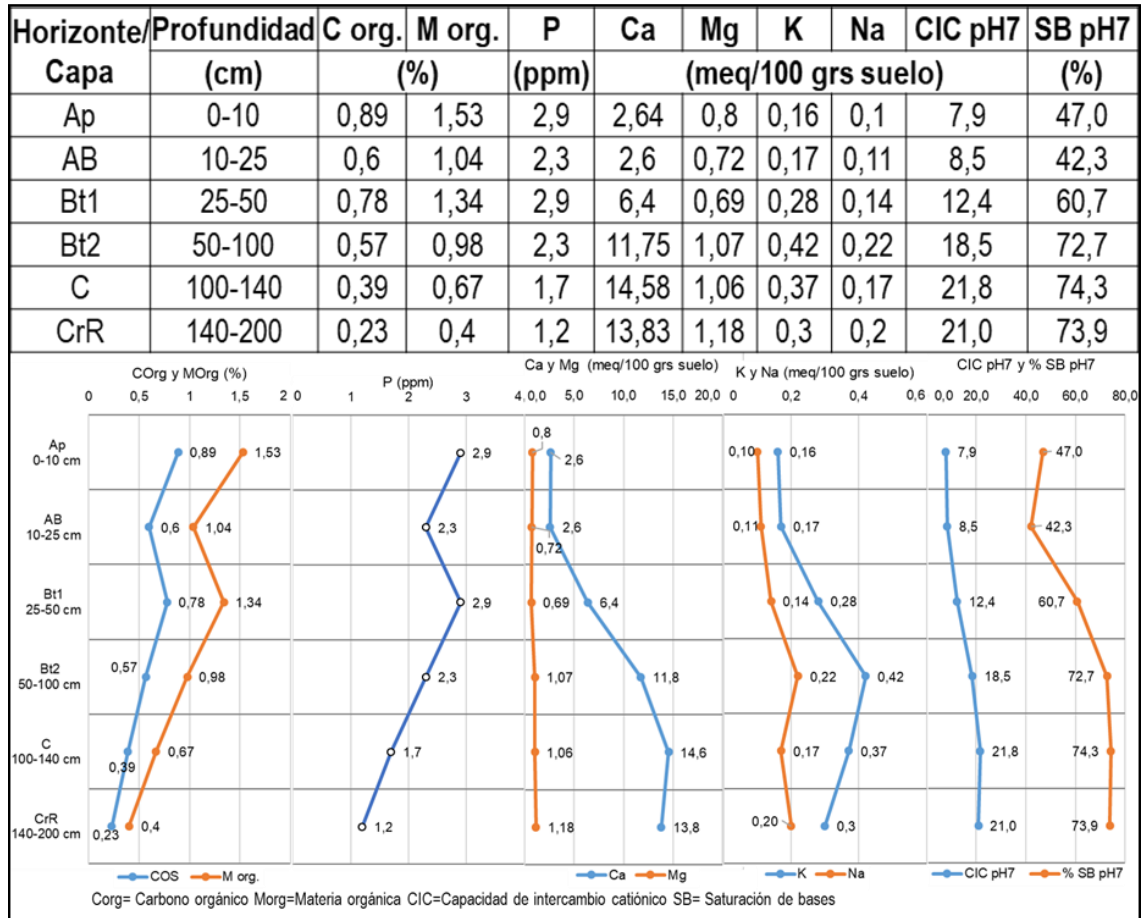
A continuación, se presentan los resultados parciales de los análisis químicos y físicos. Los resultados completos de los análisis químicos se encuentran en el Anexo 2.

Cuadro 13. Propiedades físicas de la calicata PFYC-01

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	DAP	RP
		%				g.cm-3	KPa
Ap	0-10	73,0	13,0	14,0	Franco arenoso	1,23	879
AB	10-25	73,7	10,2	16,1	Franco arenoso	1,28	723
Bt1	25-50	61,5	14,8	23,7	Franco arcillo arenoso	1,44	1104
Bt2	50-100	58,4	19,1	22,5	Franco arcillo arenoso	1,59	1666
C	100-140	64,7	12,4	22,9	Franco arcillo arenoso	1,69	1636
CrR	140-200	72,3	11,8	15,9	Franco arenoso	1,63	1434



Cuadro 14. Propiedades químicas de la calicata PFYC-01



Este suelo se clasifica como un Luvisol Ócrico Típico (MAP. DSF, 1976) (Alfisol en clasificación USDA) siendo caracterizado como un suelo de prioridad forestal. En cuanto a la textura no se muestran grandes variaciones entre horizontes o capas y en el general las proporciones se mantienen, con excepción de un leve aumento por acumulación de arcilla en los horizontes Bt. La arena domina, siendo 3 veces mayor a cada una de las otras fracciones. La relativa constancia en la textura entre horizontes puede deberse a una fuerte herencia de la roca homogénea en su conformación.

La DAP y la RP tienden a aumentar en profundidad, ambas mostrando un incremento mayor en desde los horizontes Bt, y una leve reducción en la capa CrR. No hay una aparente relación entre el cambio textural, el contenido de materia orgánica y la DAP y RP. El aumento en DAP y RP se puede deber a la estructura del suelo, en los horizontes Ap y AB la gran masa radicular impide ver la estructura y genera más porosidad y una estructura más desagregada (que puede distorsionar la medición de estos parámetros), mientras que en los

horizontes Bt la estructura pasa a ser granular a pequeños bloques, con iluminación de arcilla y hierro generan aumento en la DAP y la RP al reducir los poros libres. En el horizonte C se da los máximos de DAP Y RP se, posiblemente por el cambio de estructura, ahora prismática y columnar incipientes y acumulaciones de arcilla. En el horizonte CrR la estratificación conservada de la roca, la porosidad primaria conservada (Figura 84), las pequeñas fracturas pueden estar generando la disminución en los parámetros de DAP y RP.

El COrg y MOrg son máximos en horizonte Ap, descienden en el AB y vuelven a subir a casi el máximo por acumulación en el horizonte Bt2 que actúa como barrera. En profundidad estos parámetros descienden marcadamente hasta casi 3 veces la concentración del horizonte superior.

En los horizontes Ap y AB el fósforo (P) desciende levemente, pero al llegar al Bt1 se produce una acumulación de este elemento que vuelve a alcanzar el mismo valor máximo que posee en el Ap. Luego de esta acumulación, desciende en un 59% llegando al valor mínimo en el CrR.

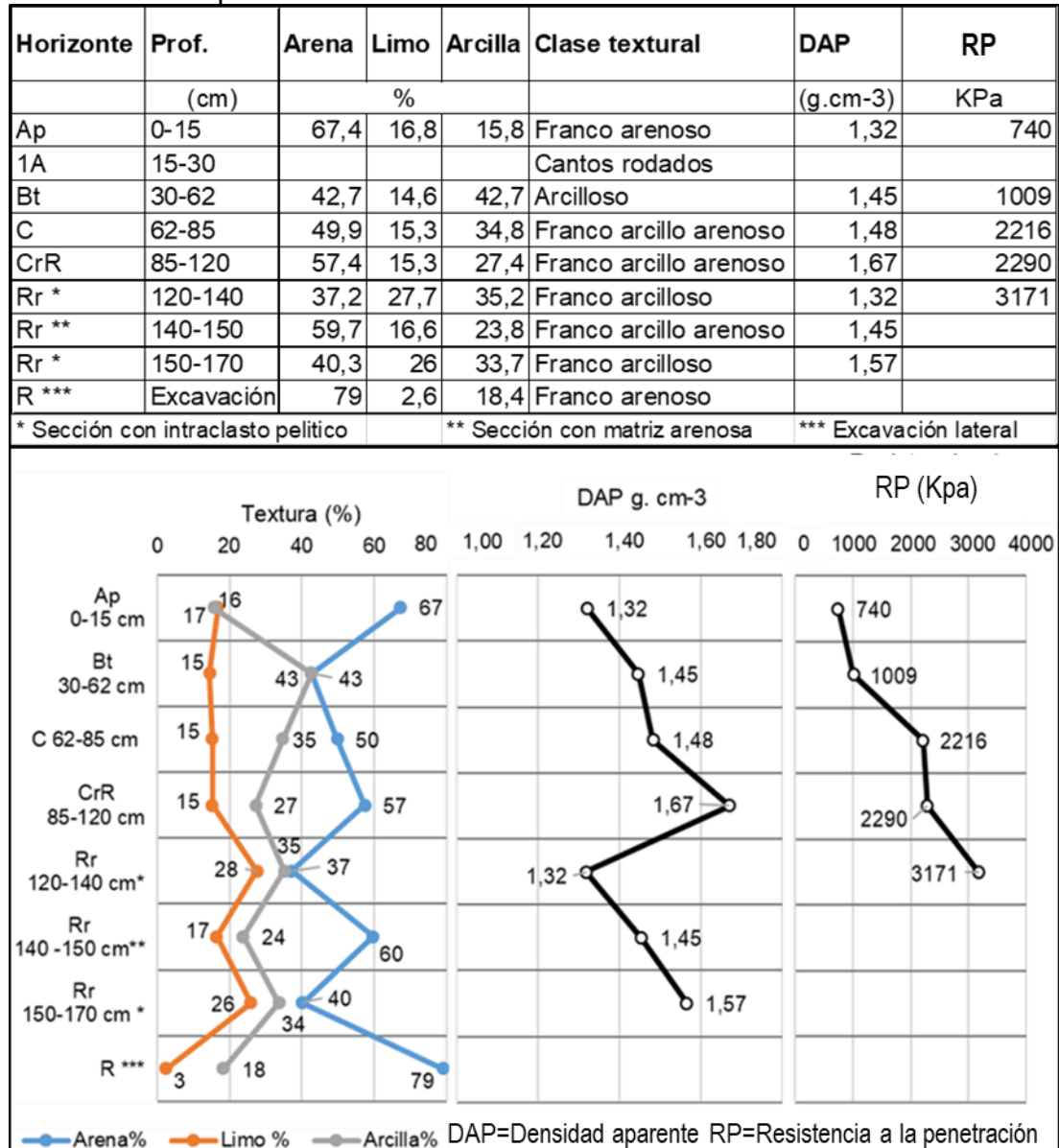
Los cationes calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K), así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) tienden todos al aumento en profundidad, pero en diferentes magnitudes, para luego presentar una tendencia al aumento, excepto el K que presenta su máximo en el Bt2. La saturación en bases (%SB) es baja en los horizontes Ap y AB por la presencia de aluminio. El aumento de cationes y de CIC en profundidad puede responder a que la fracción mineral aumenta aportando más elementos y a que se pueden encontrar mayor cantidad de minerales arcillosos que brindan actividad química.



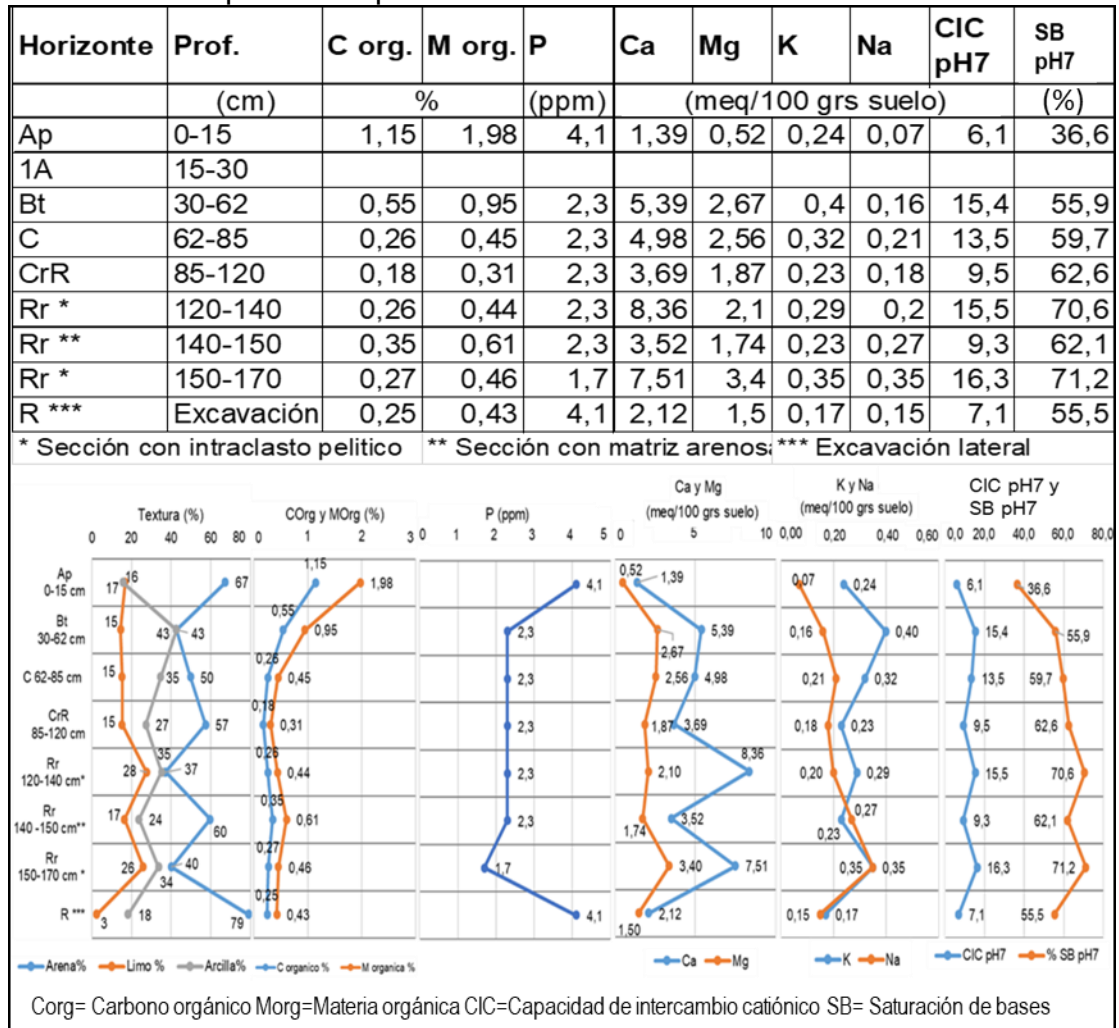
#### 4.2.4.2 Resultados de la calicata PFYC-02

A continuación, se presentan los resultados parciales de los análisis químicos y físicos. Los resultados completos de los análisis químicos se encuentran en el Anexo 2.

Cuadro 15. Propiedades físicas de la calicata PFYC-02



Cuadro 16. Propiedades químicas de la calicata PFYC-02



Este suelo se clasifica como un Luvisol Ócrico Abrúptico (MAP. DSF, 1976) (Alfisol clasificación USDA), siendo caracterizado como un suelo de prioridad forestal.

Desde el horizonte Ap al Bt se produce un cambio textural grande en cuanto a la arena y limo, pero esto se puede deber a que el horizonte Ap sea generado por relictos de otra roca (material madre) al de los horizontes inferiores, esto es apoyado por el nivel de cantos rodados de extraclastos (15-30 cm de profundidad) que no son pertenecientes a la litología de la calicata sino a otra litología cercana como fue descrita (Figura 55). A mayor profundidad la arena recobra el dominio dada la herencia de la matriz arenosa de la roca que es más abundante frente a los clastos pelíticos. En las capas saprolíticas

se produce una variación grande de la textura dada la heterogeneidad del material (intraconglomerado) llegando casi a igualarse la arcilla y la arenisca por la presencia de los clastos pelíticos.

La RP tienden a aumentar en profundidad, hasta donde la estructura se mantiene en bloques angulares. La DAP aumenta hasta el horizonte CrR, para luego en el horizonte Rr inferior la estructura sedimentaria de la roca y las fracturas se hacen más marcadas. La presencia clastos pelíticos con más o menos fracturas y laminación interna puede llevar a las variaciones en DAP. La RP en este perfil es mayor a la del PFYC-01 probablemente por el mayor contenido de arcilla, la estructura en bloques angulares de mayor tamaño y la presencia de clastos pelíticos conservados, alcanzando en la capa Rr los valores más altos de RP para luego superar los 5000 KPa (valor máximo de medición del instrumento), posiblemente al interceptar con el instrumento clastos pelíticos.

La MORG y el COrg tienden a disminuir desde el horizonte Ap hasta el CrR, donde se estabiliza en los valores más bajos del perfil, disminuyendo un 79% respectivamente desde el horizonte Ap a la capa R. No se produce una acumulación de MORG en el horizonte Bt.

El P desde el horizonte Ap hacia el resto del perfil disminuye casi a la mitad, manteniéndose constante hasta la capa R, donde llamativamente vuelve a subir al mismo valor máximo del horizonte Ap. Si este último dato no es un error de muestreo o de análisis, sería una medición muy interesante para este elemento que siempre es escaso en los suelos, marcando un importante contenido de este elemento en la roca fresca.

Las bases Ca, Mg y K tienden a aumentar en profundidad, así como la CIC hasta la capa Rr, donde la heterogeneidad de esta capa genera grandes aumentos y descensos en las mediciones de los cationes y la CIC, donde los clastos pelíticos generan los aumentos en los parámetros indicando la importancia de los mismos como aportes de nutrientes. Nuevamente estos aumentos pueden deberse al aumento de la fracción mineral menos alterada y el aumento de minerales arcillosos.

