



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



PEDECIBA
Geociencias

Facultad de Ciencias, Universidad de la República

PEDECIBA Geociencias

Tesis de Maestría

**ESTUDIO INTEGRAL DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ EN LA CIUDAD DE
ARTIGAS Y SU MICRORREGIÓN, DEPARTAMENTO DE ARTIGAS – URUGUAY**

Autor: LUCÍA BETHANIA SAMANIEGO BISIO

Orientador: Dr. Gerardo Veroslavsky - Profesor Adjunto de Geología, Instituto de Ciencias
Geológicas, Facultad de Ciencias (UdelaR)

Coorientador: Dr. Roberto Kirchheim - Jefe de la Asesoría de Asuntos Internacionales del
Servicio Geológico de Brasil (CPRM)

Montevideo, Uruguay

2024

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi tutor, el Dr. Gerardo Veroslavsky, por su guía durante todo este trabajo, el conocimiento que me brindó y por su incansable capacidad de trabajo que me dio las fuerzas necesarias para que esta tesis se concrete.

Mi agradecimiento a mi co-tutor, el Dr. Roberto Kirchheim, por su disposición y dedicación para la revisión y aportes que colaboraron a enriquecer el texto del presente trabajo.

Agradezco especialmente al Lic. Alberto Manganelli, quien siempre me brindó toda la información y conocimiento que necesité, realizando aportes significativos al trabajo tanto de campo, como de gabinete.

Quiero reconocer y agradecer el apoyo de PEDECIBA y sus investigadores, por la educación que me brindaron durante el transcurso de la Maestría en Geociencias y por el apoyo para las salidas de campo e insumos que necesite durante la tesis.

También quiero agradecer al personal de OSE, tanto de la oficina de Aguas Subterráneas en Montevideo, como a la oficina regional de Artigas, por el importante apoyo que me dieron, brindándome la posibilidad de acceder a los datos de las perforaciones y muestrear sus pozos.

Con respecto al acceso a los datos de las perforaciones, mi agradecimiento a ANCAP, DINAMIGE, DINAGUA y a la Empresa Silva Perforaciones.

A todos los productores, las maestras y directoras de las escuelas rurales y profesores de la Escuela Agraria de Artigas que me permitieron ingresar a medir o muestrear sus pozos, también les estoy muy agradecida por su amabilidad y disposición.

Agradezco también a otros profesionales que han aportado su trabajo y punto de vista para esta investigación: Dra. Natalie Aubet, Dr. Eduardo Rossello, Dra. Ethel Morales, Dr. Lucas Vituri, Lic. Lautaro Pochintesta, Lic. Nahuel Lamas, Lic. Silvana Martínez y Dra. Marta Paris.

La realización de este trabajo fue posible gracias al apoyo de una beca de posgrado de ANII, en el marco del Proyecto María Viñas "Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay".

Por último, pero no menos importante, agradezco a mi familia y amigos que siempre me han ayudado cuando lo necesite y han estado apoyándome continuamente. A Guille y a Ceci un reconocimiento especial.

Este trabajo está dedicado a mis abuelos: mi inspiración y fuerza para seguir.

Tabla de contenidos

Resumen	9
1.Introducción	10
2.Objetivos.....	11
2.1. Objetivo general	11
2.2. Objetivos específicos.....	11
3.Características generales del área de estudio	12
3.1. Delimitación de la zona de estudio	12
3.2. Descripción del medio físico	13
3.2.1. Clima	13
3.2.2. Relieve	15
3.2.3. Suelos	17
3.3. Aspectos socio-económicos: actividades, servicios e infraestructura básica.	19
3.3.1. Población.....	19
3.3.2. Actividades económicas y recursos naturales.....	20
3.3.3. Infraestructura y servicios.....	22
3.3.4. Gestión de residuos sólidos y efluentes	24
3.3.5. Abastecimiento público de agua y saneamiento	25
4.Antecedentes.....	27
4.1. Geología.....	27
4.2. Hidrogeología e hidrogeoquímica.....	29
4.3. Vulnerabilidad y peligro de contaminación	31
4.4. Gestión de los recursos hídricos	34
5.Metodología	35
5.1. Etapas I: recopilación y análisis de información	35
5.2. Etapas I: caracterización del medio físico	36
5.3. Etapas II: análisis de suelos y uso del territorio.....	38
5.4. Etapas II y III: relevamiento geológico y confección del mapa geológico	38
5.5. Etapas II y III: estudio hidrogeológico y realización del mapa hidrogeológico	39
5.6. Etapas II y III: caracterización química del agua subterránea y superficial	41
5.7. Etapas II y III: estudio de la vulnerabilidad y protección del acuífero	44
5.8. Etapas II y III: estudio del peligro de contaminación e índice de susceptibilidad.....	51
6.Resultados.....	54
6.1. Geología.....	54
6.2. Hidrogeología	67
6.2.1. Mapa hidrogeológico	67

6.2.2.	Unidades hidrogeológicas	67
6.2.3.	Estimación del flujo del agua subterránea.....	75
6.2.4.	Estimación de volúmenes extraídos.....	76
6.2.5.	Hidrogeoquímica	81
6.3.	Vulnerabilidad.....	86
6.4.	Peligro de contaminación e índice de susceptibilidad	88
7.	Discusión	90
7.1.	Geología.....	91
7.2.	Hidrogeología y demanda de recursos hídricos subterráneos.....	93
7.3.	Hidrogeoquímica	94
7.4.	Vulnerabilidad e índice de susceptibilidad	95
8.	Recomendaciones	98
9.	Conclusiones	99
	Bibliografía.....	101

Índice de figuras

Figura 1: delimitación de la zona de estudio (modificada del Plan local de la ciudad de Artigas y su microrregión, 2014).	12
Figura 2: promedios mensuales para el período 1991-2020 de temperaturas media, media mínima y máxima media.	14
Figura 3: promedios mensuales para el período 1991-2020 del promedio de precipitaciones acumuladas.	14
Figura 4: cotas topográficas e hidrografía principal de la zona de trabajo a partir del MDT a escala 1:10.000 (Fuente: Catálogo de Datos Abiertos https://www.catalogodatos.gub.uy/ . Infraestructura de Datos Espaciales -IDEuy-: http://ide.uy/).	15
Figura 5: zonas planas al frente, al fondo de la fotografía se observan las zonas altas vinculadas al cambio de unidad geológica (colinas de basalto).	16
Figura 6: río Cuareim al Norte de la ciudad de Artigas, por debajo del Puente Internacional de la Concordia. Se observan rocas basálticas aflorantes.	16
Figura 7: mapa de suelos para la zona de estudio basado en la carta de suelos de la Cuenca del río Cuareim a escala 1:100.000 (Modificado de Molfino et al., 2002).	17
Figura 8: imágenes satelitales donde se observa la expansión urbana de la ciudad entre 1985 y 2022 (Imágenes extraídas de <i>Google Earth</i>).	20
Figura 9: ejemplos de actividades económicas en la zona de estudio. A: plantaciones de tabaco en la zona de Guayubira. B: productores preparando las hojas del tabaco para su secado (nota El Observador, 2016a). C: planta de ALUR actualmente abandonada. D: taller de preparación de amatistas.	22
Figura 10: actividades recreativas en el área de estudio. A: Piedra Pintada (Foto: N. Aubet). B: piscinas dentro del Complejo Turístico Piedra Pintada. C: foto panorámica del Cerro de la Estiva (en el borde derecho de la foto se observa la capilla de la Virgen de los Treinta y Tres).	23
Figura 11: ubicación de los vertederos operativos y no operativos en la zona de estudio (modificado del visualizador de DINACEA).	24
Figura 12: entrada al vertedero operativo ubicado al Suroeste de la zona de trabajo (Foto: N. Aubet).	25
Figura 13: plantas de tratamiento y potabilización administradas por OSE.	26
Figura 14: red de saneamiento en la ciudad de Artigas y alrededores (SIG OSE, 2023).	26
Figura 15: geología del área de estudio y su contexto regional, modificado y simplificado del Mapa Geológico y de Recursos Minerales de América del Sur, Hoja SH21(Comisión para el Mapa Geológico del Mundo, 2009).	27
Figura 16: a: mapa hidrogeológico regional (parcial) que comprende el área de estudio y la región adyacente incluyendo el sector brasileño de Río Grande do Sul, b: piezometría y dirección de flujo del agua subterránea en el área (CPRM – DINAGUA, 2015).	30
Figura 17: mapa de vulnerabilidad natural de los acuíferos en las ciudades de Artigas y Quaraí a partir de los datos de 55 perforaciones distribuidas en la ciudad de Artigas y en el Sur de la misma (Silverio da Silva et al., 2006).	32
Figura 18: zona de areniscas arada en la zona de Guayubira.	33
Figura 19: flujograma con la metodología utilizada en este trabajo.	35
Figura 20: Ubicación de los pozos que conforman la base de datos de este trabajo.	37
Figura 21: mapa de ubicación de los puntos de control relevados durante las salidas de campo.	39
Figura 22: diagrama de clasificación de las unidades y los colores de representación correspondientes (modificado de Struckmeier y Margat, 1995).	40
Figura 23: representación en el mapa hidrogeológico de los pozos.	41
Figura 24: mapa de ubicación de los puntos de muestreo de agua superficial y subterránea en este trabajo. Las coordenadas UTM corresponden a la zona S21.	43