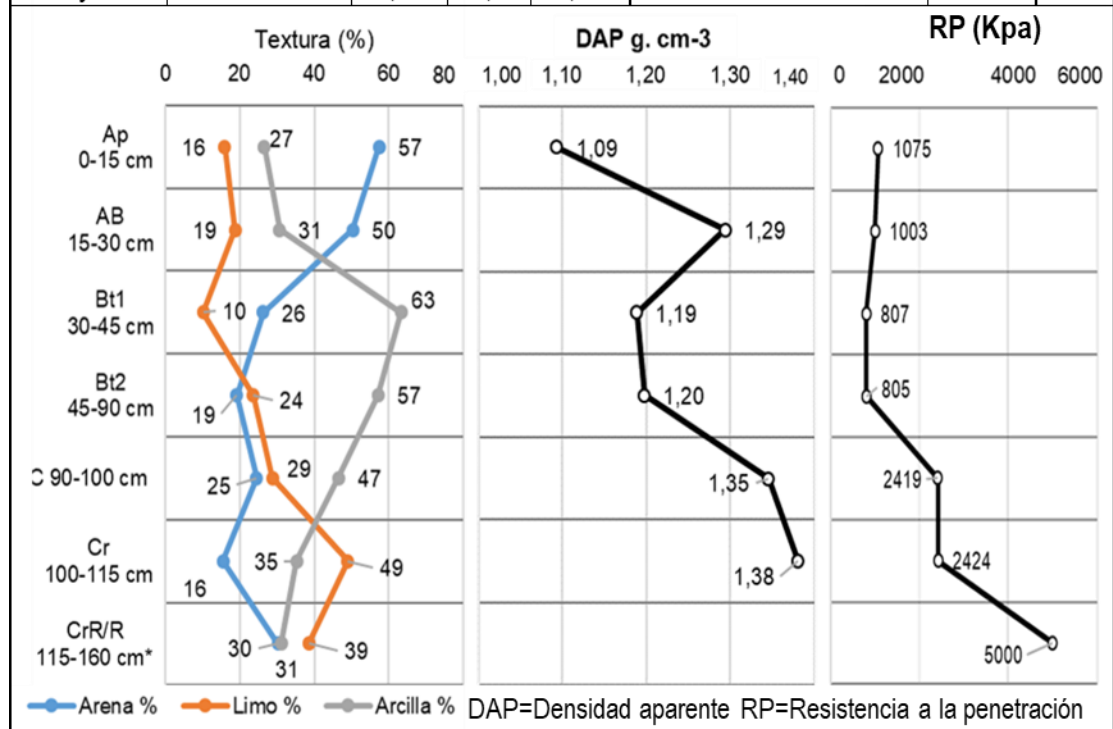
#### 4.2.4.3 Resultados de la calicata PFYC-03

A continuación, se presentan los resultados parciales de los análisis químicos y físicos. Los resultados completos de los análisis químicos se encuentran en Anexo 2. Los datos de la capa CrR y R se presentan juntos dado que estas capas se decidieron dividir posteriormente. El horizonte CrR presenta poco espesor y se diferencia fundamentalmente por el aumento de fracturas por

lo que se esperaría que los datos analíticos sean representativos para ambas capas.

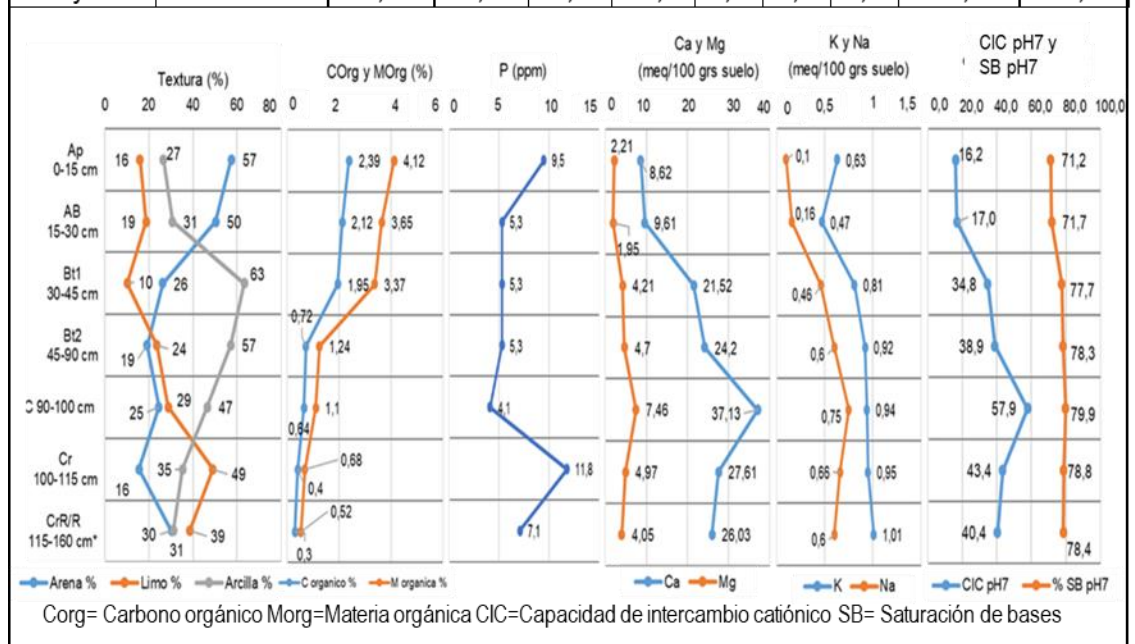
Cuadro 17. Propiedades físicas de la calicata PFYC-03

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	DAP	RP
		%				g.cm-3	KPa
Ap	0-15	57,4	16	26,6	Franco arcillo arenoso	1,09	1075
AB	15-30	50,4	18,8	30,8	Franco arcillo arenoso	1,29	1003
Bt1	30-45	26,3	10,3	63,4	Arcilloso	1,19	807
Bt2	45-90	19,2	23,6	57,2	Arcilloso	1,2	805
C	90-100	24,6	28,8	46,6	Arcilloso	1,35	2419
Cr	100-115	15,6	49,1	35,3	Franco arcillo limoso	1,38	2424
CrR y R	115-160	30,3	38,5	31,2	Franco arcilloso	-	5000



Cuadro 18. Propiedades químicas de la calicata PFYC-03

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	C org. %	M org. %	P ppm	Ca meq/100 g suelo	Mg meq/100 g suelo	K meq/100 g suelo	Na meq/100 g suelo	CIC pH7 %	SB pH7 %
Ap	0-15	2,4	4,1	9,5	8,6	2,2	0,6	0,1	16,2	71,2
AB	15-30	2,1	3,7	5,3	9,6	2,0	0,5	0,2	17,0	71,7
Bt1	30-45	2,0	3,4	5,3	21,5	4,2	0,8	0,5	34,8	77,7
Bt2	45-90	0,7	1,2	5,3	24,2	4,7	0,9	0,6	38,9	78,3
C	90-100	0,6	1,1	4,1	37,1	7,5	0,9	0,8	57,9	79,9
Cr	100-115	0,4	0,7	11,8	27,6	5,0	1,0	0,7	43,4	78,8
CrR y R	115-160	0,3	0,5	7,1	26,0	4,1	1,0	0,6	40,4	78,4



Este suelo se clasifica como un Brunosol Subéutrico Lúvico (MAP. DSF, 1976) (Molisol clasificación USDA), no siendo caracterizado como un suelo de prioridad forestal, lo cual se ve reflejado en los altos valores de los datos analíticos obtenidos respecto a los anteriores perfiles.

En los horizontes Ap y AB el contenido de arena es cercano al 50%, en el horizonte Bt la arcilla pasa a dominar producto de la acumulación iluvial y la naturaleza de la roca madre. Hacia el final del perfil las fracciones se emparejan para llegar a niveles similares de la pelita arenosa.

La RP se mantiene en niveles similares hasta la capa C siendo la estructura del suelo similar. A partir del C los bloques pasan a consolidarse más hasta que la roca masiva se impone, por lo que la RP aumenta hasta el valor



máximo de medición del instrumento. La DAP aumenta en el horizonte AB, pero luego disminuye nuevamente en el Bt y aumenta nuevamente en los siguientes horizontes y capas probablemente por el aumento de los bloques masivos de la pelita donde la porosidad es explicada casi en su mayoría por las fracturas y el grado de meteorización de la roca asociado a las fracturas.

El COrg y la MOrg presentan una disminución gradual hasta el horizonte Bt1 donde no se genera acumulación, y del Bt1 a el Bt2 se da un marcado descenso de estos componentes en más de la mitad de sus valores. Desde el Bt2 hasta la capa CrR/R se reducen gradualmente a la mitad nuevamente.

El P presenta una reducción de casi la mitad desde el horizonte Ap al AB, para luego mantenerse prácticamente estable hasta el horizonte Cr donde presenta un llamativo aumento superando por un 24% al contenido de P del horizonte Ap. En la capa CrR/R el P vuelve a descender, pero supera los valores de los horizontes AB a C. Los cationes Ca y K presentan una leve reducción entre los horizontes Ap y AB, mientras que el Mg un leve aumento. Este comportamiento cambia a partir del Bt1 hasta el C, produciéndose un aumento en todos ellos alcanzando el valor o cercano al valor más alto medido para cada uno. Esto representa una multiplicación de 3,8 veces del Mg y el Ca y del doble del K. La CIC también aumenta hasta el horizonte C, donde se ve multiplicada por 3,5 veces respecto al horizonte Ap, luego desciende en la capa Cr y CRrR/R, pero mantiene valores superiores a los de los horizontes suprayacentes. Este comportamiento de la CIC puede deberse al aumento de la fracción limo y los minerales arcillosos producto de la meteorización menos alterados.

#### 4.2.4.4 Discusión de los resultados de análisis físicos y químicos

Los análisis químicos arrojaron datos para todas las capas del saprolito y para las rocas muestreadas.

Tradicionalmente los horizontes desde el A hasta el B(t) son los más estudiados o más utilizados en la investigación para la toma de decisiones con fines agronómicos. Considerando los promedios de cada parámetro medido en los horizontes “tradicionales” (Ap y AB) donde se encuentra la mayor cantidad de raíces como la “oferta” total (100%) y comparándolos con los datos promedio (“potencial”) de las capas que comprenden los horizontes profundos (Bt1, Bt2 y C, Cr, CrR, Rr), se obtienen datos preliminares para considerar a estas capas dentro de la información a tener en cuenta para el cultivo de *Eucalyptus* (Cuadro 19).

Cuadro 19. Potencial de los horizontes y capas profundas respecto a la oferta de los horizontes superficiales

	Horizontes / capas	Espesor	%	C org	%	M org	%	P	%	Ca	%	Mg	%	K	%	CIC pH7	%
PFYC-01	Ap+AB	25,0	100	0,7	100	1,3	100	2,6	100	2,6	100	0,8	100	0,2	100	8,2	100
	Bt1+Bt2	75,0	↑ 300	0,7	↓ 90	1,2	↓ 89	2,6	= 100	9,1	↑ 343	0,9	↑ 115	0,4	↑ 212	15,5	↑ 188
	C+CrR	100,0	↑ 400	0,3	↓ 42	0,5	↓ 42	1,5	↓ 56	14,2	↑ 542	1,1	↑ 147	0,3	= 206	21,4	↑ 261
PFYC-02	Ap	15,0	100	1,2	100	2,0	100	4,1	100	1,4	100	0,5	100	0,2	100	6,1	100
	Bt	32,0	↑ 213	0,6	↓ 48	1,0	↓ 48	2,3	↓ 56	5,4	↑ 388	2,7	↑ 513	0,4	↑ 167	15,4	↑ 252
	C+CrR+Rr	108,0	↑ 720	0,3	↓ 23	0,5	↓ 23	2,2	↓ 53	5,6	↑ 404	2,3	↑ 449	0,3	↑ 118	12,8	↑ 210
PFYC-03	Ap+AB	30,0	100	2,3	100	3,9	100	7,4	100	9,1	100	2,1	100	0,2	100	16,6	100
	Bt1+Bt2	60,0	↑ 200	1,4	↓ 60	2,3	↓ 59	5,3	↓ 72	24,4	↑ 268	4,5	↑ 212	0,6	↑ 367	36,9	↑ 222
	C+Cr+CrR	70,0	↑ 233	0,4	↓ 18	0,8	↓ 19	7,6	= 103	30,2	↑ 332	5,5	↑ 263	0,7	↑ 467	47,2	↑ 284
Espesor (cm) - Corg y MOrg (%) - P(ppm) - Ca, Mg, K y CIC (meq/100 g suelo)																	

Los horizontes Bt y capas saprolíticas representan el 87% (175 cm), 82% (140 cm) y 77% (100 cm) en en los perfiles, por lo que el medio potencial de exploración radicular aumenta considerablemente.

En los perfiles PFYC-01 y 02 considerar a las capas saprolíticas implica llevar a más del doble o cuádruple el espesor del perfil respectivamente, mientras que el PFYC-03 se aumenta un 44%. Estos aumentos implican un aumento considerable en el volumen potencial a ser explorado por las raíces.

El COrg y MOrg presentan un lógico decrecimiento en todos los casos en profundidad, comprobándose su presencia en todas las capas profundas. Esto será relevante a largo plazo principalmente para evaluar posibles modificaciones en el ciclo del carbono al estar utilizando un cultivo de sistema radicular profundo que puede estar ingresando mayor proporción de COrg a profundidad respecto a la situación “natural” de pradera.

El fósforo, macronutriente que suele ser limitante en Uruguay, se encuentra en todas las capas saprolíticas estudiadas, mostrando en los perfiles PFYC-01 y 02 valores del entorno del 50% promedio respecto a los horizontes superficiales, y en el perfil PFYC-03 el 72% promedio. Esto último, en conjunto con los altos valores puntuales encontrados en las ultimas capas de los perfiles PFYC-02 y 03 respecto a los horizontes superficiales, debe ser estudiado a más detalle, para conocer la disponibilidad real de este nutriente para el cultivo o para corroborar que no se trate de un error de medición.

El calcio, macronutriente que por lo general excede a las necesidades de los cultivos en Uruguay, presenta valores de más del doble o del triple en todos los casos, lo que se puede vincular con la fracción mineral mayoritaria, menos alterada y menos utilizada por las plantas en estas capas. Sin embargo, en las calicatas PFYC-02 y 03 que se tienen datos de las rocas frescas, el calcio está por debajo de lo encontrado en las capas saprolíticas, por lo que los

grandes valores en estas capas se pueden deber a acumulación por procesos pedogenéticos o a su mayor disponibilidad a ser medido.

El magnesio tiene un comportamiento similar al calcio en cuanto a sus valores, pero en magnitudes mucho más bajas. Se encuentra duplicando los valores de los horizontes superficiales y en las capas R se encuentra por debajo de los valores de las capas saprolíticas, por lo que se puede deber esta mayor concentración a la acumulación por procesos pedogenéticos o a su mayor disponibilidad a ser medido. En todo caso, los valores encontrados en las capas saprolíticas para el Ca y el Mg hacen que estas capas deban ser tomadas en cuenta como fuente de estos macronutrientes.

El potasio se presenta en aumento en las capas saprolíticas, pero no alcanza aumentos tan marcados en magnitud como el Ca o el Mg en los casos de PFYC-01 y 02, lo cual se puede deber a la dominancia de fracción arena en los feldespatos potásicos y/o a que los minerales arcillosos no se han roto lo suficiente para dejar disponible al potasio. De igual manera que con los anteriores macronutrientes, la presencia de K en estas capas es considerable respecto a los horizontes superficiales.

La CIC (pH7) para todas las capas saprolíticas tiende a ser más del doble, lo que se puede deber a un aumento de los filosilicatos presentes en la fracción arcilla. Esta CIC elevada, macronutrientes en aumento y una alta saturación en bases puede estar indicando que las capas saprolíticas poseen una oferta importante, resultando en un medio potencialmente muy activo en cuanto a la dinámica de nutrientes.

La DAP y la RP en todos los casos tienen a aumentar a profundidad en los horizontes Ap y AB y Bt posiblemente por el tipo de estructura del suelo y en las capas profundas el comportamiento se explica por la predominancia de las estructuras sedimentarias y el tipo de litología. En futuros estudios sería valioso saber las causas de este aumento de la DAP, así como cuantificar la relevancia de las fracturas en las capas más profundas.

#### 4.2.5 Discusión de la relación entre los SSR, el sistema radicular profundo y su aplicación agronómica

Se confirmó la presencia de raíces en todos los perfiles realizados, y si bien la dinámica operativa del trabajo solo permitió realizar apreciaciones cualitativas, las raíces se identificaron en toda la extensión lateral, así como en profundidad en todos los casos. Diversos autores ya han identificado en *Eucalyptus* la posibilidad del desarrollo radicular a grandes profundidades

(Bouillet et al. 2002, Jama et al., Pacheco y Louzada, citados por Bouillet et al. 2002, Christina et al. 2011, Laclau et al. 2013), desarrollo que Christina et al. (2016) definen como una sincronidad entre la extensión vertical aérea y subsuperficial casi simétrica, que se cumple hasta que las raíces encuentran un impedimento o al alcanzar la napa freática. Christina et al. (2016) también proponen que esta sincronidad está fuertemente determinada por ontogenia, lo que lleva a esta especie a competir por la ocupación de espacio para acceder al agua profunda y que el desarrollo de raíces hasta los 9 m de profundidad a los 1,5 años de edad observado por ellos no puede ser explicado por faltantes de agua o fertilizante en la capa superficial del suelo. La exploración radicular uniforme también ha sido investigada por Laclau et al. (2013), quienes indican que la mayoría del volumen del suelo fue explorado por raíces finas en los primeros 3 m de suelo, desde el 1<sup>er</sup> año de plantación en adelante, y que los datos sugieren una exploración uniforme del suelo por parte de las raíces finas y un movimiento descendente del frente de raíces a la misma velocidad, cualquiera sea la distancia del árbol. Todo lo anterior implicaría que en este trabajo en las calicatas PFYC-01 y 02 las raíces podrían llegar hasta cerca de los 9 metros de profundidad y en la calicata PFYC-03 podrían llegar hasta los 5 metros en profundidad, ya que los arboles presentaban respectivamente esas alturas en promedio.