Figura 25: A: muestreo de un pozo en la zona de Pintadito. B: muestreo del arroyo Pintadito al Sur de la ciudad de Artigas.....	43
Figura 26: mapa geológico de la zona de estudio elaborado durante este trabajo. Anexo B.....	54
Figura 27: Formación Rivera aflorante en la zona de Guayubira. A: cantera para extracción de arena (X: 556122, Y: 6625531). Se observa en el perfil dos sets de areniscas media a finas con estratificación cruzada típica de la unidad. B: areniscas laminadas pertenecientes a la Formación Rivera. C: gradación inversa de los clastos intralámina, típica estructura sedimentaria asociada a los procesos de depositación eólica.....	56
Figura 28: contacto entre el basalto de la Formación Arapey y las areniscas de la Formación Rivera en una cantera en la zona de Guayubira (X:555953, Y:6625595). Las areniscas próximas al contacto están fuertemente silicificadas y, parcialmente, enmascaran la estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte que muestra la unidad en toda el área.	57
Figura 29: perfiles litológicos de algunas de las perforaciones que exhiben el contacto entre la Formación Rivera y la Formación Tacuarembó. Se indica la distancia (en línea recta) que separa a los pozos. El espesor máximo de la Formación Rivera no supera los 40 m en el área de trabajo.	58
Figura 30: A: muestra de arena correspondiente a la Formación Tacuarembó en el pozo Artigas de ANCAP extraída a los 170 m. B: muestra de la Formación Tacuarembó correspondiente al pozo 410 realizado por el Instituto Geológico del Uruguay (ahora DINAMIGE) extraída a los 60,5 m.	59
Figura 31: areniscas medias a finas, rojizas, cuarzo – feldespáticas correspondientes a la Formación Buena Vista presentes en el pozo Artigas de ANCAP a una profundidad de 240 m.....	59
Figura 32: Formación Arapey en la zona de estudio. A: afloramiento de basalto masivo. B: afloramiento de basalto lajoso. C: afloramiento de basalto brechoide sobre la ruta N° 30. D: filón de arenisca silicificada en el basalto sobre ruta N° 30.	60
Figura 33: afloramientos de intertrapps pertenecientes a la Formación Arapey. A: afloramiento de arenisca <i>intertrapp</i> silicificada (coordenadas: X: 531068, Y: 6627429). B: areniscas finas blanquecinas fuertemente afectadas por la silicificación, exhibiendo estratificación. C: areniscas medias a finas, marrones a rojizos, friables.	62
Figura 34: perfiles litológicos de algunas perforaciones en las que se describieron areniscas <i>intertrapps</i> . El espesor máximo de estas areniscas <i>intertrapps</i> en perforaciones es de casi 50 m en la zona de Colonia Rivera.	63
Figura 35: erosión sobre el margen izquierdo del arroyo Chiflero exhibiendo los depósitos cuaternarios, arenas, grauvacas y fangos de tonalidades marrones que corresponden a la Formación Sopas.....	64
Figura 36: A: imagen satelital correspondiente al año 2019, donde se observa la extensión de la ventana a un lado y otro del río Cuareim. En rojo se señalan algunos de los arenales que se encuentran en territorio brasileiro. B: arenales formados en las ventanas del SAG en territorio brasileiro.....	65
Figura 37: corte geológico y principales aspectos estructurales esquemáticos del área de estudio.	66
Figura 38: mapa hidrogeológico de la zona de estudio realizado durante esta tesis. Anexo C.....	67
Figura 39: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de profundidad y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua del Acuífero Arapey.	69
Figura 40: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de caudal versus el número de pozos que captan agua de la Formación Arapey.....	69
Figura 41: relación entre el caudal y la profundidad de las perforaciones que captan agua de la Formación Arapey.....	70
Figura 42: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de profundidad y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua del SAG.....	71
Figura 43: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de caudal y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua del SAG.....	72

Figura 44: relación entre el caudal y la profundidad de las perforaciones que captan agua del SAG.	72
Figura 45: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de profundidad y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua de varias unidades.	73
Figura 46: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de caudal y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua de varias unidades.	74
Figura 47: relación entre el caudal y la profundidad de las perforaciones mixtas.	74
Figura 48: zoom a las isopiezas en la zona del SAG aflorante (ventana) y a la estimación de dirección del flujo desarrolladas durante este trabajo.	75
Figura 49: mapa de ubicación de las perforaciones registradas en el área de estudio indicadas con marcadores azules. Fuente: visualizador DINAGUA (15/01/2023).	77
Figura 50: grafico que ilustra los diferentes usos del agua subterránea de los pozos registrados en la zona de estudio.	77
Figura 51: mapa de ubicación de los pozos administrados por OSE dentro de la zona de trabajo.	80
Figura 52: diagrama Piper utilizado para clasificar las aguas subterráneas muestreadas y analizadas en este trabajo. Los símbolos utilizados corresponden al origen litológico de las muestras, tal como se observa en la leyenda de la derecha.	83
Figura 53: mapa de distribución de los pozos muestreados y el diagrama Stiff correspondiente a cada una de las muestras. Los colores de los diagramas son según el origen del agua: azul – SAG, verde – Arapey, fucsia- Arapey (<i>intertrapp</i>), amarillo – Arapey+SAG+PreSAG y rojo – Arapey+SAG. Anexo D.	85
Figura 54: mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio según GOD realizado en este trabajo. Anexo E.	86
Figura 55: mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio según DRASTIC confeccionado durante este trabajo. Anexo F.	87
Figura 56: cobertura del suelo en la ciudad de Artigas y su microrregión extraído de MapBiomias Pampa. Anexo G.	89
Figura 57: mapa realizado para este trabajo donde se observa el Índice de Susceptibilidad en la zona y las potenciales fuentes contaminantes. Anexo H.	90
Figura 58: mapa geológico de la zona Artigas – Quaraí (Silverio da Silva et al., 2006).	92
Figura 59: carta geológica de la ciudad de Artigas a escala 1:50.000 (Gagliardi, 2008).	93
Figura 60: piezometría de la zona de Artigas – Quaraí (Ramos et al., 2014).	94
Figura 61: diagrama Piper donde se colocaron los valores químicos antecedentes y los obtenidos en este trabajo. La terminología AP significa que son análisis de pozos realizados durante este trabajo, el resto de los análisis que figuran son antecedentes.	95

Indice de tablas

Tabla 1: Significado de los códigos utilizados en el mapa de suelos de Molfino et al. (2000).	18
Tabla 2: clasificación de acuíferos según productividad (modificado de Struckmeier y Margat, 1995).	40
Tabla 3: valores atribuidos a los factores tipo de acuífero (G) y litología de la zona no saturada (O), para las unidades geológicas presentes en el área de estudio.	45
Tabla 4: valores atribuidos al parámetro D, según la profundidad a la que se encuentre el agua subterránea.	45
Tabla 5: clasificación de grados de vulnerabilidad según intervalo del método GOD obtenido.	46
Tabla 6: factores considerados dentro del método DRASTIC y el peso correspondiente a cada uno.	46