En el perfil PFYC-01 las raíces gruesas leñosas se encontraron hasta el horizonte C (140 cm), en el PFYC-02 hasta el horizonte C (85 cm) y en el PFYC-03 hasta la capa R (160) siendo esto lo máximo excavado. Las raíces finas, menores a 2 mm, se encontraron a lo largo de todos los perfiles y llegando siempre al máximo de la excavación, por lo que se podría esperar con cierta seguridad que las raíces finas lleguen hasta la capa R en todos los casos y se extiendan, según la sincronidad de la parte aérea, siendo esto 9 metros para los dos primeros perfiles y 5 metros para el tercer perfil. Esto implicaría que la capa R o la roca pasaría a ser un medio importante para el desarrollo de las raíces que no es considerado actualmente.

Los horizontes Bt no han sido una barrera para las raíces gruesas ni para las finas, todo lo contrario, estos horizontes pasan a ser utilizados por las raíces. Las raíces atraviesan y utilizan como medio horizontes diversos horizontes Bt con características tales como 75 cm de espesor, estructura de bloques angulares moderados a fuertes de mediano a gran tamaño, de clase textural arcillosa, con DAP máxima de  $1,69 \text{ g.cm}^{-3}$  y una RP máxima de 1666 KPa, por lo que se podría tener de referencia para otros perfiles como medidas de posibilidad de penetración radicular en estos horizontes. De todas maneras, estos parámetros del suelo no parecen representar la factibilidad o la realidad de la penetración radicular. Investigaciones han encontrado que el desarrollo radicular es significativamente impedido a valores de resistencia de penetración

mayores 1,3 y 1,5 MPa (Zou et al., Boone y Veen, citados por Sinnett et al., 2008) o 3 MPa (Greacen y Sands, Boone y Veen, citados por Sinnett et al., 2008). Pero estos valores han sido obtenidos a partir de cultivos agrícolas, comúnmente por medio de estudios de laboratorio que han usado suelo homogeneizado. Sin embargo, los suelos in situ frecuentemente contienen grietas o fisuras que las raíces pueden explotar a pesar de mediciones de penetración altas (Sinnett et al., 2008). A su vez Laclau et al. (2001) estudiaron plantaciones de *Eucalyptus* en el Congo, encontrando que las raíces de *Eucalyptus* pudieron crecer en suelos compactados (resistencias mayores de 6000 KPa), sin embargo, durante la temporada húmeda, todo el suelo es humedecido y su resistencia permaneció por debajo de los 3000 KPa sin importar la profundidad, por lo que la presencia de raíces finas en suelos secos que exhiben alta resistencia puede estar asociado con exploración del suelo por raíces durante la época húmeda. Esto último se condice más con lo observado a escala macroscópica y donde recae la importancia de definir con criterios apropiados para este cultivo a los horizontes, capas saprolíticas y a las rocas. Detallar la estructura del suelo, las fracturas, la estratificación de la roca, así como su porosidad es primordial para determinar de manera real a campo la posibilidad del desarrollo radicular profundo en escala macroscópica.

Pero no solo importa hasta donde llegan las raíces, sino cuáles son sus funciones y, por lo tanto, como clasificarlas. Lo propuesto por McCormack et al. (2015) parece muy factible de llevarse a cabo de manera sistemática para el cultivo de *Eucalyptus*. Dividir a las raíces finas menores a 2 mm en un pool más complejo, basándose en diferencias de tamaños, diferencias fisiológicas y funcionales se pudo llevar a cabo de manera muy preliminar pero fácilmente en este trabajo. Se encontraron raíces muy finas las cuales están muy por debajo de los 2 mm (300, 100, 28 y 18  $\mu\text{m}$ ) las cuales mostraban funciones de absorción y de transporte las cuales no serían consideradas dentro del sistema radicular de los árboles. A su vez, y en sintonía con lo investigado por Hasenmueller et al. (2017), se encontraron raíces modificadas y adaptadas (parénquima de reserva, aerénquima, tejidos deformados y morfología externa deformada) plenamente al ambiente profundo de grietas en situaciones sin porosidad ninguna, así como raíces muy por debajo de los 2 mm que pueden penetrar por el saprolitos con nula o escasa porosidad. Estas observaciones microscópicas estarían indicando que las raíces finas y muy finas (no observables a simple vista) tienen la capacidad de ingresar, utilizar y modificar las capas saprolíticas, así como las rocas por lo que conocer estos medios en detalle y a diferentes escalas de observación es relevante. Prueba de esta importancia es el que se hayan encontrado posibles endomicorrizas y micelio externo asociado a las raíces de *Eucalyptus*, las cuales pueden extender notoriamente la capacidad de absorción de nutrientes, así como la selectividad por ciertos nutrientes.



Dada la presencia de raíces gruesas y finas, así como las muy finas no observables a simple vista en las capas saprolíticas y en las rocas hay 3 consideraciones principales a realizar:

- Las características de las capas profundas como medio para su utilización por parte del cultivo
- La posible utilización de nutrientes y, fundamentalmente, agua que afecten a la productividad
- Las modificaciones de las capas profundas y de los ciclos biogeoquímicos en los que ellas participan, al cambiar praderas por arboles

Rose et al. (2003) proponen que existe la necesidad de redefinir el concepto de suelo, para poder incluir la zona de roca meteorizada que soporta crecimiento radicular, la cual subyace en muchas áreas forestales, dado que arboles con sistema radicular dual (raíces superficiales y profundas) pueden utilizar el agua almacenada en estas capas profundas. Investigaciones aportan evidencias de que hay similitudes hidrológicas entre el suelo y la roca meteorizada (Rose et al. 2003, Witty et al. 2003), siendo el flujo de agua subterránea en saprolitos de rocas sedimentarias, y en suelos derivados de este material, fuertemente influenciado por la estratificación sedimentaria y las fracturas heredadas de la roca madre (McKay et al., 2005). En fracturas de pelitas laminadas con raíces Hasenmueller et al. (2017) encontraron que el relleno en estas fracturas es similar, mineralógicamente y geoquímicamente al horizonte más bajo del suelo y sugieren además, que en general el relleno con raíces en las fracturas a 180 cm de profundidad son cualitativamente similares a lo encontrado en los horizontes superficiales, indicando que el relleno es resultado de procesos pedogenéticos más que por translocaciones. Hasenmueller et al. (2017) concluyen que las raíces toman ventaja de la mayor concentración de nutrientes disponibles en las fracturas.

Según numerosas investigaciones, los cultivos de *Eucalyptus spp.* pueden acceder a grandes volúmenes de agua en capas profundas del suelo y a aguas subterráneas, llegando a profundidades de 8-10 m con 3 a 4,6 años, hasta alcanzar los 20 m a los 5-7 años (Dye 1996, Le Maitre y Versfeld, citados por Laclau et al. 2001, Jackson et al., Cohen et al., citados por Christina et al. 2011, Laclau et al. 2013, Mardsen et al. 2013, Christina et al. 2017). Hay tres grandes mecanismos a ser remarcados por los cuales las raíces profundas y las capas profundas juegan un rol importante en la dinámica del agua. (1) El crecimiento radicular preferencial concentrado por canales hidrofóbicos, por donde también hay baja fuerza del suelo en áreas húmedas y alta concentración de nutrientes (Laclau et al. 2001, Bouillet et al. 2002). (2) El ascenso hidráulico, el cual es probable que tenga influencia en la performance del cultivo y en las interacciones planta-planta (Dawson, citado por Christina et al., 2011). Este mecanismo implica el movimiento de agua líquida profunda por

medio de las raíces y su posterior liberación hacia el suelo superior en periodos de cese de transpiración, para luego ser absorbida nuevamente. Este proceso tiene relevancia directa en el cultivo, así como muchos efectos indirectos ecológicamente significativos (Caldwell, 1997). (3) El ascenso hidráulico inverso implica que raíces leñosas de *Eucalyptus* transfieren cantidades significativas de agua hacia las capas secas profundas cuando el suelo superficial se ha humedecido luego de la lluvia (Burgess et al., 2000). Este mecanismo se interpreta principalmente para permitir el crecimiento de raíces en ambientes donde el agua es limitante para penetrar capas secas del suelo y lograr alcanzar fuentes profundas de humedad (Schulze et al., citados por Burgess et al., 2000).

En *E. grandis* Cristina et al. (2017) plantean dos etapas de crecimiento correspondientes a los diferentes pools de agua disponibles para el sistema radicular dual (Canadell y Zedler, Fan, citados por Christina et al., 2017) de raíces superficiales y profundas. En la etapa temprana de crecimiento (antes de cierre de copa a los 2 años) se da un rápido crecimiento descendente, siendo en el primer mes de vida remarcable, aun habiendo agua disponible en las capas superficiales del suelo para mantener la demanda, siendo una estrategia de rápida colonización para evitar sequías en esta etapa, lo cual probablemente sea un factor clave para alcanzar los picos de producción de biomasa generalmente observados después de los 2 años en las plantaciones de Brasil. Este proceso también puede ser consistente con la resistencia o falta de estrés a la sequía en edades tempranas en *E. grandis* (Dye 1996, Battie-Laclau et al., citados por Christina et al. 2017). En la segunda etapa propuesta por Christina et al. (2017), después del cierre de copas, las raíces utilizan su sistema radicular dual, absorbiendo agua de lluvia de la temporada por las raíces superficiales, mientras que en las épocas secas utilizan el sistema radicular profundo. Laclau et al. (2013) proponen que, pese a la aglomeración de raíces finas en profundidad, el contenido volumétrico de agua del suelo indica que escasas densidades de raíces finas tienen la capacidad de extraer grandes cantidades de agua, reflexionando los autores sobre que estos resultados sugieren que el rol funcional de raíces profundas no ha sido tomado en cuenta lo suficiente por parte de los productores forestales. Marsden et al. (2013) manifiestan que grandes diferencias en la productividad observadas entre plantaciones vecinas de *Eucalyptus* (en Brasil) parecen tener como explicación las características cruciales la humedad del suelo y la capacidad de retención de agua del suelo a profundidades mayores de 5 metros. Según Christina et al. (2017) la exploración radicular profunda es un mecanismo clave para evitar la sequías en plantaciones altamente productivas dado el acceso a grandes cantidades de agua almacenada en profundidad. En los perfiles PFYC-01 y 02 las capas saprolíticas constan de areniscas finas con porosidad primaria conservada, estratificación más o menos conservada y fracturas, características

que permiten que este medio sea muy propicio para el almacenaje de agua, lo cual se pudo comprobar en el perfil PFYC-01 el cual en la última capa excavada emanaba agua. Las litologías de estos dos perfiles, según lo observado a campo y los antecedentes geológicos, actúan como acuíferos (libres en esta zona) por lo cual podrían representar un volumen enorme para ser explorado por las raíces con agua en cantidades importantes. Según la cartografía geológica realizada, las litologías que comprenden al perfil PFYC-02 estas se ubican en las partes altas del relieve y probablemente posean menos de 10 metros de potencia, por lo que al final de la rotación del cultivo las litologías de la PFYC-01 infrayacentes sean alcanzadas por las raíces. El perfil PFYC-03 al poseer texturas más finas (arcillosas y franco arcillo limosas) sería un medio con menos posibilidad de almacenar agua disponible. Las pelitas limosas masivas que da origen a este perfil desde el punto de vista hidrogeológico se comporta como impermeable al agua, la cual solamente puede ingresar por las fracturas actuando estas rocas como un acuífero fisurado proporcionando agua en la medida que las fracturas estén abiertas y las raíces puedan explorarlas.

Según Bouillet et al. (2002) las plantaciones de *Eucalyptus* sustraen agua y nutrientes rápidamente. La habilidad propuesta por Laclau et al. (2001) de las raíces finas de *Eucalyptus* de concentrarse debajo de áreas de infiltración preferencial tiene efectos en los nutrientes disponibles para los árboles, explicando la rápida utilización de nutrientes de la solución del suelo, la cual ayudaría también a reducir pérdidas por drenaje profundo. El desarrollo radicular profundo debe ser considerado en la dinámica de nutrientes, dado que algunos de los nutrientes tomados por los árboles desde las capas profundas del suelo pueden ser reciclados por mineralización en el suelo forestal (Bouillet et al., 2002). El desarrollo de un sistema radicular profundo puede explicar que el fósforo no sea un factor limitante para el crecimiento de plantaciones de *Eucalyptus* en situaciones donde es escaso pero constante hasta los 6 metros, siendo considerable la cantidad de P por el volumen de suelo explorado por las raíces (Safou-Matondo y Bouillet, citados por Bouillet et al., 2002). da Silva et al. (2011) observaron en *Eucalyptus grandis* un decrecimiento en el consumo potencial para el N, K y Ca en profundidad hasta los 6 m medidos, siendo más marcado para el N, por lo que sugieren una especialización funcional de las raíces finas en la absorción en relación a la profundidad. Pero da Silva et al. (2011) proponen que la distribución y consumo de ciertos nutrientes en profundidad es altamente dependiente de la dinámica del agua en el suelo.

La productividad en plantaciones de *Eucalyptus* es generalmente limitada por la disponibilidad de agua (di Toit et al., Stape et al., citados por Pinheiro et al., 2016), siendo la fertilización realizada en Brasil y el Congo de poco efecto productivo o de corta duración (2 años) sin efectos al final de la rotación (Stape et al., Close et al., Turnbull et al., du Toit, Laclau et al., citados

por Laclau et al., 2013). Los suelos forestales de Uruguay son notoriamente más fértiles que los de Brasil (Zamalvide y Ferrando 2010a, Bentancor et al. 2017) mostrando la investigación en Uruguay que en cuanto a la fertilización con N no hay respuesta al agregado si no hay deficiencia (Perdomo y Crucci, 2010), alta probabilidad de respuesta en cuanto al P para la instalación en el parámetro de altura, pero que a los 18 meses ya el suelo cubre las necesidades de P (Zamalvide y Ferrando, 2010b), y que no existen limitantes por parte de los suelos para el suministro de nutrientes (Ualde, 2015) encontrándose como lo más remarcable síntomas de deficiencias de boro (Ferrando y Zamalvide, 2010).

Durante el crecimiento de *Eucalyptus*, en la etapa de 0 a 4 años, ocurre una gran concentración y retención de nutrientes para la producción primaria, siendo la redistribución de nutrientes casi inexistente, por lo que el crecimiento es caracterizado por el incremento en la tasa de acumulación y limitado por la oferta de nutrientes en el suelo (Grove et al., citados por Bentancor, 2017), además de que probablemente las raíces no han alcanzado la exploración completa del suelo (Grove et al., 1996). Según Santana et al. (2008) entre un 63% a 69% de los nutrientes se acumulan hasta la edad de 4,5 años (en un ciclo de 6,5 años) siendo el crecimiento en biomasa y el contenido de nutrientes en el suelo relacionados positivamente, pero siendo menor ese efecto cuando la disponibilidad de agua es menor. En las etapas juveniles las capas profundas del suelo pueden ser proporcionalmente más exploradas por las raíces y suministrar los nutrientes requeridos por el cultivo (Bouillet et al., 2002). Esta etapa de acumulación de nutrientes se solapa en los 2 primeros años con la etapa de rápido crecimiento radicular para asegurar el suministro de agua profunda lo que podría estar condicionando como mínimo los primeros dos años de acumulación de nutrientes y probablemente los siguientes años de acumulación de nutrientes, sobre todo en situaciones de déficits hídricos en las capas superficiales del suelo. Conocer las características del saprolito y la roca para ser explorados por las raíces en suelos superficiales y/o pocos fértiles sería crítico para las primeras etapas de crecimiento y para el resto del ciclo del cultivo desde el punto de vista nutricional, indirectamente por el posible suministro de agua profunda. Luego de los 4 años, comenzaría en el cultivo una segunda etapa (Attiwill y Adams, citados por Bentancor et al., 2017), en la cual ocurre un decrecimiento en la acumulación de nutrientes y el ciclado de nutrientes se desarrolla por completo. Además, con el avance de la edad en *Eucalyptus* ocurre un incremento de la densidad de raíces en la superficie del suelo, consistente con los cambios en el ciclado de nutrientes que puede resultar por el incremento en la concentración de nutrientes en la solución en la parte superficial del suelo debido a la descomposición de la hojarasca (Laclau et al., citados por Bouillet et al., 2002), permitiendo a los árboles alimentarse principalmente de los horizontes superficiales en suelos (Bouillet et al., 2002).

En esta etapa del cultivo el sistema dual radicular también tiene importancia, ya que frente a sequías que afecten los horizontes superficiales, las raíces profundas pueden brindar el agua que se necesita para continuar en el ciclado de nutrientes superficial, evitar efectos de la sequía o directamente proporcionar nutrientes profundos.

La concentración de cationes intercambiables usualmente decrece marcadamente con la profundidad (Jackson et al., Krishnaswamy y Richter, citados por da Silva et al., 2011), sin embargo, una concentración mayor de nutrientes puede ser encontrada en profundidad en algunos casos específicos (Stone y Kalisz, Moroni, Smethurst y Holz, citados por da Silva et al., 2011) y el subsuelo puede contener temporalmente una proporción significativa de nutrientes disponibles, cuando bajos contenidos de humedad en la superficie limitan el consumo (Lehmann, citado por da Silva et al., 2011) o cuando la redistribución hidráulica y la recarga del agua del suelo ocurre a profundidad (McCulley et al., citados por da Silva et al., 2011). Las raíces profundas también actúan a modo de una red de seguridad, tomando los nutrientes lixiviados desde la superficie del suelo y transfiriéndolos desde la profundidad a capas superficiales del suelo (Allen et al., Jobbágy y Jackson, Mulia y Dupraz, citados por da Silva et al., 2011).