Tabla 7: rangos de valores de profundidad del agua subterránea y la valoración asignada a cada uno de ellos (Barbulescu, 2020).....	47
Tabla 8: rangos de valores atribuidos a la recarga y la valoración asignada a cada uno de ellos (Barbulescu, 2020).....	48
Tabla 9: rango de valores asignados según las diferentes litologías observadas (A).	48
Tabla 10: diferentes tipos de suelo que pueden presentarse y la valoración atribuible a cada uno.	49
Tabla 11: rango de valores de pendientes (%) y la valoración asignada a cada uno de ellos (Barbulescu, 2020).....	49
Tabla 12: valores atribuibles al factor litología de la zona no saturada (I) según el material que la compone.....	50
Tabla 13: valores adaptados a la zona de estudio para los factores litología del acuífero (A) y litología de la zona no saturada (I).	50
Tabla 14: valoración atribuible al factor (C) según la conductividad hidráulica del acuífero.....	51
Tabla 15: clasificación de los diferentes grados de vulnerabilidad encontrados según el intervalo del método DRASTIC al cual corresponda.	51
Tabla 16: clasificación de la cobertura del suelo (Stigter et al., 2006).	53
Tabla 17: rangos del Índice de Susceptibilidad y su vulnerabilidad asociada.....	53
Tabla 18: lista de perforaciones registradas en DINAGUA en la zona de estudio y los volúmenes extraídos autorizados.....	79
Tabla 19: caudal elevado por las perforaciones operativas y la Usina de Artigas al 31.08.2022 (información recabada en OSE Artigas).	80
Tabla 20: aporte de cada perforación y la usina al 31.08.2022. Nota: al momento de obtener estos datos había dos perforaciones nuevas esperando ser habilitadas para su uso (información recabada en OSE Artigas).	81
Tabla 21: valores <i>in situ</i> medidos en los pozos relevados.....	82
Tabla 22: datos obtenidos a partir del análisis en el Laboratorio de Aguas y Suelos del CENUR Salto.	83
Tabla 23: datos químicos de aguas superficiales obtenidos <i>in situ</i>	85
Tabla 24: datos químicos de cursos superficiales obtenidos en el laboratorio.....	86
Tabla 25: resultados de vulnerabilidad según GOD y DRASTIC.	87
Tabla 26: resultados cuantificados para el Índice de Susceptibilidad.	90
Tabla 27: Matriz de aceptabilidad de las actividades potencialmente contaminantes de acuerdo a la vulnerabilidad de los acuíferos (Foster et al., 2022).	96

RESUMEN

La protección del agua subterránea se ha vuelto en los últimos años, uno de los temas más importantes en la agenda mundial. Basta con recordar que en el año 2022 el lema del día mundial del agua de las Naciones Unidas fue “Aguas Subterráneas: haciendo visible lo invisible”. Para poder “visibilizar” este recurso es necesario generar conocimiento sobre el mismo para luego poder plantear pautas para su cuidado y protección. En algunos sectores de la ciudad de Artigas y alrededores, se encuentra aflorando el Sistema Acuífero Guaraní, uno de los más importantes de la región, del cual se obtiene gran parte del agua que abastece a la población de la zona. Si bien ya se había estudiado esta área desde el punto de vista geológico e hidrogeológico, este trabajo plantea un análisis actualizado y a mayor escala de la zona, generando nuevos mapas geológicos e hidrogeológicos que permitieron realizar mapas de vulnerabilidad mediante dos metodologías: GOD y DRASTIC. Los mapas de vulnerabilidad son herramientas de gestión muy importantes, de las cuales se pueden delimitar zonas más susceptibles a la contaminación, en las cuales se debe tener mayor control sobre las actividades antrópicas que allí se realizan. A partir del análisis estructural elaborado es posible realizar una nueva definición de los límites de la ventana del SAG presente en la zona de estudio y definir a las areniscas que no pertenezcan a la ventana como parte de *intertrapps* de la Formación Arapey. Varios de los productos obtenidos en este trabajo, como, por ejemplo, el mapa hidrogeológico y los mapas de vulnerabilidad, podrán ser utilizados como herramientas de trabajo e insumos básicos para generar planes para el uso del territorio y del agua subterránea por parte de los tomadores de decisión, que garanticen la protección del agua subterránea y su uso sostenible, permitiendo visibilizar el recurso.

Palabras clave: Artigas, Sistema Acuífero Guaraní, hidrogeología, vulnerabilidad, peligro.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas, por definición, son aquellas que se encuentran en el subsuelo, almacenadas y circulando entre los poros o las fracturas de una roca (Rebollo y Martín, 2007). Una definición básica y con muchos matices, pero que son el objeto de estudio principal de este trabajo, que comprende a la ciudad de Artigas y su microrregión, región situada al Noroeste de Uruguay y próximo a la frontera con Brasil.

Debido a que este recurso se encuentra en el subsuelo, se tiende a pensar que el mismo está protegido en cuanto a calidad y cantidad y que, de alguna manera, es independiente e impasible a todo lo que suceda en la superficie.

Si bien, en parte, las aguas subterráneas están más protegidas y son menos variables en comparación a las aguas superficiales, las mismas pueden sufrir cambios en su composición y/o en su cantidad por las actividades antrópicas que se realizan sobre o con estas. Algunas características de las unidades geológicas que contienen al agua y su entorno pueden hacer que el recurso hídrico sea más susceptible a la contaminación.