En todos los casos de las capas saprolíticas se pudieron cuantificar las bases Ca, Mg y K. Si se toman los promedios de los horizontes desde el A hasta los Bt y se los compara con los promedios del horizonte C y las capas saprolíticas, los valores de contenido de nutrientes Ca, Mg y K aumentan, a excepción del K en el caso del perfil PFYC-02 que decrece levemente, por lo que estas capas profundas son importantes al considerar la disponibilidad de estos nutrientes. Si bien este cultivo no suele presentar deficiencias por estos nutrientes, el conocer que la cantidad de estos nutrientes aumenta en profundidad notoriamente debe ser considerado al momento de analizarse los suelos y proponer regímenes de fertilización, o para conocer realmente el consumo potencial del cultivo en las primeras etapas del ciclo. En el caso del P, en los perfiles PFYC-01 y 02 decrece en las capas profundas, pero dada la dinámica de este nutriente (baja solubilidad, alta estabilidad) suele ser uno de los primeros limitantes, por lo que su presencia en profundidad y potencial consumo por el cultivo en las primeras etapas de crecimiento es muy relevante y debe ser tomado en cuenta. El P en el perfil PFYC-03 aumenta en profundidad, lo cual debe estar ligado al material litológico. En todos los casos, tanto para el Ca, Mg, K y P, además de conocer la cantidad en profundidad para el posible uso del cultivo, es primordial conocer el estado “natural” u original y la dinámica de estos elementos a profundidad, dado que si el cultivo los utiliza se puede estar sustrayendo más nutrientes de los considerados y que no se están reponiendo ni considerando su dinámica.



Es remarcable que en los perfiles PFYC-01 y 03 la CIC aumenta notoriamente en las en el horizonte C y las capas saprolíticas duplicando su valor, lo que puede estar explicado por el aumento y tipo de los minerales arcillosos, probablemente esmectitas. En el caso de la PFYC -02 la CIC aumenta levemente por lo que la fracción mineral arcillosa en este caso no este dominada por esmectitas. En todos los casos que la CIC es alta o se mantenga en profundidad es un factor importante, dado que las capas profundas presentan el potencial de ser un medio químicamente activo además de presentar nutrientes en cantidades relevantes. En los dos casos donde se analizaron las rocas (PFYC-02 y 03) se obtuvieron valores para el Ca, Mg, K y P, siendo más bajos que en todo el resto de los perfiles (excepto el P), lo cual está ligado a que los minerales se encuentran en menor grado de meteorización. Para el P es remarcable que en ambos casos se encuentra en cantidades superiores al promedio de los horizontes superficiales, lo cual implica un reservorio importante de P para las plantas si se encuentra disponible o accesible para las raíces y/o micorrizas. En las rocas analizadas también se obtuvieron valores de CIC, en el caso del perfil PFYC-02 se trata de un valor muy bajo lo que estaría determinado por baja cantidad de minerales arcillosos, menores cantidades de esmectitas y/o minerales menos meteorizados de mayor tamaño, pero se trata de una roca con porosidad primaria por lo que las raíces podrían explorarla fácilmente y aprovechar la escasa CIC y nutrientes presentes en un amplio volumen. En cuanto al perfil PFYC-03 la roca presenta una alta CIC, producto de ser una roca limo arcillosa y de probable composición esmectita. En este último caso la acción de la CIC solo se limitaría a las fracturas o pequeñas secciones donde las raíces más finas puedan penetrar en la roca dado que esta litología carece de porosidad primaria, por lo que esta roca solo permitiría pequeños volúmenes a ser explorados pero muy activos químicamente.

Al plantar *Eucalyptus* en Uruguay se está sustituyendo vegetación natural de praderas, situación poco frecuente en otras zonas forestales (Zamalvide y Ferrando, 2010a), por lo tanto, sustituyendo vegetación con exploración radicular superficial por vegetación con exploración radicular profunda. Este sistema radicular profundo implica una renovación de raíces finas en un volumen de suelo considerable en ciclos cercanos a los 10 años para pulpa o aún mayores para madera aserrable, lo que puede llevar a una liberación de cantidades considerables de carbono fresco en capas profundas del suelo (Christina et al., 2011) antes no presentes y que deberían ser consideradas.

*Eucalyptus* spp. tiene grandes demandas de agua respecto a las pasturas (Jackson et al., citados Christina et al., 2011) pudiendo estar fuertemente involucradas en la reducción de los flujos de corrientes

ampliamente observadas luego de la forestación (Jackson et al., citados Christina et al., 2011), además de que pueden acceder a agua en capas profundas del suelo, pudiendo agotar el agua subterránea en cuencas (Cohen et al., Le Maitre y Versfeld, citados por Laclau et al. 2001, Christina et al. 2011). Un estudio a largo plazo de 500 cuencas mostró que los flujos de los cursos disminuyeron dramáticamente dentro de pocos años después de la plantación de bosques (Jackson et al., citados por Christina et al., 2017), aunque, esta tendencia general negativa en el recurso de agua en el suelo es altamente dependiente de las condiciones locales (Christina et al., 2017). Dye (1996) plantea problemas para modelar el balance de agua en zonas profundas dada la incertidumbre sobre la profundidad a la que llegan las raíces, el mecanismo de recarga de agua del suelo y las características de retención de agua por parte de los estratos profundos del subsuelo. Este autor plantea, dada la importancia del agua profunda en el perfil de suelo, la importante pregunta de que si el agua puede ser recargada durante el cultivo continuo de *Eucalyptus*.

En el sentido opuesto, grandes plantaciones de bosques pueden modificar el ciclo del agua y los patrones de circulación de la humedad atmosférica de manera significativa (van Dijk y Keenan, citados por Christina et al., 2017) incrementando los flujos de vapor de agua hacia la atmósfera (Bruijnzeel, Pielke et al., Alkama y Cescatti, citados por Christina et al., 2017), lo que puede generar mayores tasas de precipitación (Hoffmann y Jackson, Spracklen et al., citados por Christina et al., 2017). A su vez, la posibilidad de una infiltración no uniforme hacia lo profundo del perfil, particularmente por medio de viejos o actuales canales de raíces, podrían llevar a una rápida recarga del subsuelo profundo en la presencia de árboles (Dell et al., citados por Dye et al., 1996).

Según Pawlik y Kasprzak et al. (2018) los árboles por medio de la acción de sus raíces, pueden cambiar las características físicas y químicas del suelo, el regolito y la roca, lo que subsecuentemente lleva a una profundización del suelo por medio de la meteorización biomecánica y bioquímica, esta última llevada a cabo también por las comunidades microbianas y hongos simbióticos. Por lo tanto, al estar modificando la profundidad radicular se podría estar afectando la tasa “natural” de meteorización o de generación de suelo, modificando los espesores de los horizontes más profundos o modificando factores importantes.

#### 4.3 SITIO FORESTAL

Dado que el crecimiento de un árbol es el resultado de la interacción del suelo, clima y factores bióticos, integrándose como “el sitio forestal” (Sganga, citado por Durán y García, 2007) en el siguiente apartado se buscará sintetizar

y esquematizar la información obtenida para mejorar la apreciación de los factores combinados suelo-saprolita-roca con el fin de a futuro estandarizar la información que pueda afectar a la producción forestal, producción que se expresa como índice de sitio, promedio de árboles dominantes y codominantes (Durán y García, 2007).

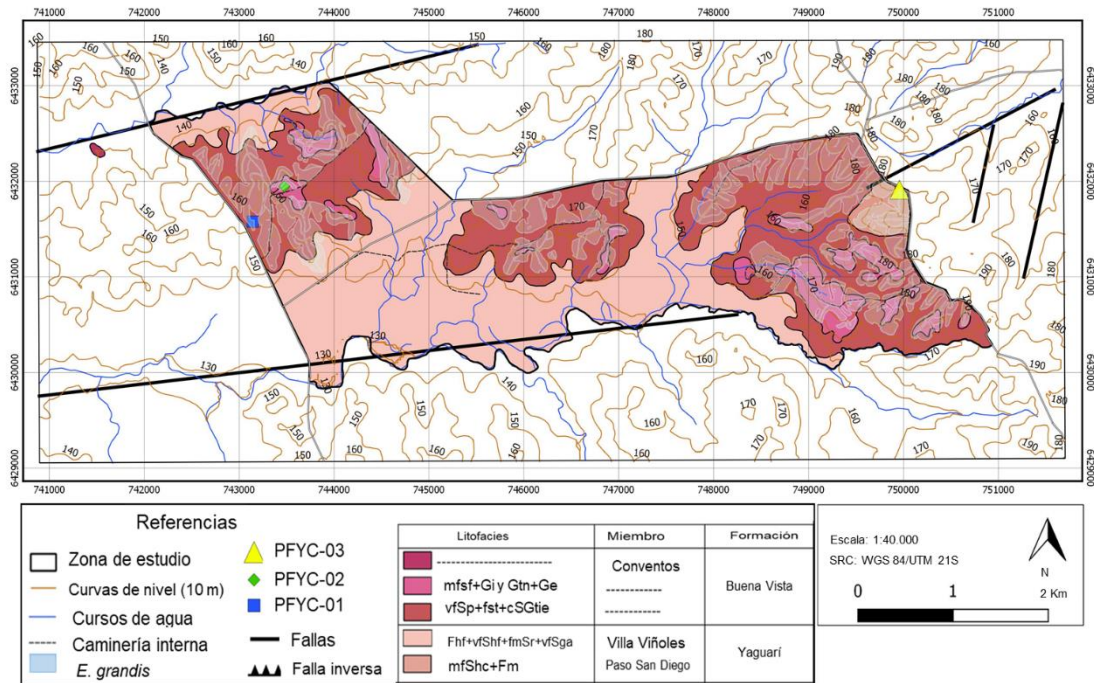
El índice sitio es afectado, entre otros, por factores como el suelo, relieve y la geología, siendo muy importante el agua disponible, la cual depende tanto de la capacidad de retención de agua del suelo y subsuelo como la facilidad para el enraizamiento que permita al árbol acceder al agua, aun en capas profundas (Durán y García, 2007). Para la calidad de sitio forestal Herbert, citado por Durán y García (2007), plantea que las exigencias o requisitos más importantes de los árboles en Uruguay se relacionan con la disponibilidad de agua y adecuado arraigamiento, obteniéndose los mayores crecimientos en los suelos profundos, sin horizontes limitantes para el desarrollo de las raíces, horizonte C meteorizado y fácilmente penetrables por las raíces para obtener agua disponible en los estratos profundos. Según Durán y García (2007) los principales parámetros que inciden en la calidad del sitio son los que afectan más a dichos requisitos:

- Profundidad efectiva de arraigamiento
- Textura del suelo: capacidad de retención de agua del material
- Naturaleza de la saprolita (horizonte C del suelo): capacidad de retención de agua del suelo; friabilidad o consistencia (volumen de arraigamiento)
- Clase de drenaje natural: O<sup>2</sup> para un enraizamiento intenso y rápido
- Contenido de carbono orgánico: N, P, consistencia, estabilidad de los agregados.

En base a la información geológica relevada y a fotointerpretación de suelos se determinaron puntos de muestreo de suelos a ser realizados con taladro holandés extensible. En este apartado se buscará atender los factores propuestos en los párrafos anteriores para exponer su utilidad, en particular el estudio del SSR, en cuanto a la clasificación de un sitio forestal y de su posible aporte como factores influyentes en la producción y por lo tanto en el índice de sitio y su precisión cartográfica.

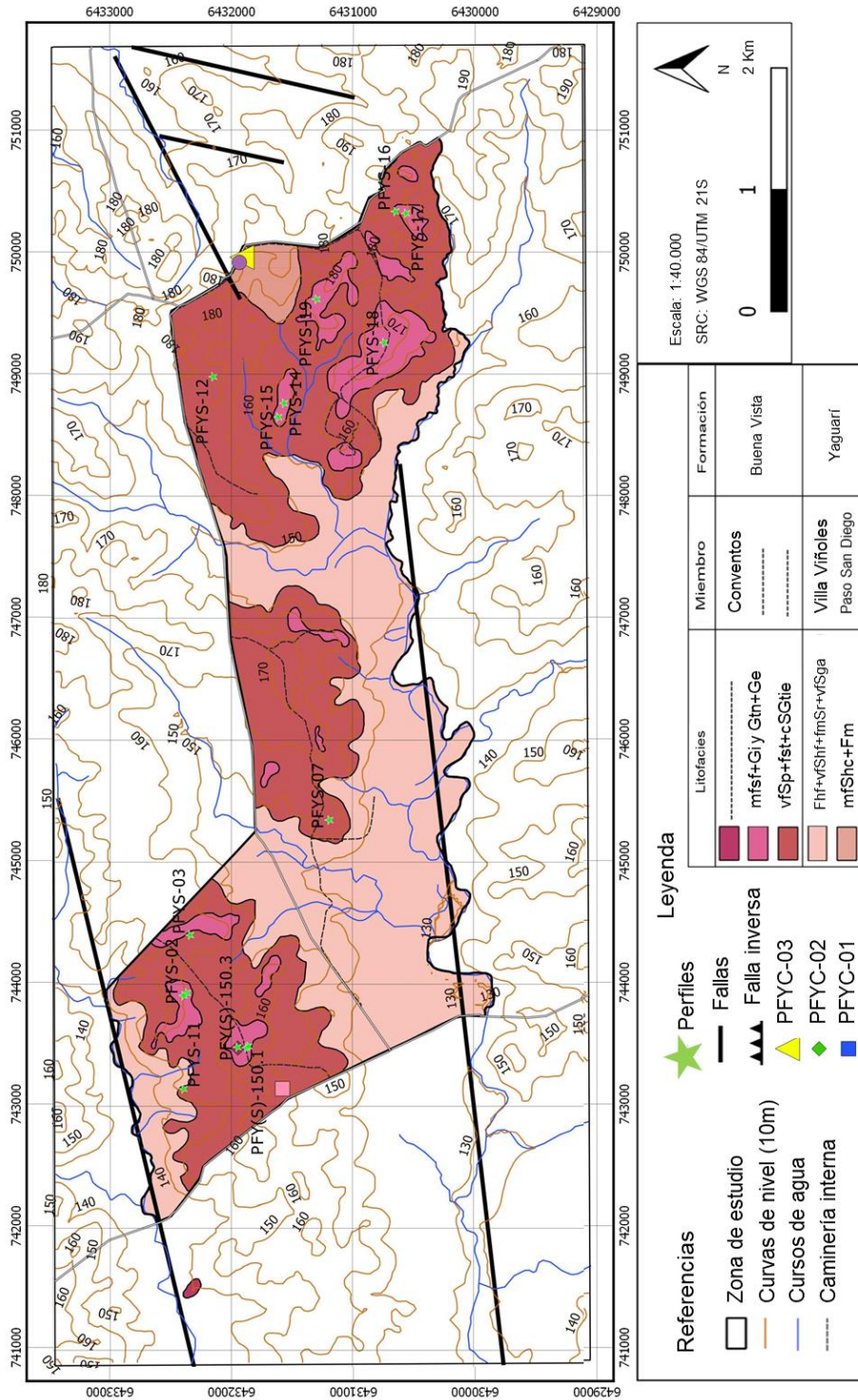
Como ya ha sido explicado en este trabajo se decidió hacer foco en la especie *E. grandis* dado que es comercialmente más utilizada que *E. benthamii*, y que *E. dunnii* presentaba problemas de crecimiento o sanitarios. *E. grandis* se ubica en las lomadas y en las partes más elevadas topográficamente, relieve que se condice plenamente con las litofacies mfSf+Gi y Gt+Ge (facies de rio gruesas), vfSp+fst+cSGtie (facies de rio finas) y mfShc+Fm (Miembro San Diego) sintetizado en la Figura 93.

Figura 93. Geología y plantaciones forestales



Esta relación indica una predeterminación por la geología local, al menos en parte, de características del sitio como el relieve y la posibilidad de que especie ser utilizada. Además, la geología es uno de los principales factores que determina las características de los suelos residuales que se forman a partir de ellas, por lo que el muestreo de suelos realizado tiene como propósito exponer que, con una buena base cartográfica geológica, se puede representar satisfactoriamente la variación de suelos presente a en el área. Tomando las calicatas PFYC-01 y 02 que poseen suelos forestales como modales, se realizaron muestreos de suelos a taladro holandés extensible en las litofacias que corresponden a dichas calicatas. Se seleccionaron perfiles de suelos representativos de la variación interna de dichas litofacias, confirmando la pertenencia a cada litofacias por factores generales como similitud en la secuencia de horizontes, texturas y principalmente por las características similares de las capas profundas saprolíticas obtenidas con las litologías dentro de cada litofacias. La ubicación de los perfiles y su correlación con las litofacias se muestran en la Figura 94 y las coordenadas se encuentran en el Anexo 3.

Figura 94. Ubicación de perfiles de suelos en base geológica

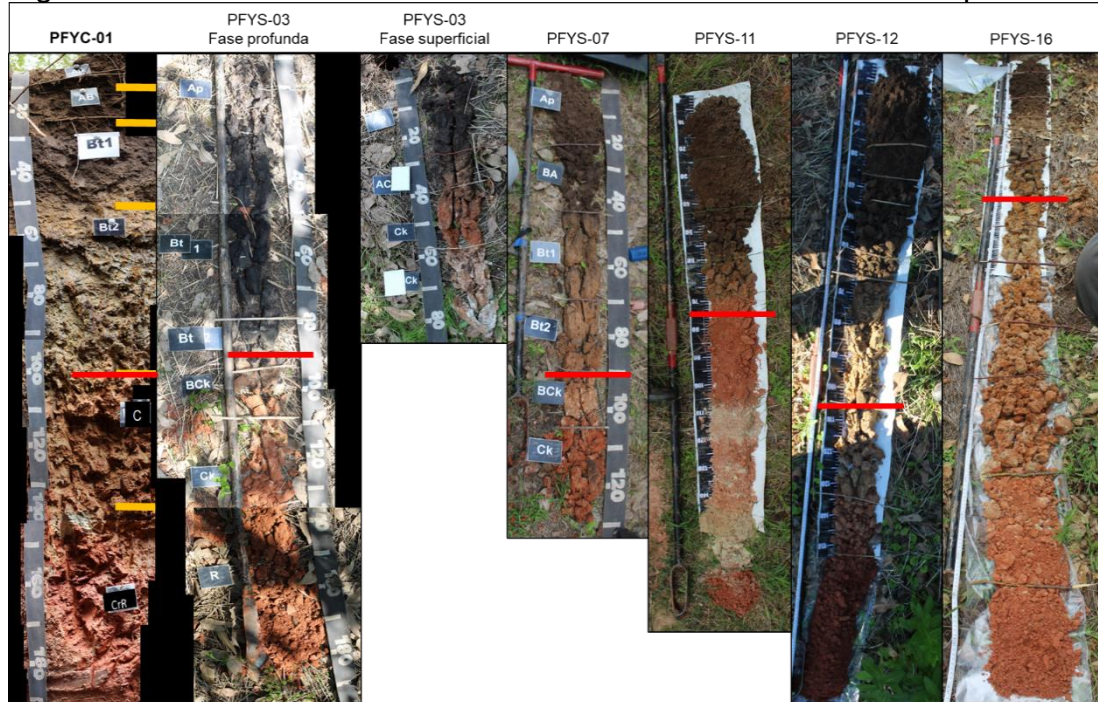




#### 4.3.1 Perfiles de SSR asociados a litofacies vfSp+fst+cSGtie

A continuación, se presentan los perfiles de suelos asociados a la litofacies vfSp+fst+cSGtie (facies de río con areniscas finas dominantes) y el perfil de la calicata PFYC-01 que se toma como referencia para los otros perfiles realizados a taladro.

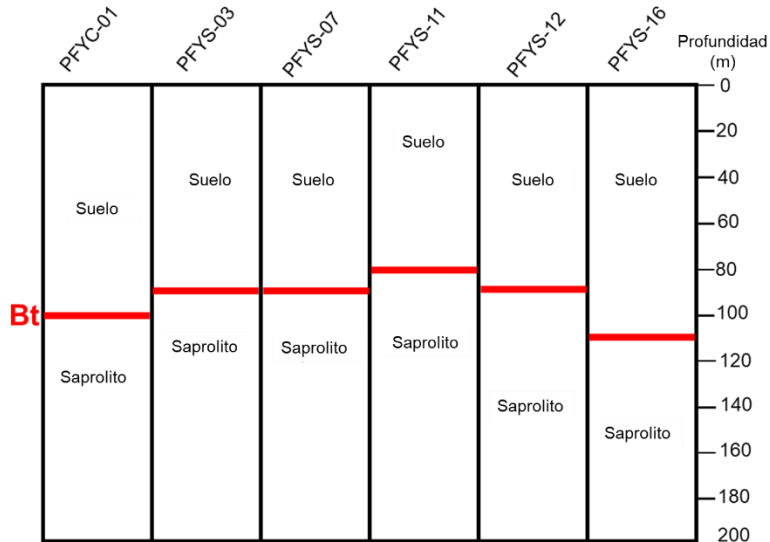
Figura 95. Perfiles de suelos asociados a litofacies vfSp+fst+cSGtie



Dentro de esta litofacies se encuentran los perfiles que poseen areniscas finas a muy finas, de color rosa a anaranjado en sus capas más profundas, así como alternancias de decoloraciones blancas remanentes de las litologías originales. En los perfiles de la anterior Figura 95, así como en la siguiente Figura 96, se indica en rojo el límite inferior de los horizontes Bt, los cuales son el límite más fácilmente reconocible como horizonte diagnóstico del suelo. Los horizontes o capas saprolíticas que se encuentran por debajo del Bt no pueden ser subdivididos cuando se realiza el muestreo a taladro dado que se destruye la estructura, por lo que se toma la sección saprolítica del perfil de la calicata PFYC-01 como representativos para los otros perfiles.

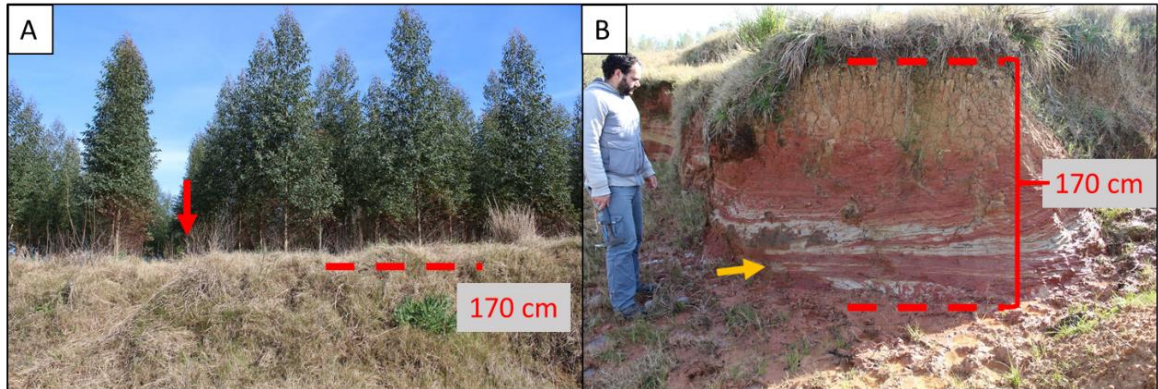


Figura 96. Diagrama a escala de los perfiles de suelos asociados a litofacies vfSp+fst+cSGtie



Como se puede observar en la Figura anterior, los horizontes Bt en estos perfiles se encuentran casi a la misma profundidad, independientemente de la variación que produce que hayan sido tomados en diferentes posiciones del relieve, lo que estaría indicando un proceso de meteorización y procesos de generación de suelo relativamente uniformes en esta litofacies. La profundidad real a la que se encuentra la capa R (Roca fresca) es un problema que no se pudo solucionar durante el trabajo de campo, en el cual se incurrió dado que al momento de generar la nueva clasificación descriptiva macroscópica del SSR y la profundidad efectiva de las raíces se vio necesario clasificar a la capa más profunda de esta calicata como una capa alterada y no como roca fresca. De realizarse estudios similares en el futuro, este problema ya no existirá dado que ya se cuenta con la metodología apropiada. Por lo tanto, la profundidad a la cual se encuentra la capa R se ha estimado por medio de la cantera cercana de referencia utilizada como criterio de selección del sitio de esta calicata. En la Figura 97 A se puede apreciar la ubicación de la calicata en las primeras hileras de árboles (flecha roja) y la altura de la pared de la cantera (1,70 m), pared que en su base contiene la capa R fresca que se tomó como referencia, como se muestra en la Figura 97 B (flecha amarilla).

Figura 97. Perfil de la cantera de referencia de la calicata PFYC-01

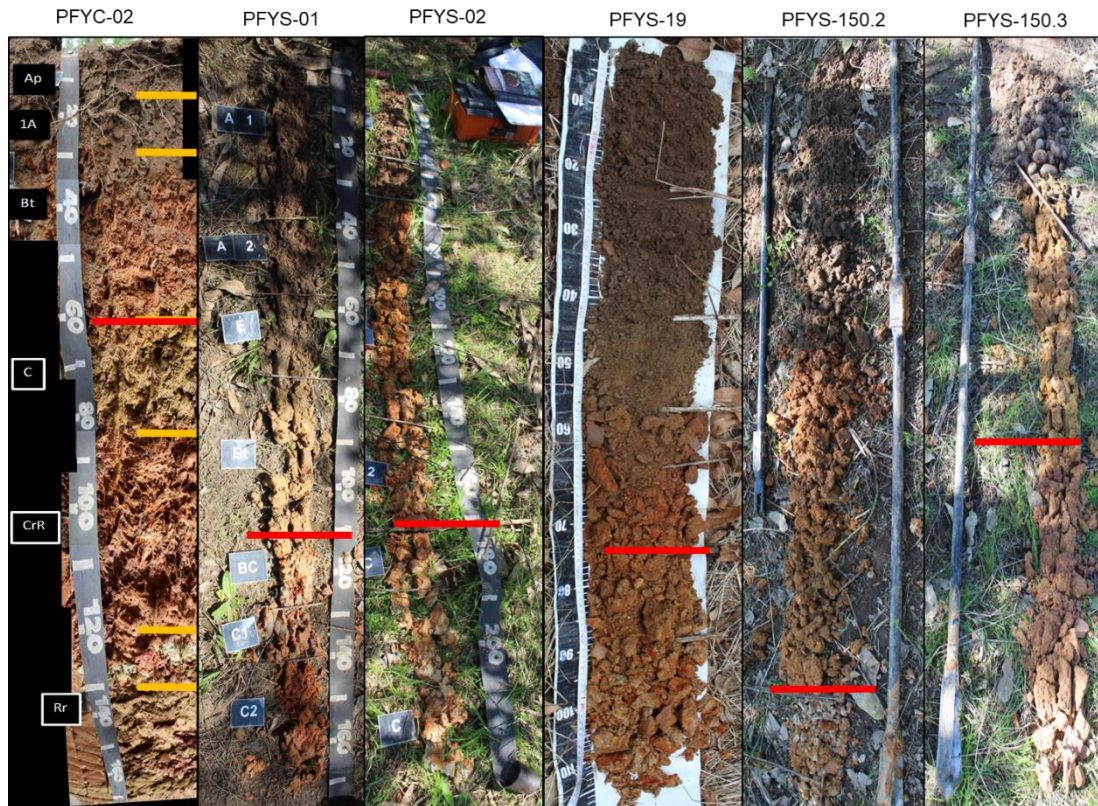


El perfil de la calicata PFYC-01 tiene una profundidad de 1.90 m, llegando a la capa CrR y dado el espesor de la capa saprolítica (60 cm) en la cantera de referencia se estima que la capa R podría estar cercana a los 2 m en la calicata PFYC-01, por lo que se usa esta profundidad estimada de 2 metros como referencia para los perfiles de los suelos, modelizando así los perfiles como se aprecian en la Figura 96, con valor promedio de profundidad del Bt de 93 cm, un espesor total de saprolito de 107 cm y el inicio de la capa R (o litología fresca) a los 2 m estimados.

#### 4.3.2 Perfiles de SSR asociados a litofacies mfSf+Gi y Gtn+Ge

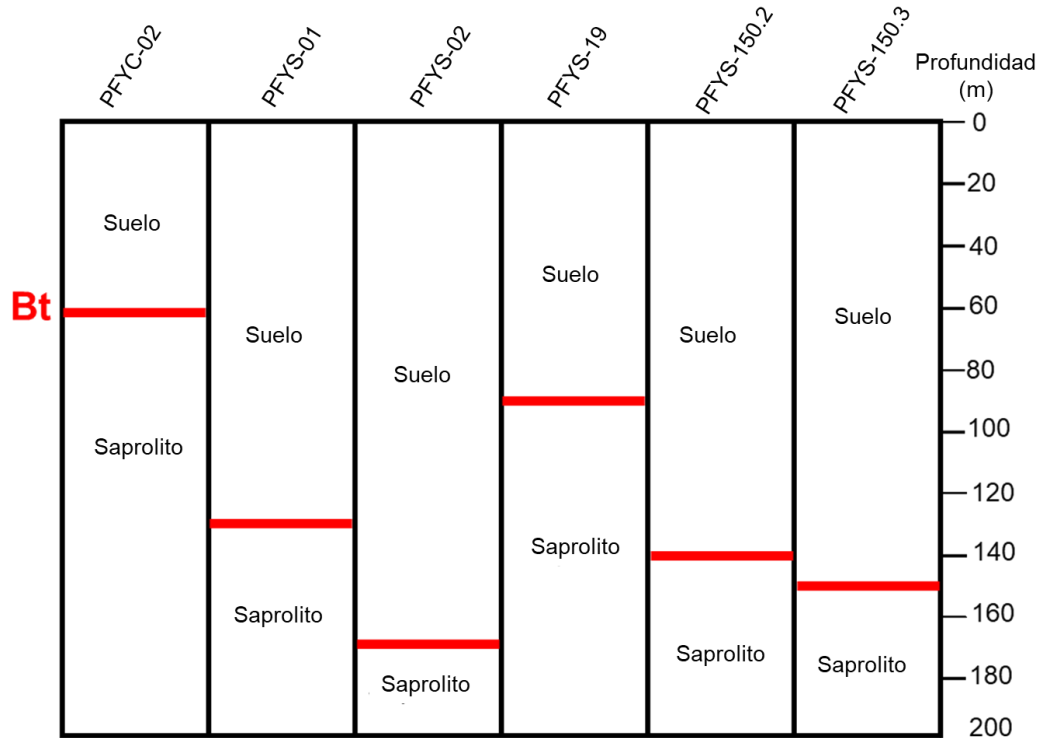
A continuación, se presentan los perfiles de suelos asociados a la litofacies mfSf+Gi y Gtn+Ge (facies de río con areniscas gruesas y conglomerádicas dominantes) y el perfil de la calicata PFYC-02 que se toma como referencia para los otros perfiles realizados a taladro.

Figura 98. Perfiles de suelos asociados a litofacies mfSf+Gi



Dentro de esta litofacies (mfSf+Gi) se encuentran los perfiles que poseen areniscas finas, de color amarillento a ocre en sus capas más profundas, niveles de concentración arcillosa o niveles arcillosos y conglomerados polimícticos exclusivamente como acumulación cercana al horizonte superfina (Ap). En los perfiles de la anterior Figura 98, así como en la siguiente Figura 99, se indica en rojo el límite inferior de los horizontes Bt, los cuales son el límite más fácilmente reconocible como horizonte diagnóstico del suelo. Los horizontes o capas saprolíticas que se encuentran por debajo del Bt no pueden ser subdivididos cuando se realiza el muestreo a taladro dado que se destruye la estructura, por lo que se toma la sección saprolítica del perfil de la calicata PFYC-02 como representativos para los otros perfiles manteniendo en consideración un margen de variación entre materiales saprolíticos dominados por arena o con alternancias de arcilla, dada la variación litológica lateral manifestada en el punto PMZ-023 anexo a la calicata PFYC-02 (areniscas finas e intraconglomerados).

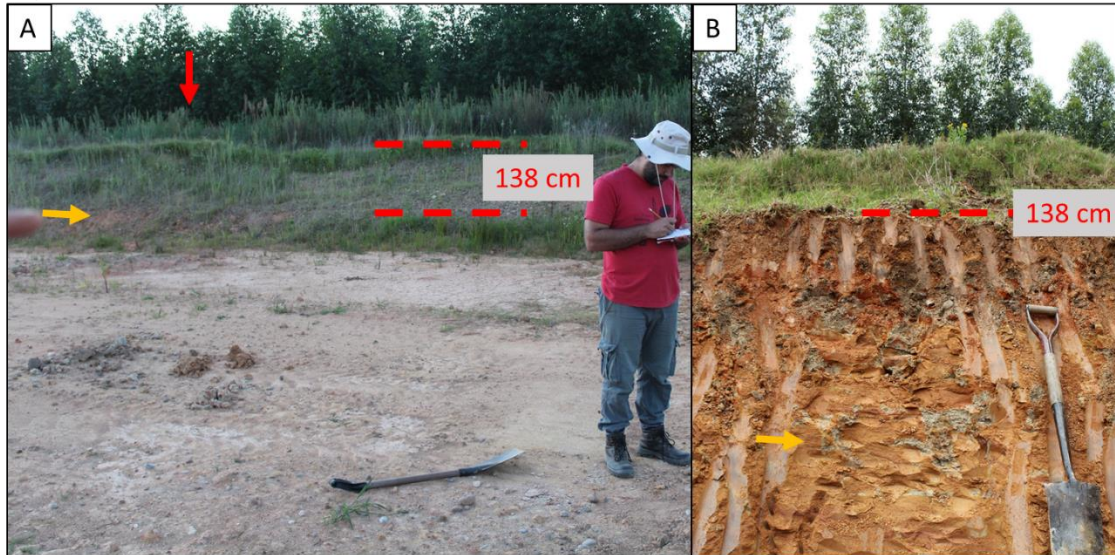
Figura 99. Diagrama a escala de los perfiles de suelos asociados a litofacies mfSf+Gi



Como se puede observar en la Figura 99, los horizontes Bt en estos perfiles se encuentran a profundidades diferentes, pese a que estos suelos fueron muestreados en posiciones topográficas relativamente similares (laderas altas) por lo que la variación podría estar indicando procesos de meteorización y de procesos de generación de suelo diferentes, productos de la variación litológica lateral dentro de esta litofacies. La profundidad real a la que se encuentra la capa R (roca fresca) presenta el mismo error que lo explicado para la calicata PFYC- 01 (apartado 4.3.1) por lo que se plantea el mismo criterio estimativo. La profundidad a la cual se encuentra la capa R se ha estimado por medio de la cantera cercana de referencia utilizada como criterio de selección del sitio de esta calicata. En la Figura 100 A se puede apreciar la ubicación de la calicata en las primeras hileras de árboles (flecha roja) y la altura de la pared de la cantera (1,38 m), pared que en su base contiene la capa R fresca que se tomó como referencia, como se muestra en la Figura 100 A y B (flecha amarilla).



Figura 100. Perfil de la cantera de referencia de la calicata PFYC-02



El perfil de la calicata PFYC-01 tiene una profundidad de 1,70 m, llegando a la capa Rr y dada la profundidad de la capa R en la cantera de referencia se estima que la capa R podría estar cercana a los 2 m en la calicata PFYC-02, por lo que se usa esta profundidad estimada de 2 metros como referencia para los perfiles de los suelos, modelizando así los perfiles como se aprecian en la Figura 99, con un valor promedio de 118 cm un espesor hasta el Bt, capas saprolíticas de 82 cm promedio y el inicio de la capa R (o litología fresca) a los 2 m estimados, con grandes variaciones como se ve en la Figura 99.

La litofacies Gtn+Ge no presentan un perfil representativo SSR de calicata excavada, pero sí se pudo comprobar su desarrollo lateral con las litofacies mfSf+Gi como fue expresado en el punto de campo PMZ-023. Al realizarse los perfiles a taladro holandés en esta litofacies se pudo llegar en todos los casos a una capa saprolítica muy dura o a la capa R propiamente dicha, dado que se hizo imposible continuar la perforación, por lo que la profundidad total de la capa saprolítica y el comienzo de la capa R se estima por medio de la profundidad total alcanzada en cada perfil, los cuales se muestran en la siguiente Figura 101.