Uno de los usos principales que el recurso hídrico subterráneo tiene en Uruguay es para abastecimiento humano. En la actualidad, el agua subterránea representa aproximadamente el 10% del total del agua suministrada a la población por el organismo estatal que se encarga del abastecimiento a la población (OSE, 2022). Sin embargo, constituye la única fuente de alimentación para el 85% de los sistemas de abastecimiento y es parte del suministro para otro 6% de los sistemas (OSE, 2022). Por esto, su uso sostenible y su cuidado es algo primordial.

Además del abastecimiento humano en ciudades o pequeñas localidades, el agua subterránea cumple un rol muy importante en muchos emprendimientos productivos tanto agrícolas - ganaderos como industriales que dependen de ella.

El desafío entonces, está en lograr el equilibrio entre una demanda en constante crecimiento y la oferta de recursos hídricos que son vulnerables a nuestras propias acciones. Por ello, se plantea que la gestión sostenible del agua subterránea debe ser encarada con un enfoque integrador que contemple todos los aspectos que caracterizan al agua tanto en calidad como en cantidad sin olvidar el relacionamiento con la parte antrópica (Martínez y Villalejo, 2018).

La zona de trabajo, emplazada en la ciudad de Artigas y su microrregión, se encuentra principalmente, sobre el Sistema Acuífero Guaraní que, en esta zona, tiene algunas particularidades geológicas e hidrogeológicas que lo hacen vulnerable a la contaminación. Asimismo, parte del área de estudio comprende al acuífero Arapey, de naturaleza basáltica, superficial y formando un acuífero fisurado.

A pesar de la importancia del recurso hídrico subterráneo en el área de estudio, tanto en el abastecimiento público de agua potable como para la producción agrícola - ganadera, son pocos los antecedentes sobre estudios geológicos, hidrogeológicos y ambientales de detalle, así como también aquellos análisis de cómo el contexto socio-económico impacta en sus condiciones naturales. En este sentido, esta Tesis constituye un análisis integral sobre aspectos de la geología, hidrogeología, vulnerabilidad e índice de susceptibilidad,

con un enfoque fuertemente ambiental, que contribuye al conocimiento de la principal fuente de agua subterránea de la ciudad de Artigas y su microrregión.

Los resultados alcanzados, sumados a las medidas preventivas y de protección del acuífero formulados, constituyen un conjunto de herramientas útiles para la prevención y anticipación de los potenciales impactos vinculados a la demanda actual de agua subterránea en la zona y los cambios en el uso de suelo que puedan impactar en la calidad y cantidad del agua del acuífero.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Generar herramientas que permitan contribuir a la gestión sustentable del recurso hídrico subterráneo proveniente del Sistema Acuífero Guaraní en la ciudad de Artigas y su microrregión a partir de un análisis integral, con énfasis en los aspectos geológicos, hidrogeológicos, vulnerabilidad y peligro de contaminación, contemplando los diferentes productos temáticos que deben acompañar la planificación territorial.

2.2. Objetivos específicos

1. Crear una base de datos de perforaciones.
2. Realizar una caracterización geológica e hidrogeológica a escala 1:50.000.
3. Obtener una caracterización química del agua subterránea y superficial.
4. Estimar volúmenes de agua subterránea extraídos.
5. Definir la vulnerabilidad intrínseca del acuífero aplicando los métodos GOD y DRASTIC.
6. Identificar las posibles fuentes de contaminación del agua subterránea.
7. Determinar el peligro de contaminación de los acuíferos a través del Índice de Susceptibilidad.
8. Recomendar actividades o estudios a futuro para continuar enriqueciendo el conocimiento del agua subterránea en la región de la ciudad de Artigas y su microrregión.

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Delimitación de la zona de estudio

El área de estudio, como fue señalado, comprende la ciudad de Artigas y su microrregión, denominación administrativa definida por la Intendencia Departamental para abarcar esos dos sectores contiguos que forman una superficie total aproximada de 300 km² (Figura 1).

El Plan Local de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible de la Ciudad de Artigas y su Microrregión (2014) establece los límites de ambas superficies que en este trabajo se optó por considerar como una sola unidad, la que se la identificará como “Ciudad de Artigas y su microrregión”.

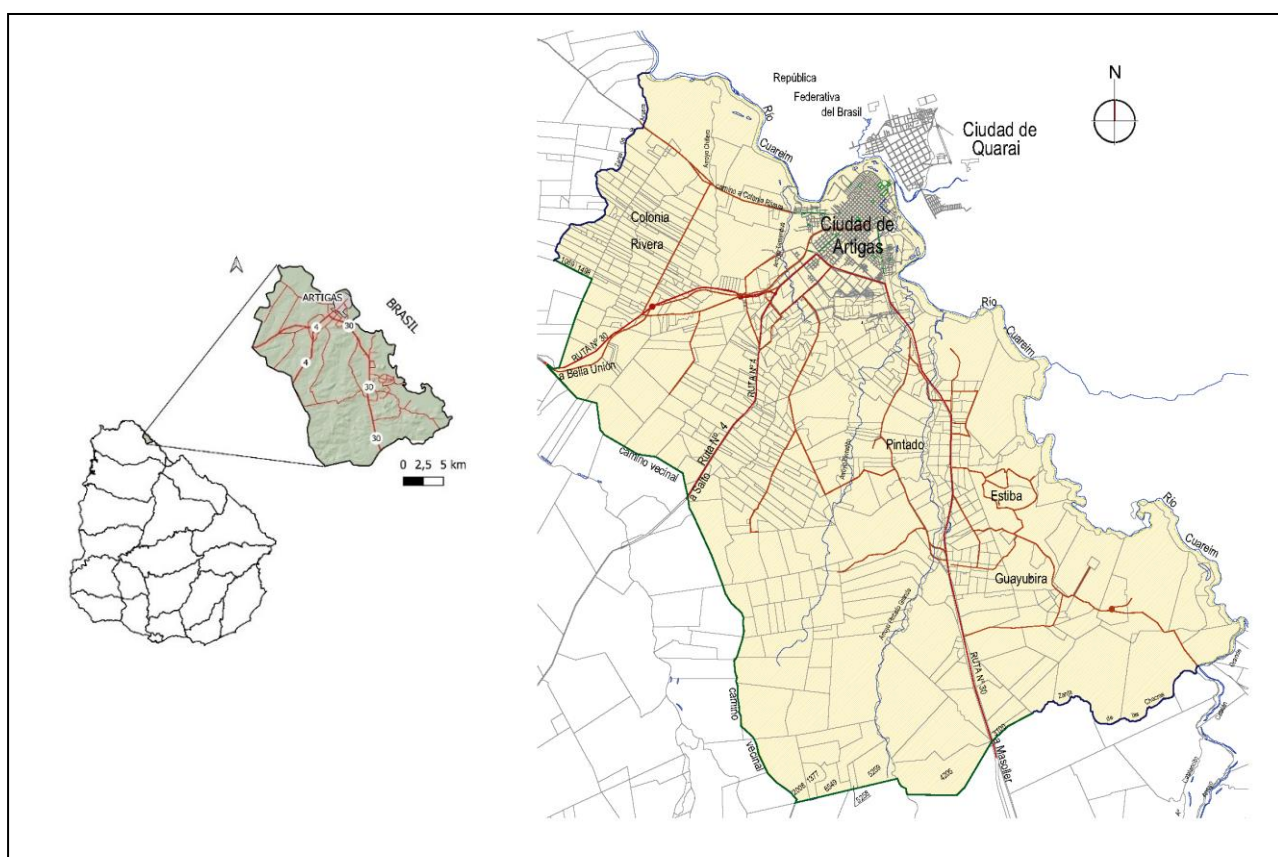


Figura 1: delimitación de la zona de estudio (modificada del Plan local de la ciudad de Artigas y su microrregión, 2014).

El área de la **planta urbana y suburbana de la Ciudad de Artigas** tiene como límite Norte al río Cuareim, al Oeste limita con el arroyo Tamandúá hasta Av. Telmo García da Rosa, y por ésta, en dirección Noreste hasta el padrón rural 1243. En dirección Sureste, se extiende hasta el camino vecinal que es la continuación de Calle Ciudad de Quaraí hasta el *by pass* de la ruta N° 30 y luego, con dirección Sureste limita hasta el padrón 5603, y por su límite hacia el Sureste hasta la ruta N° 30. Hacia el Sur, se extiende por dicha ruta hasta el padrón

6381 hasta llegar a la cañada Zanja del Tigre y su desembocadura en el arroyo Pintadito, y desde ese punto hacia el Norte hacia el río Cuareim.