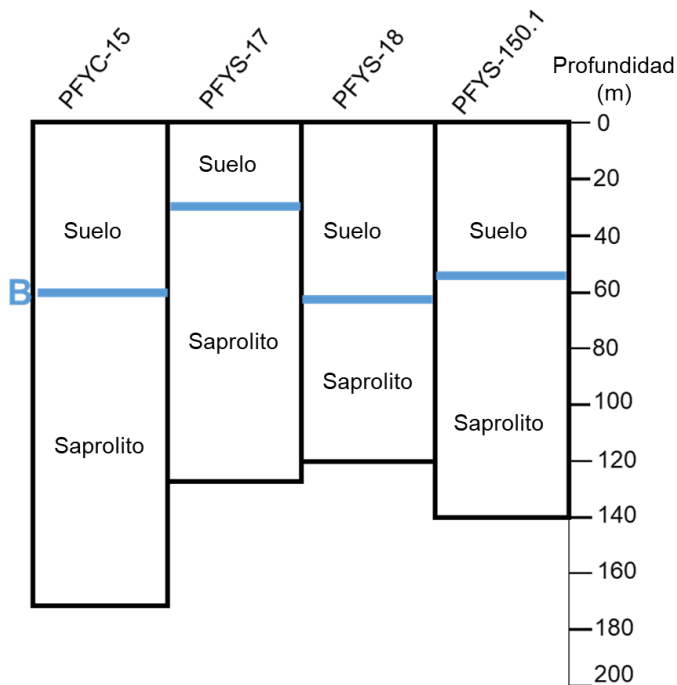
Figura 101. Perfiles de suelos asociados a litofacies Gtn+Ge



Dentro de esta litofacies (Gtn+Ge) se encuentran los perfiles que poseen areniscas gruesas a muy gruesas y conglomerádicas, de colores rosas, rojizas a ocre en sus capas más profundas, secciones de concentración de hierro y manganeso que se interpretan como horizontes B, carencia de horizonte Bt y siempre poseen fragmentos líticos o cantos rodados en toda la distribución del perfil. En los perfiles de la anterior Figura 101, así como en la siguiente Figura 102, se indica en rojo el límite inferior de los horizontes B. Los horizontes o capas saprolíticas que se encuentran por debajo del Bt no pueden ser subdivididos cuando se realiza el muestreo a taladro dado que se destruye la estructura, por lo que se toma, como ya se ha mencionado, el final de la perforación como el inicio de la capa R y por lo tanto la sección comprendida

entre el B y el final de la perforación como las capas saprolíticas indiferenciadas.

Figura 102. Diagrama a escala de los perfiles de suelos asociados a litofacies Gtn+Ge



Como se puede observar en la Figura anterior, los horizontes B en estos perfiles se encuentran a profundidades con poca variación, posiblemente explicado por el hecho de que fueron muestreados en posiciones topográficas relativamente similares (laderas altas) y la poca variación se podría deber a la diferencia litológica de sucesión de areniscas gruesas y conglomerádicas (secuencia grano creciente). La profundidad hasta el horizonte B promedio es de 52 cm, las capas saprolíticas presentan un espesor promedio de 88 cm y la capa R comienza en promedio a partir de los 140 cm.

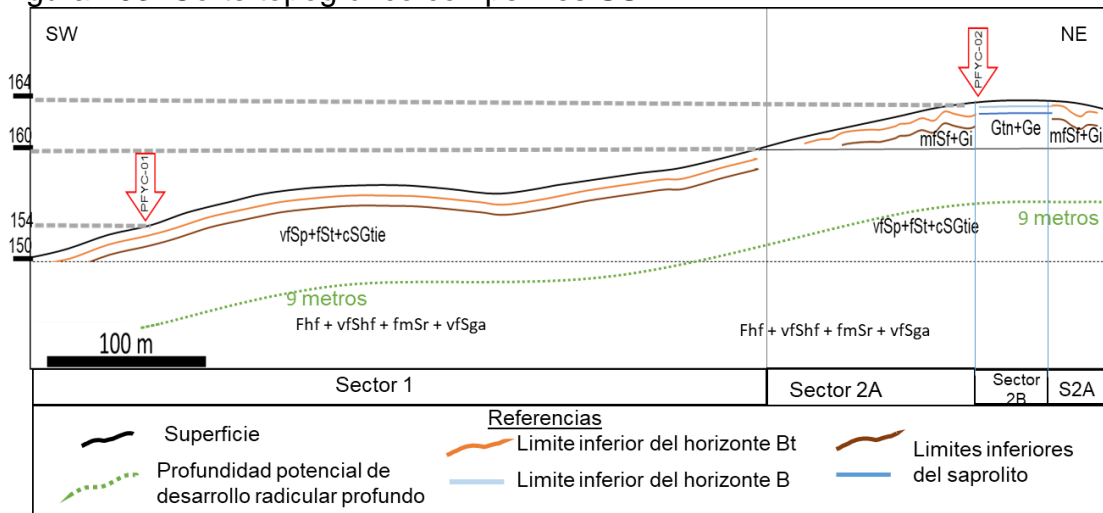
#### 4.3.3 Discusión de los posibles aportes a la caracterización del sitio forestal

Considerando lo propuesto al inicio de este apartado, la roca y el saprolito pueden participar de forma importante en la producción forestal, por lo que son relevantes a ser caracterizar junto con el suelo. Dada la información relevada en este trabajo a campo, por análisis de laboratorio y por el apoyo bibliográfico de diferentes investigadores, se puede enumerar una serie de consideraciones:

- Las plantaciones de *Eucalyptus* poseen un crecimiento radicular profundo simétrico a la partea área
- El sistema radicular profundo tiene un marcado desarrollo ontogénico en busca de agua
- El crecimiento radicular profundo juega un rol importante en la absorción de agua para la sobrevivencia de los estadios tempranos del árbol y para el potencial de producción en los estadios avanzados
- El sistema radicular profundo puede absorber nutrientes selectivamente
- En los perfiles SSR estudiados se constató el desarrollo radicular a profundidad, así como la presencia de nutrientes y posibilidad de intercambio catiónico
- Las raíces profundas muestran adaptaciones fisiológicas y funcionales en las capas profundas saprolíticas y rocas
- Todo el perfil SSR presenta porosidad tal que permite el desarrollo radicular, así como la aparente posibilidad de circulación profunda de agua denotada por la carencia de procesos hidromórficos o napas colgadas de agua
- Las litofacies definidas que presentan desarrollo de suelos forestales presentan todas porosidad primaria, escasa cementación y comportamiento teórico como acuíferos libres conectados al ciclo hidrológico superficial
- En la litofacies Fhf + vfShf + fmSr + vfSga (ambiente mareal de areniscas finas a muy finas) únicamente se encuentra un nivel de pelitas arcillosas laminadas aparentemente poco continuo que podría actuar como limitante para la circulación profunda del agua subterránea

Utilizando la información elaborada en este apartado sobre los perfiles SSR y el potencial de exploración radicular profunda, se realizó un corte topográfico representativo de la zona de estudio y que intersecta las calicatas PFYC-01 y 02 (Figura 103).

Figura 103. Corte topográfico con perfiles SSR



Este perfil representativo de la zona de estudio y ejemplifica el potencial subterráneo del sitio forestal, al tomar en cuenta las consideraciones enumeradas anteriormente se puede realizar el siguiente ejercicio de análisis:

En el sector 1 se podría esperar una profundidad de 93 cm relativamente homogénea del Bt, por lo cual las plantaciones de altura de 1 metro promedio dependerían del contenido de agua y nutrientes de estos horizontes. Al pasar el metro de altura, las raíces de las plantaciones ingresan al horizonte C y colonizarían las capas saprolíticas hasta una profundidad relativamente homogénea de 2 metros, momento que sería indicado al alcanzar los 2 metros de altura promedio. Por lo tanto, entre 1 metro y los 2 metros de altura el árbol pasa a utilizar tanto los horizontes de suelo como las capas saprolíticas. Hasta estos dos metros, como ha sido analizado, existirá un suministro de nutrientes (P, Ca, Mg y K) así como una CIC que permitiría su uso por parte de los jóvenes árboles en un momento de acumulación de nutrientes. A su vez existe un potencial de dos metros de suelo y saprolita con capacidad de almacenar agua, lo cual debería de ser estudiado para cuantificarlo. A partir de los dos metros las raíces ingresan en la capa R, dependiendo de la altura del árbol y la posición topográfica de los rodales, la exploración radicular profunda puede abarcar las litofacies vfSp + fst + cSGtie que da origen a los suelos y, como es en el caso estudiado, pueden alcanzar a la litofacies Fhf + vfShf + fmSr + vfSga infra yacentes que comienza en promedio en la curva de nivel 150. Esto implica que cuando los arboles alcancen los 10 metros de altura prácticamente en toda la zona estudiada, potencialmente podrían estar utilizando agua de todas las litologías presentes que actúan como acuíferos continuos tanto lateralmente como en profundidad, logrando obtener un potencial acceso de agua enorme, siempre y cuando no satisfagan sus

necesidades con el contenido de agua subterránea con el volumen explorado o alcancen el nivel freático saturado previamente.

En el sector 2 se puede esperar un comportamiento heterogéneo de los suelos dada la variación lateral de las dos litofacies identificadas, generando un comportamiento diferencial en los suelos y saprolitos como ha sido mencionado anteriormente. En el sector 2 A se esperaría encontrar una profundidad variable, promediando 118 cm para el Bt, por lo cual las plantaciones de altura de 1 metro promedio dependerían del contenido de agua y nutrientes de los horizontes superficiales y en algunos casos llegando a las capas saprolíticas. Al pasar el metro de altura, lo más probable es que todas las plantaciones ingresen al horizonte C y colonizarían las capas saprolíticas en su totalidad al alcanzar los dos metros de altura, dado que se estima una profundidad relativamente homogénea de 2 metros hasta alcanzar la capa R de litofacies mfSf +Gi. Por lo tanto, entre 1 metro y los 2 metros de altura el árbol pasa a utilizar tanto los horizontes de suelo como las capas saprolíticas. Hasta estos dos metros, como ha sido analizado, existirá un suministro de nutrientes (P, Ca, Mg y K) así como una CIC que permitiría su uso por parte de los jóvenes árboles en un momento de acumulación de nutrientes. A su vez existe un potencial de dos metros de suelo y saprolita con capacidad de almacenar agua, lo cual debería de ser estudiado para cuantificarlo. En la situación del sector 2 B la profundidad del horizonte B y de las capas saprolíticas es relativamente homogénea y menos potentes en su conjunto, por lo que los árboles al medio metro de altura ya han colonizado todo el suelo y al metro y medio en promedio ya han ingresado a la capa R, probablemente a una edad muy joven cercana a la plantación. En promedio, la potencia de la litofacies mfSf + Gi y Gtn+Ge es de 4 a 5 metros y se desarrolla subhorizontalmente, en promedio a partir de la curva de nivel 160, por lo que dependiendo de la posición topográfica del rodal, las raíces pueden fácilmente alcanzar la capa R de estas litofacies, logrando a los 4 metros de altura promedio en el general de la zona estudiada sobrepasarlas, ingresando en la infrayacente litofacies (vfSp + fst + cSGtie). Por lo tanto, el rol de esta litofacies que se posiciona en las partes más altas del relieve de manera dispersa, dependería fuertemente de la recarga de lluvia para almacenar agua, que en conjunto con sus sectores de granulometría más gruesa o cantos pelíticos, podría estar representando un mal medio como reservorio de agua subsuperficial. Al pasar los 4 metros promedio de altura, es muy seguro que en general la gran mayoría de las raíces profundas de los rodales ubicados sobre estas litofacies logren alcanzar la infra yacente litofacies vfSp + fst + cSGtie, la cual posee mayor potencia, continuidad lateral y granulometrías que le permitirían un comportamiento de acuífero con mayor capacidad de retención de agua al ser arenas más finas, y por lo tanto con porosidad menor. En esta última litofacies con mejor comportamiento hidrogeológico general, es donde se esperaría que las raíces lograsen



encontrar la suficiente agua almacenada para cubrir sus requerimientos, de lo contrario al sobrepasar los 14 metros de altura, las raíces de los arboles estarían con el potencial de llegar las infra yacentes litofacies Fhf + vfShf + fmSr + vfSga que poseen capacidad de acuífero y aún mayor continuidad lateral que las otras, por lo que sería más promisorio en cuanto a su contenido de agua subterránea. Esto se podría confirmar con información de obras de captación de agua subterráneas cercanas que presenten la misma sucesión de unidades geológicas.

Es de destacar que por medio de esta interpretación de sitio forestal para la zona estudiada se podría llegar a comprender y cuantificar mejor el uso efectivo de agua por parte del cultivo de *Eucalyptus*, tanto como para mejorar su producción como para saber el efecto de sustracción que realizan a las unidades acuíferas.

## 5. CONCLUSIONES

1. El estudio geológico detallado fue realizable por medio de litofacies y el análisis de litofacies permitió interpretar ambientes y condiciones deposicionales. Se obtuvieron 17 litofacies, las cuales conformaron 7 asociaciones de litofacies
2. La asociación mfShc+Fm se atribuye al Miembro San Diego y la asociación de litofacies Fhf+vfShf+fmSr+vfSga se atribuyen el Miembro Villa Viñoles, ambos miembros de la Fm. Yaguará. La asociación de litofacies vfSp+fSt+cSGtie, mfSf+Gi, Gtn+Ge y litofacies Gtn se atribuyen todas a la Fm. Buena Vista, proponiéndose aquí agrupar las litofacies gruesas en un nuevo Miembro llamado Zapallar.
3. Se definieron 3 sitios propicios y representativos del área para realizar calicatas con profundidades de 1,60 m, 1,70 m y 2 m en tres litologías diferentes: arenisca finas (Fm. Buena Vista), arenisca conglomerádica (Fm. Buena Vista) y pelita arenosa masiva del Miembro San Diego (Fm. Yaguará).
4. Se lograron identificar diferentes capas saprolíticas y de roca por medio de la propuesta elaborada (cuadro 6) específica para saprolitos generados a partir de rocas sedimentarias detríticas.
5. Conocer las litologías frescas es fundamental en las descripciones completas del perfil suelos –saprolito-roca para identificar las modificaciones que las litologías sufren por medio de la meteorización y el avance de los procesos pedogenéticos diferenciándose así diferentes capas saprolíticas.
6. Los criterios del Cuadro 6 que permitieron diferenciar dentro de cada saprolito nuevas capas son principalmente las fracturas y la conservación de estructuras sedimentarias. Estos criterios complementan a los usados para horizontes y subfijos edafológicos.
7. La extensión radicular profunda se confirmó por medios visuales hasta las profundidades máximas de las calicatas (2 m, 1,70 m y 1,60 m de profundidad) en plantaciones de *Eucalyptus grandis* con 23 y 17 meses de edad.
8. En los horizontes Ap y AB de las tres calicatas se observaron la mayor cantidad de raíces y de mayor diámetro de predominante desarrollo lateral con funciones de anclaje y transporte. También se observó la mayor concentración de raíces finas de función absorción y transporte con predominio de desarrollo lateral. En los horizontes Bt se genera una marcada reducción de las raíces, encontrándose mayoritariamente raíces finas y escasas gruesas. En los horizontes C hay un aumento de raíces finas y gruesas. En las capas saprolíticas inferiores y capa R se observa además un aumento de raíces muy finas dendríticas. Se confirma el sistema radicular dual superficial y profundo y

se plantea aquí confirmar en futuras investigaciones el subdividir el sistema radicular según capas de saprolito y rocas.

9. Las raíces utilizan preferentemente planos de fracturas o de estructuras sedimentarias para crecer en profundidad. Esto lleva seguramente a que el estudio de raíces por medio de calicatas en uno o pocos planos de corte genere observaciones erróneas. Este crecimiento preferencial realza la importancia de la descripción utilizada en el Cuadro 6.

10. La clasificación macroscópica de raíces finas en base a su grado de ramificación con diferencias de diámetros, fisiológicas y funcionales es factible de utilizarse y puede describir el uso predominante de cada horizonte/capa por parte de las raíces.

11. Se registran raíces adaptadas en morfología externa, adoptando formas ovaladas y extremadamente planas desde varios centímetros de ancho a 100-200  $\mu\text{m}$ . En estas raíces más gruesas se observaron adaptaciones como parénquima de reserva, aerénquima y tejidos deformados lo que les permite una mayor circulación de aire, por lo que esta especie puede adaptarse a medios poco oxigenados

12. Se encontraron raíces muy finas las cuales están muy por debajo de los 2 mm (300, 100, 28 y 18  $\mu\text{m}$ ) no visibles a simple vista, las cuales muestran funciones de absorción y transporte las cuales no serían consideradas dentro del sistema radicular de los árboles subestimando la actividad del mismo.

13. Se observaron en capas profundas numerosos filamentos externos atribuibles a ectomicorrizas asociados a raíces. También se observó una posible endomicorrizas o micorrizas vesiculares-arbusculares dentro de una raíz. La presencia de micorrizas a profundidad puede jugar un importante rol no considerado en la nutrición de este cultivo.

14. Los análisis químicos con protocolos para los horizontes de suelos brindaron datos para las capas profundas y rocas. El P se encuentra en todo el perfil, llegando en algunas capas profundas a igualar o superar los valores del horizonte A. El calcio, magnesio, potasio y la CIC tienden a aumentar en profundidad.

15. Los criterios de impedimentos en la penetración radicular manejados comúnmente para este cultivo a nivel de Uruguay no fueron observados. Los horizontes Bt en el caso más restrictivo de 60 cm de espesor, textura arcillosa, bloques angulosos moderados a fuertes de mediano a gran tamaño no fue un impedimento y las raíces fueron registradas penetrando en capas con DAP máximas de  $1,69 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y RP que superan los 5000 KPa.

17. La constatación de un prolifero, diverso y adaptado sistema radicular, con posibles ecto y endomicorrizas, que interactúan directamente con saprolitos y rocas donde se encuentran potenciales nutrientes plantea la necesidad de reenfocar el estudio de las raíces capas profundas. La nutrición y productividad del cultivo, regímenes de fertilización, ingreso de COS profundo, así como considerar posibles modificaciones en la meteorización de las rocas y generación de suelo dadas por el cultivo de *Eucalyptus spp.* deben ser reenfocadas.

18. Investigadores internacionales plantean que las raíces de *Eucalyptus* se desarrollan en sincronía con la parte vertical aérea hasta alcanzar la napa freática, estudiado lo anterior en suelos muy diferentes a los de Uruguay. Al no observarse impedimentos en el desarrollo radicular se plantea como posible que este crecimiento sincrónico ocurra en la situación de Uruguay, lo que implicaría que virtualmente en todas las situaciones con plantaciones con alturas mayores a los 3 m las raíces alcancen capas saprolíticas y litologías.

19. El planteo aplicado en este trabajo de estudiar desde un punto de vista geológico el área de plantación, definir metodológicamente los saprolitos e integrar la relevancia del sistema radicular profundo de este cultivo, parece ser factible y muy prometedor en caracterizar y delimitar mejor los sitios forestales en términos productivos y ecológicos a gran y pequeña escala.

20. Se plantea como continuación de esta línea de investigación el corroborar la utilización de agua, así como la de nutrientes por medio de sistemas radiculares profundos basándose en métodos indirectos que permitan extrapolación de información con base geológica, como isotopos análogos a los cationes base o de elementos químicos particulares presentes en las litologías y/o en aguas subterráneas.

## 6. RESUMEN

Estudios internacionales han demostrado que las plantaciones de *Eucalyptus spp.* desarrollan rápidamente un profundo sistema radicular, alcanzando relaciones casi simétricas con la parte aérea de los árboles. Dichos estudios fueron realizados en suelos muy diferentes a los que se encuentran a nivel de Uruguay. Por dicha diferencia, en el presente trabajo se investiga la primera información preliminar a nivel de Uruguay sobre el desarrollo radicular profundo de *E. grandis* y su interacción con suelos, saprolitos y rocas en el Noroeste de Uruguay. Partiendo de una base geológica, se excavaron tres calicatas profundas, las cuales se clasificaron según una nueva propuesta de saprolitos. Se realizaron análisis químicos y físicos de los perfiles completos, obteniéndose datos de todo el continuo del perfil, incluyendo rocas. Además, se realizaron descripciones macroscópicas de las raíces in situ y observaciones en laboratorio (lupa, microscopia electrónica y cortes anatómicos) de raíces, saprolitos y rocas. El desarrollo radicular profundo fue corroborado hasta la profundidad máxima de excavación, mostrando variadas y adaptadas raíces, con indicios de comportamientos radiculares diferentes según las diferentes partes del perfil (suelo, saprolita o roca). Finalmente se plantea como este enfoque de estudio, considerando todo el perfil del suelo y el sistema radicular profundo de *E. grandis*, puede aportar al caracterizar y definir los sitios forestales, así como mejorar el conocimiento en el manejo productivo de este cultivo y sus efectos en el ambiente.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*; Raíces profundas; Litofacies; Saprolito; Cuenca Norte; Uruguay.



## 7. SUMMARY

International studies have shown that *Eucalyptus spp.* plantations quickly develop a deep root system, reaching almost symmetrical relationships with the aerial part of the trees. These studies were carried out in soils very different from those found at national level. Due to this difference, the present work investigates the first preliminary information at the national level on the deep root development of *E. grandis* and its interaction with soils, saprolites and rocks in the Northwest of Uruguay. Starting from a geological base, three deep pits were excavated, which were classified according to a new saprolite proposal. Chemical and physical analyzes of the complete profiles were carried out, obtaining data from the entire profile continuum, including rocks. In addition, macroscopic descriptions of the roots in situ and laboratory observations (magnifying glass, electron microscopy and anatomical sections) of roots, saprolites and rocks were made. Deep root development was corroborated up to the maximum depth of excavation, showing varied and adapted roots, with different root behavior indexes according to the different parts of the profile (soil, saprolite or rock). Finally, it is proposed how this study approach, considering the entire soil profile and the deep root system of *grandis*, can contribute to the characterization and definition of forest sites, as well as improve knowledge in the productive management of this crop and its effects on the environment.

Keywords: *Eucalyptus grandis*; Deep roots; Lithofacies; Saprolite; Norte Basin; Uruguay.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, M. A. 1996. Distribution of *Eucalyptus* in australian landscapes: landforms, soils, fire and nutrition. In: Attiwill, P. M.; Adams, M. A. eds. Nutrition of Eucalypts. Melbourne, CSIRO. pp. 61-76.
2. Alessandretti, L.; Warren, L. V.; Machado, R.; Novello, V. F.; Sayeg, I. J. 2015. Septarian carbonate concretions in the Permian Rio do Rasto Formation: birth, growth and implications for the early diagenetic history of Southwestern Gondwana succession. *Sedimentary Geology*. 326:1-15.
3. Andreis, R. R.; Bossi, G. E.; Montardo, D. K. 1980. O Grupo Rosário do Sul (Triássico) no Rio Grande do Sul-Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia (31th., 1980, Camboriú, Santa Catarina). Trabalhos apresentados. Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia. pp. 659-673.
4. Azevedo, S.; Lavina, E.; Costa Barberena, M.; Ferrando, L.; Andreis, R. 1985. Evidências de correlação entre a Formação Yguari (Uruguai) e as formações Rio do Rasto e Sanga do Cabral (Rio Grande do Sul - Brasil). *Pesquisas em Geociências*. 17(17):112-121.
5. Bentancor, L. F. 2017. Extracción de nutrientes por *Eucalyptus dunnii* Maiden de 4 años con destino a la producción de biomasa para energía y celulosa. Tesis Maestría en Ciencias Agrarias opción Ciencias del Suelo. Montevideo, Uruguay. Universidad de la Republica. Facultad de Agronomía. 99 p.
6. Bordron, B.; Robin, A.; Oliveira, I. R.; Guillemot, J.; Laclau, J. -P.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y.; Abreu-Junior, C. H.; Trivelin, P. C. O.; Gonçalves, J. L. M.; Plassard, C. 2019. Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young *Eucalyptus grandis* trees. *Forest Ecology and Management*. 431:6-16.
7. Bossi, J. 1966. Geología del Uruguay. 2ª. ed. Montevideo, Universidad de la República. Departamento de Publicaciones. 464 p.
8. \_\_\_\_\_; Navarro, R. 1988. Geología del Uruguay Montevideo, Universidad de la República. Departamento de Publicaciones. t. 2, 996 p.

9. \_\_\_\_\_; Ferrando, L. A. 2001. Carta geológica del Uruguay. Montevideo, Uruguay, Geoeditores. Esc. 1:500.000. Color
10. Bouillet, J. -P.; Laclau, J. -P.; Arnaud, M.; Thongo M'Bou, A.; Saint-Andre', L.; Jourdan, C. 2002. Changes with age in the spatial distribution of roots of Eucalyptus clone in Congo Impact on water and nutrient uptake. *Forest Ecology and Management*. 171:16-57.
11. Burgess, S. S. O.; Adams, M. A.; Neil, C. T.; White, D. A.; Ong, C. K. 2000. Tree roots: conduits for deep recharge of soil water. *Oecologia*. 126:158-165.
12. Butler, A. J.; Barbier, N.; Čermák, J.; Koller, J.; Thornily, C.; McEvoy, C.; Nicoll, B.; Perks, M. P.; Grace, J.; Meir, P. 2010. Estimates and relationships between aboveground and belowground resource exchange surface areas in a Sitka spruce managed forest. *Tree Physiology*. 30:705-714.
13. Caldwell, M. M.; Dawson, T. E.; Richards, J. H. 1997. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*. 113:151-161.
14. Califra, A.; Durán, A. 2010. Suelos de aptitud forestal: criterios para su selección, área de distribución, características morfológicas, físicas y químicas. *In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 1-5.*
15. \_\_\_\_\_. 2012. Alternativa predictiva de la saturación en bases en suelos ácidos. Tesis de Maestría. Montevideo, Uruguay, Universidad de la Republica. Facultad de Agronomía. 93 p.
16. Canile, F. M.; Babinski, M.; Rocha-Campos, A. C. 2016. Evolution of the Carboniferous-Early Cretaceous units of Paraná Basin from provenance studies based on U-Pb, Hf and O isotopes from detrital zircons. *Gondwana Research*. 40:142- 169.
17. Capeci, S. 2013. Estudio hidrogeológico del Sistema Acuífero Carbonífero Pérmico uruguayo. Tesis Lic. en Geología. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de

Ciencias. 205 p.

18. Christina, M.; Laclau, J. -P.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y.; Bouillet, J. -P. 2011. Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the world's most productive forests. *Ecosphere*. 2(3):1-10.
19. \_\_\_\_\_; Nouvellon, Y.; Laclau, J. -P.; Stape, J. L.; Bouillet, J. -P.; Lambais, G. R.; le Maire, G. 2017. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*. 31:509-519.
20. Costa e Silva, F.; Shvaleyva, A.; Maroco, J. P.; Almeida, M. H.; Chaves, M. M.; Pereira, J. S. 2004. Responses to water stress in two *Eucalyptus globulus* clones differing in drought tolerance. *Tree Physiology*. 24:1165-1172.
21. Da-Rosa, A. A. S.; Dias da Silva, S.; Piñeiro, G.; Marsicano, C.; Schultz, C. L.; Horn, B. L. D. 2010. Comparação litofaciológica entre as formações Sanga do Cabral (Eotriássico, Bacia do Paraná, sul do Brasil) e Buena Vista (Permo-Triássico, Cuenca Norte, Uruguai). In: Simpósio Brasileiro de Paleontologia de Vertebrados (7<sup>o</sup>, 2010, Rio de Janeiro). *Paleontologia em destaque. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Paleontologia*. no.1:17.
22. de Santa Ana, H.; Goso, C.; Daners, G. 2006a. Cuenca Norte: estratigrafía del Carbonífero – Pérmico. In: Veroslavsky, G.; Ubilla, M.; Martínez, S. eds. *Cuencas sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales Paleozoico*. Montevideo, D.I.R.A.C. pp.147-208.
23. \_\_\_\_\_; Veroslavsky, G.; Fulfaro, V.; Rosello, E. 2006b. Cuenca Norte: evolución tectónica y sedimentaria del Carbonífero-Pérmico. In: Veroslavsky, G.; Ubilla, M.; Martínez, S. eds. *Cuencas sedimentarias del Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales*. Paleozoico. Montevideo, D.I.R.A.C. pp. 209-244.
24. Dias-da-Silva, E. V.; Bouillet, J. -P.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Hamilton Abreu, Cassio. J.; Ocheuze Trivelin, P. C.; Hinsinger, P.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y.; Stape, J. L.; Laclau, J. -P. 2011. Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional Ecology*. 25:996-1006.

25. Dias-da-Silva, S.; Pinheiro, F. L.; Da-Rosa, A. A. S.; Martinelli, A. G.; Schultz, C. L.; Silva-Neves, E.; Modesto, S. P. 2017. Biostratigraphic reappraisal of the Lower Triassic Sanga do Cabral Supersequence from South America, with a description of new material attributable to the parareptile genus Procolophon. *Journal of South American Earth Sciences*. 79:281-296.
26. Durán, A.; García Prechac, F. 2007. Capacidad de uso de la tierra. *In*: Suelos del Uruguay: origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 249-354.
27. Dye, P. J. 1996. Response of *Eucalyptus grandis* trees to soil water deficits. *Tree Physiology*. 16:233-238.
28. Elizalde, G.; Eugui, W.; Verdesio, J.; Stapff, M.; Telechea, J. 1970. Carta Geológica del Uruguay: segmento Aceguá Sector XXX. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Departamento de Publicaciones. Esc. 1:100.000. 126 p. Color.
29. Ernesto, M.; Nuñez Demarco, P.; Xavier, P.; Sanchez, L.; Schultz, C.; Piñeiro, G. 2019. Age constraints on the Paleozoic Yaguarí-Buena Vista succession from Uruguay: paleomagnetic and paleontologic information. *Journal of South American Earth Sciences*. 98:1-13.
30. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2009. Guía para la descripción de suelos. (en línea). Roma, Italia. 99 p. Consultado 13 nov. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/publications/card/en/c/0f070cdd-1b6d-53fa-add1-5c972fb299d2/>
31. Ferrando, M.; Zamalvide, J. P. 2010. Fertilización boratada de eucalyptus. *In*: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 55-59.
32. Goso, C.; Piñeiro, G.; de Santa Ana, H.; Rojas, A.; Verde, M.; Alves, C. 2001. Caracterización estratigráfica de los depósitos continentales cuspidales Neopérmicos (Formaciones Yaguarí y Buena Vista) en el borde oriental de la Cuenca Norte uruguaya. *In*: Congreso Latinoamericano de Geología (21º.), Congreso Uruguayo de Geología (3º., 2001, Montevideo). Actas. Montevideo, UNESCO. 1



disco compacto.

33. Goya, J. F.; Frangi, J. L.; Dalla Tea, F.; Marco, M. A.; Larocca, F. 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en la provincia de Entre Ríos. (en línea). In: Jornadas Forestales de Entre Ríos (12<sup>as</sup>, 1997, Concordia, Entre Ríos). Trabajos presentados. s.n.t. pp. 1-19. Consultado 31 ene. 2020. Disponible en <https://docplayer.es/35145990-lit-biomasa-productividad-y-contenido-de-nutrientes-en-plantaciones-de-eucalyptus-grandis-en-el-ne-de-la-provincia-de-entre-rios.html>
34. Grant, J. C.; Doland Nichols, J.; Ling Yao, R.; Smith, R. G. B.; Brennan, P. D.; Vanclay, J. K. 2012. Depth distribution of roots of *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia citriodora subsp. variegata* in different soil conditions. *Forest Ecology and Management*. 269:249-258.
35. Grove, T. S.; Thomson, B. D.; Malajczuk, N. 1996. Nutritional physiology of eucalypts: uptake, distribution and utilization. In: Attiwill, P. M.; Adams, M. A. eds. Nutrition of Eucalypts. Melbourne, CSIRO. pp. 77-108.
36. Gulbranson, E. L.; Ciccioli, P. L.; Montañez, I. P.; Marensi, S. A.; Limarino, C. O.; Schmitz, M. D.; Davydov, V. 2015. Paleoenvironments and age of the Talampaya Formation: the Permo-Triassic boundary in Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*. 63:310-322.
37. Hamer, J. J.; Veneklaas, E. J.; Renton, M.; Poot, P. 2016. Links between soil texture and root architecture of *Eucalyptus* species may limit distribution ranges under future climates. *Plant Soil*. 403:217-229.
38. Hasenmueller, E. A.; Gu, X.; Weitzman, J. N.; Adams, T. S.; Stinchcomb, G. E.; Eissenstat, D. M.; Drohan, P. J.; Brantley, S. L.; Kaye, J. P. 2017. Weathering of rock to regolith: the activity of deep roots in bedrock fractures. *Geoderma*. 300:11-31.
39. Hernández, J. 2010. Evolución de parámetros químicos de suelos bajo forestación: acidez, bases, materia orgánica. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 16-19.

40. Herrero, C.; Juez, L.; Tejedor, C.; Pando, V.; Bravo, F. 2014. Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in Northern Spain. *Biomass and bioenergy*. 67:212-222.
41. Holz, M.; Kühle, J.; Philipp, R. P.; Bischoff, A. P.; Arima, N. 2006. Hierarchy of tectonic control on stratigraphic signatures: base-level changes during the Early Permian in the Paraná Basin, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 22:185-204.
42. \_\_\_\_\_.; França, A.; Souza, P.; Iannuzzi, R.; Rohn, R. 2010. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/ Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*. 29(2):381-399.
43. IMPO (Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales, UY). 2005. Reglamento de evaluación de impacto ambiental y autorizaciones ambientales. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado jul. 2020. Disponible en <http://www.impo.com.uy/bases/decretos/349-2005/1>
44. \_\_\_\_\_. 2017. Resolución MVOTMA s/n. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado jul. 2020. Disponible en <https://www.impo.com.uy/bases/resoluciones-mvotma/SN20170202001-2017>
45. Laclau, J. -P.; Arnaud, M.; Bouillet, J. -P.; Jaques, R. 2001. Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. *Tree Physiology*. 21:129-136.
46. \_\_\_\_\_.; Jaques, R.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Maquere, V.; Krusche, A. V.; M'Bou, A. T.; Nouvellon, Y.; Saint-André, L.; Bouillet, J. -P.; de Cássia Piccolo, M.; Deleporte, P. 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*. 259:1771-1785.
47. \_\_\_\_\_.; da Silva, E. A.; Lambais, G. R.; Bernoux, M., le Maire, G.; Stape, J. L.; Bouillet, J. -P.; de Moraes Gonçalves, J. L.; Jourdan, C.; Nouvellon, Y. 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. *Frontiers in Plant Science*. 4:1-12.

48. Lambais, G. R.; Jourdan, C.; de Cássia Piccolo, M.; Germon, A.; Costa Pinheiro, R.; Nouvellon, Y.; Stape, J. L.; Camargo Campoe, O.; Robin, A.; Bouillet, J.-P.; le Maire, G.; Laclau, J. -P. 2017. Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. *Plant and Soil*. 421:301-318.
49. Lavina, E. 1991. Geología sedimentar e paleogeografía do Neopermiano e Eotriassico (intervalo Kazaniano – Scythiano) da Bacia do Paraná. Tesis de Doctorado en Geociencias. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 333 p.
50. Limarino, C.; Césari, S.; Spalletti, L.; Taboada, A.; Isbell, J.; Geuna, S.; Gulbranson, E. 2014. A paleoclimatic review of southern South America during the late Paleozoic: a record from icehouse to extreme greenhouse conditions. *Gondwana Research*. 25(4):1396-1421.
51. McCormack, M. L.; Dickie, I. A.; Eissenstat, D. M.; Fahey T. J.; Fernandez, C. W.; Guo, D.; Helmisaari, H. -S.; Hobbie, E. A.; Iversen, C. M.; Jackson, R. B.; Leppälampi-Kujansuu, J.; Norby, R. J.; Phillips, P.; Pregitzer, K. S.; Pritchard, S. G.; Rewald, B.; Zadworny, M. 2015. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*. 207:505-518.
52. McCulley, R. L.; Jobbágy, E. G.; Pockman, W. T.; Jackson, R. B. 2004. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. *Ecosystem Ecology*. 141:620-628.
53. McKay, L. D.; Driese, S. G.; Smith, K. H.; Vepraskas, M. J. 2005. Hydrogeology and pedology of saprolite formed from sedimentary rock, Eastern Tennessee, USA. *Geoderma*. 126:27-45.
54. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. (en línea). Montevideo, Uruguay. s.p. Consultado oct. 2020. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/carta-reconocimiento-suelos-del-uruguay-escala-11000000>

55. Marsden, C.; Nouvellon, Y.; Laclau, J. -P.; Corbeels, M.; McMurtrie, R. E.; Stape, J. L.; Epron, D.; le Maire, G. 2013. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils. *Forest Ecology and Management*. 301:112-128.
56. MGAP. DGRN (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales, UY). 2010. Carta de suelos de prioridad forestal. Montevideo, Uruguay, s.e. Esc. 1:1.000.000. Color
57. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2014. Manual de descripción, muestreo de suelos y análisis de laboratorio. (en línea). Montevideo, Uruguay. pp. 1-102. Consultado oct. 2020. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/manual-descripcion-muestreo-suelos-analisis-laboratorio>
58. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2020. CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado octubre 2020. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat>
59. \_\_\_\_\_. OPYPA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, UY). 2016. Los suelos de prioridad forestal y su productividad. (en línea). Anuario OPYPA: 527-532. Consultado ene. 2020. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/estadisticas-y-documentos/30-01-8>
60. Miall, A. 1977. A review of braided river depositional environment. *Earth Science Reviews*. 13:1-62.
61. \_\_\_\_\_. 2006. *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology*. 4<sup>th</sup>. ed. London, Springer. 581 p.
62. \_\_\_\_\_. 2014. *Fluvial depositional systems*. s.l., Springer. 295 p.
63. \_\_\_\_\_. 2016. *Stratigraphy : a modern synthesis*. s.l., Springer. 454 p.

64. Milani, E. J.; Ramos, V. A. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*. 28(4):473-484.
65. Montaña, J.; Collazo, P.; Peel, E.; Da Rosa, E. 2004. Características hidrogeológicas del acuífero transfronterizo Guaraní. In: Congreso Brasileiro de Águas Subterrâneas (13º., 2004, Cuibá, Mato Grosso). Trabalhos apresentados. Cuibá, s.e. s.p.
66. MVOTMA (Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, UY). 2016. Guía pautas para la gestión ambiental forestal. (en línea). Montevideo. 36 p. Consultado jul. 2020. Disponible en <https://www.gub.uy/ministerio-vivienda-ordenamiento-territorial-medio-ambiente/comunicacion/publicaciones/guia-pautas-para-gestion-ambiental-forestal>
67. Pawlik, L.; Phillips, J. D.; Šamonil, P. 2016. Roots, rock, and regolith: Biomechanical and biochemical weathering by trees and its impact on hillslopes: a critical literature review. *Earth-Science Reviews*. 159:142-159.
68. \_\_\_\_\_; Kasprzak, M. 2018. Regolith properties under trees and the biomechanical effects caused by tree root systems as recognized by electrical resistivity tomography (ERT). *Geomorphology*. 300:1-12.
69. Pedron, F. A.; Azevedo, C. A.; Simão, R.; Dalmolin, R. S. D.; Stürmer, S. L. K.; Menezes, F. P. 2009. Morfologia e classificação taxonômica de neossolos e saprolitos derivados de rochas vulcânicas da formação serra geral no rio grande no sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 33:119-128.
70. \_\_\_\_\_; Fink, J. R.; Dalmolin, R. S. D.; Azevedo, C. A. 2010. Morfologia dos contatos entre solo-saprolitorocha em neossolos derivados de arenitos da formação caturrita no rio grande do sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34:1941-1950.
71. Perdomo, C. H.; Crucci, M. 2010. Respuesta de plantaciones de eucaliptos a la fertilización nitrogenada. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad

de la República. Facultad de Agronomía. pp. 48-54.

72. Pérez Bidegain, M.; Martínez, L.; García Préchac, F. 2010a. Dinámica de algunas propiedades físicas del suelo y del contenido de agua en el suelo bajo forestación. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 6-10.
73. \_\_\_\_\_; Delgado, S.; García Préchac, F. 2010b. Tecnologías de laboreo y uso de herbicidas en plantaciones, y su efecto en la erosión de suelos. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 35-37.
74. Pinheiro, R. C.; de Deus, J. C. JR.; Nouvellon, Y.; Campoe, O. C.; Stape, J. L.; Aló, L. L.; Guerrini, i. A.; Jourdan, C.; Laclau, J. -P. 2016. A fast exploration of very deep soil layers by Eucalyptus seedlings and clones in Brazil. *Forest Ecology and Management*. 366:143-152.
75. Pinto, M. L.; Vidotti, R. M. 2019. Tectonic framework of the Paraná basin unveiled from gravity and magnetic data. *Journal of South American Earth Sciences*. 90:216-232.
76. Piñeiro, G.; Marsicano, C.; Goso, C.; Morosi, E. 2007. Temnospondyl diversity of the Permian-Triassic Colonia Orozco local fauna (Buena Vista Formation) of Uruguay. *Revista Brasileira de Paleontologia*. 10(3):169-180.
77. \_\_\_\_\_; Ferigilom J.; Ribeiro, A. J.; Velozo, P. 2015. Reassessing the affinities of vertebral remains from Permo-Triassic beds of Gondwana. *Comptes Rendus Palevol*. 14:387-401.
78. Rocha-Campos, A. C.; Basei, M. A. S.; Nutman, A. P.; Santos, P. R.; Passarelli, C. R.; Canile, F. M.; Rosa, O. C. R.; Fernandes, M. T.; Santa Ana, H.; Veroslavsky, G. 2019. U-Pb Zircon Dating of Ash Fall Deposits from the Paleozoic Paraná Basin of Brazil and Uruguay: a Reevaluation of the Stratigraphic Correlations. *The*



Journal of Geology. 127:167-182.

79. Rose, K. L.; Graham, R. C.; Parker, D. R. 2003. Water source utilization by *Pinus jeffreyi* and *Arctostaphylos patula* on thin soils over bedrock. *Oecologia*. 134:46-65.
80. Santana, R. C.; de Barros, N. F.; Novais, R. F.; Leite, H. G.; Comerford, N. B. 2008. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32:2723-2733.
81. Shanmugam, G. 2016. The siesmite problem. *Journal of Palaeogeography*. 5(4):318:362.
82. Sinnett, D.; Morgan, G.; Williams, M.; Hutchings, T. R. 2008. Soil penetration resistance and tree root development. *Soil Use and Management*. 24(3):273-280.
83. Tucker, M. E. 2003. *Sedimentary rocks in the field: a practical guide*. 4<sup>th</sup> ed. Chichester, Wiley. 229 p.
84. Ualde, J. P. 2015. Extracción de nutrientes por plantaciones comerciales de diferentes edades de *Eucalyptus globulus* Labill en suelos de la zona Este de Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 72 p.
85. Van Breemen, N.; Finlay, R.; Lundström, U.; Jongmans, A. G.; Giesler, R.; Olsson, M. 2000. Mycorrhizal weathering: A true case of mineral plant nutrition?. *Biogeochemistry*. 49:53-67.
86. Warren, L. V.; de Almeida, R. P.; Hachiro, J.; Machado, R.; Roldan, L. F.; dos Santos Steiner, S.; Carrari Chamani, M. A. 2008. Evolução sedimentar da Formação Rio do Rasto (Permo-Triássico da Bacia do Paraná) na porção centro sul do estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 38(2):1-15.
87. Witty, J. H.; Graham, R. C.; Hubbert, K. R.; Doolittle, J. A.; Wald, J. A. 2003 Contributions of water supply from the weathered bedrock zone to forest soil quality. *Geoderma*. 114:389-400.
88. Zamalvide, J. P.; Ferrando, M. 2010a. Algunas consideraciones generales en relacion al tema "fertilización de eucaliptos". In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y

preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 38-42.

89. \_\_\_\_\_; Ferrando, M. 2010b. Respuesta a la fertilización fosfatada en la plantación de eucaliptos. In: Jornadas de Actualización Técnica (2010, Montevideo, Uruguay). 10 años de investigación en producción forestal. productividad y preservación de los recursos suelo y agua. Montevideo, Uruguay, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 43-47.
90. Zerfass, H.; Chemale Jr. F.; Schultz, C. L.; Lavina, E. 2004. Tectonics and sedimentation in Southern South America during Triassic. *Sedimentary Geology*. 166:265-292

## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Ubicación de todos los puntos de campo relevados para geología

Punto	Coordenadas (UTM)		Punto	Coordenadas (UTM)		Punto	Coordenadas (UTM)	
	X	Y		X	Y		X	Y
PMZ-26	749877	6431978	PFY-115	743257	6432722	PFY-136	749859	6431792
PMZ-27	749880	6431973	PFY-116	743224	6432816	PFY-137	749769	6432023
PMZ-28	749620	6432307	PFY-117	743292	6432870	PFY-138	749766	6432046
PMZ-35	742305	6432338	PFY-118	743491	6432988	PFY-139	749743	6432051
PMZ-36	741883	6433018	PFY-119	743900	6431008	PFY-140	749822	6432007
PFY-153	743196	6431274	PFY-120	744084	6431146	PFY-141	749733	6432105
PFY-333	743727	6429607	PFY-121	744178	6431194	PFY-142	749605	6432312
PFY-104	747712	6432166	PFY-122	744206	6431228	PFY-145	741466	6432330
PFY-105	747967	6432180	PFY-124	746911	6431331	PFY-152	743004	6432791
PFY-106	748386	6432324	PFY-126	746860	6431125	PFY-150.1	743480	6431876
PFY-107	749268	6432470	PFY-128	746640	6431967	PFY-150.2	743490	6431859
PFY-108	749245	6430602	PFY-130	749551	6432130	PFY-150.3	743484	6431994
PFY-109	748287	6431119	PFY-131	749476	6431958	PFY-153	743080	6432822
PFY-110	750075	6429968	PFY-132	749608	6431882	PFY-154	743312	6432901
PFY-111	749915	6429977	PFY-133	750035	6431845	PFY-155	743429	6432969
PFY-112	743343	6431646	PFY-134	749935	6431819	PFY-156	743775	6433000
PFY-114	743243	6432638	PFY-135	749106	6431811	PFY-162	743195	6431265
						TOTAL	51	

### Anexo 2. Resultados completos de los análisis físico-químicos de perfiles

#### Resultados de análisis físicos y químicos del perfil SSR calicata PFYC-01

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	DAP	RP
		%				g.cm- 3	KPa
Ap	0-10	73,0	13,0	14,0	Franco arenoso	1,23	879
AB	10-25	73,7	10,2	16,1	Franco arenoso	1,28	723
Bt1	25-50	61,5	14,8	23,7	Franco arcillo arenoso	1,44	1104
Bt2	50-100	58,4	19,1	22,5	Franco arcillo arenoso	1,59	1666
C	100-140	64,7	12,4	22,9	Franco arcillo arenoso	1,69	1636
CrR	140-200	72,3	11,8	15,9	Franco arenoso	1,63	1434

pH	Cor g.	Morg.	P	Al	Ca	Mg	K	Na	BT	CICe	ClC pH 7	SB pH 7	CIC pH8, 2	SB pH8, 2
	%		ppm	meq/100 grs suelo					%					
4,4	0,9	1,5	2,9	0,9	2,6	0,8	0,2	0,1	3,7	4,6	7,9	47,0	29,7	35,7
4,8	0,6	1,0	2,3	1,5	2,6	0,7	0,2	0,1	3,6	5,1	8,5	42,3	31,1	32,3
5,1	0,8	1,3	2,9	0,8	6,4	0,7	0,3	0,1	7,5	8,3	12,4	60,7	37,4	45,6
5,6	0,6	1,0	2,3	-	11,8	1,1	0,4	0,2	13,5	13,5	18,5	72,7	43,8	54,2
7,7	0,4	0,7	1,7	-	14,6	1,1	0,4	0,2	16,2	16,2	21,8	74,3	46,2	55,3
7,9	0,2	0,4	1,2	-	13,8	1,2	0,3	0,2	15,5	15,5	21,0	73,9	45,6	55,1

Resultados de análisis físicos y químicos del perfil SSR calcata PFYC-02

Horizonte/ Capa	Prof. (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	DAP	RP
		%				g.cm-3	KPa
Ap	0-15	67,4	16,8	15,8	Franco arenoso	1,32	740
1A	15-30	-	-	-	Cantos rodados	-	-
Bt	30-62	42,7	14,6	42,7	Arcilloso	1,45	1009
C	62-85	49,9	15,3	34,8	Franco arcillo arenoso	1,48	2216
CrR	85-120	57,3	15,3	27,4	Franco arcillo arenoso	1,67	2290
Rr	120-140*	37,2	27,6	35,2	Franco arcilloso	1,32	3171
	140-150**	59,6	16,6	23,8	Franco arcillo arenoso	1,45	-
	150-170*	40,3	26,0	33,7	Franco arcilloso	1,57	-

H	C org	M org	P	Al	Ca	Mg	K	Na	BT	CIC e	Cl C pH 7	SB pH 7	CIC pH8, 2	SB pH8, 2
	%		ppm	meq/100 grs suelo						%				
4,8	1,2	2,0	4,1	0,9	1,4	0,5	0,2	0,1	2,2	3,1	6,1	36,6	24,6	28,1
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,8	0,6	1,0	2,3	2,3	5,4	2,7	0,4	0,2	8,6	10,9	15,4	55,9	41,0	42,2
5,1	0,3	0,5	2,3	1,2	5,0	2,6	0,3	0,2	8,1	9,3	13,5	59,7	38,9	44,9
5,4	0,2	0,3	2,3	-	3,7	1,9	0,2	0,2	6,0	6,0	9,5	62,6	33,2	47,0
6,5	0,3	0,4	2,3	-	8,4	2,1	0,3	0,2	11,0	11,0	15,5	70,6	41,1	52,7
5,6	0,4	0,6	2,3	-	3,5	1,7	0,2	0,3	5,8	5,8	9,3	62,1	32,7	46,6
5,8	0,3	0,5	1,7	-	7,5	3,4	0,4	0,4	11,6	11,6	16,3	71,2	41,8	53,1

Resultados de análisis físicos y químicos del perfil SSR calcata PFYC-03

Horizonte/ Capa	Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	DAP	RP
		%				g.cm-3	KPa
Ap	0-15	57,4	16,0	26,6	Franco arcillo arenoso	1,09	1075
AB	15-30	50,4	18,8	30,8	Franco arcillo arenoso	1,29	1003
Bt1	30-45	26,3	10,3	63,4	Arcilloso	1,19	807
Bt2	45-90	19,2	23,6	57,2	Arcilloso	1,20	805
C	90-100	24,6	28,8	46,6	Arcilloso	1,35	2419
Cr	100-115	15,6	49,1	35,3	Franco arcillo limoso	1,38	2424
CrR y R	115-160	30,3	38,5	31,2	Franco arcilloso	-	5000

pH	C org.	M org.	P	Al	Ca	Mg	K	Na	BT	CICe	CIC pH7	SB pH7
	%		ppm	meq/100 grs suelo						%		
5,6	2,4	4,1	9,5	-	8,6	2,2	0,6	0,1	11,6	11,6	16,2	71,2
5,2	2,1	3,7	5,3	-	9,6	2,0	0,5	0,2	12,2	12,2	17,0	71,7
5,4	2,0	3,4	5,3	-	21,5	4,2	0,8	0,5	27,0	27,0	34,8	77,7
5,3	0,7	1,2	5,3	-	24,2	4,7	0,9	0,6	30,4	30,4	38,9	78,3
5,5	0,6	1,1	4,1	-	37,1	7,5	0,9	0,8	46,3	46,3	57,9	79,9
6,8	0,4	0,7	11,8	-	27,6	5,0	1,0	0,7	34,2	34,2	43,4	78,8
6,8	0,3	0,5	7,1	-	26,0	4,1	1,0	0,6	31,7	31,7	40,4	78,4

### Anexo 3. Ubicación de todos los puntos de campo relevados para suelos

PUNTO	COORD X (UTM)	COORD Y (UTM)	PUNTO	COORD X (UTM)	COORD Y (UTM)
PFYS-01	743928	6432368	PFYS-16	750332	6430646
PFYS-02	743907	6432396	PFYS-17	750317	6430558
PFYS-03	744430	6432380	PFYS-18	749257	6430738
PFYS-04	743762	6430587	PFYS-19	749613	6431297
PFYS-05	743741	6430733	PFYS-109	748287	6431119
PFYS-07	745345	6431191	PFYS-110	750075	6429968
PFYS-10	743839	6431165	PFYS-133	750035	6431845
PFYS-11	743143	6432396	PFYS-135	749906	6431811
PFYS-12	748978	6432150	PFYS-150.1	743480	6431876
PFYS-13	748923	6431789	PFYS-150.2	743490	6431859
PFYS-14	748761	6431566	PFYS-150.3	743484	6431949
PFYS-15	748647	6431614			