La **microrregión**, limita al Este por el arroyo Catalán Grande, desde su desembocadura hasta Zanja de las Chacras y por ésta hasta su intersección con el padrón rural 3100 y, desde ese punto, hasta la ruta Nº 30. En dirección Suroeste, se extiende por el límite de los padrones 4205, 5259, 5258, 6549, 1377 y 2008 hasta un camino vecinal, por éste en dirección Norte hasta la ruta Nº 4 y luego hacia el Noroeste hasta ruta Nº 30 (rumbo a Bella Unión). Sobre la ruta Nº 30, en dirección Este, abarca hasta el camino vecinal de Colonia Rivera hasta el límite de los padrones 1498 y 1069 y luego con dirección Oeste hasta la Zanja de la Aruera, y por ésta aguas abajo hasta su desembocadura con el río Cuareim, y por éste aguas arriba hasta la desembocadura del arroyo Catalán Grande.

3.2. Descripción del medio físico

3.2.1. Clima

El clima de la ciudad de Artigas es, al igual que el resto del país, templado húmedo (Cfa, según la clasificación climática de Köppen), con una temperatura media anual de 19.6 °C (INUMET, 2021).

La ciudad de Artigas cuenta con una estación meteorológica localizada al Oeste de la misma, propiedad de INUMET (coordenadas: -30.3981 -56.5119) de donde se provienen los datos meteorológicos correspondientes al período 1991-2020 (INUMET, 2021).

El departamento de Artigas registra mayores temperaturas durante febrero sobrepasando los 40°C (Figura 2). En invierno es una de las zonas más frías con temperaturas por debajo de 0°C, lo cual demuestra que la variación anual de temperatura es muy drástica en la zona.

Sobre las precipitaciones las mismas son mayores durante los meses de primavera-verano y menores durante el invierno, sumando un total anual promedio de 1525 mm (Figura 3).

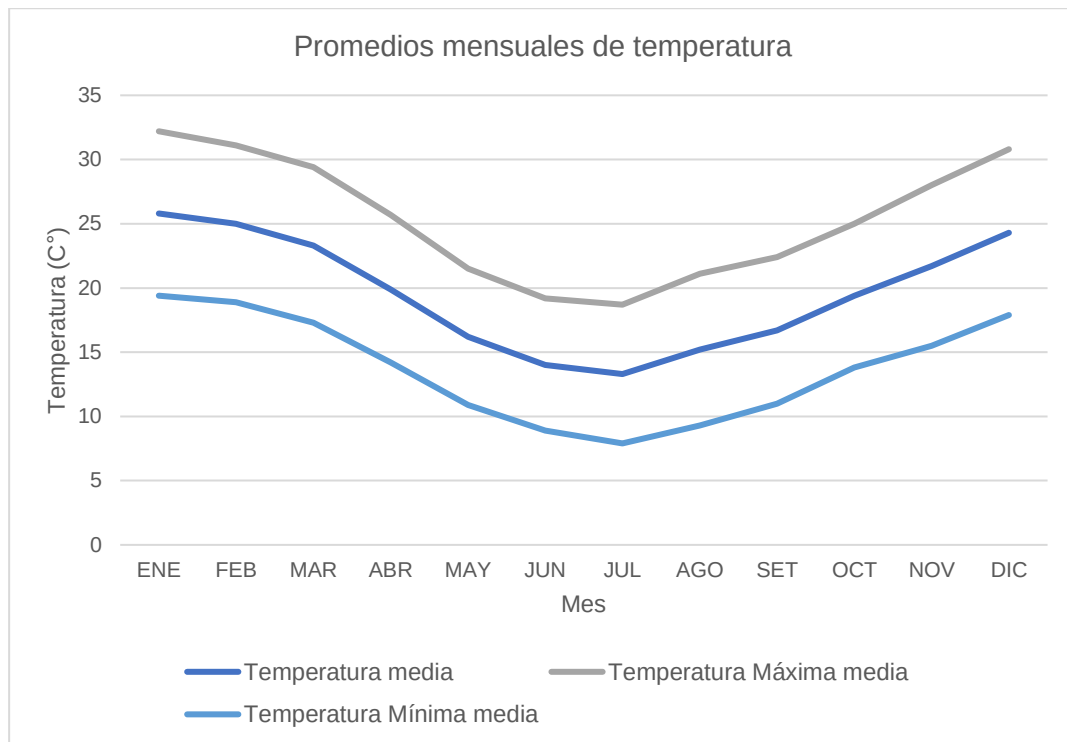


Figura 2: promedios mensuales para el período 1991-2020 de temperaturas media, media mínima y máxima media.

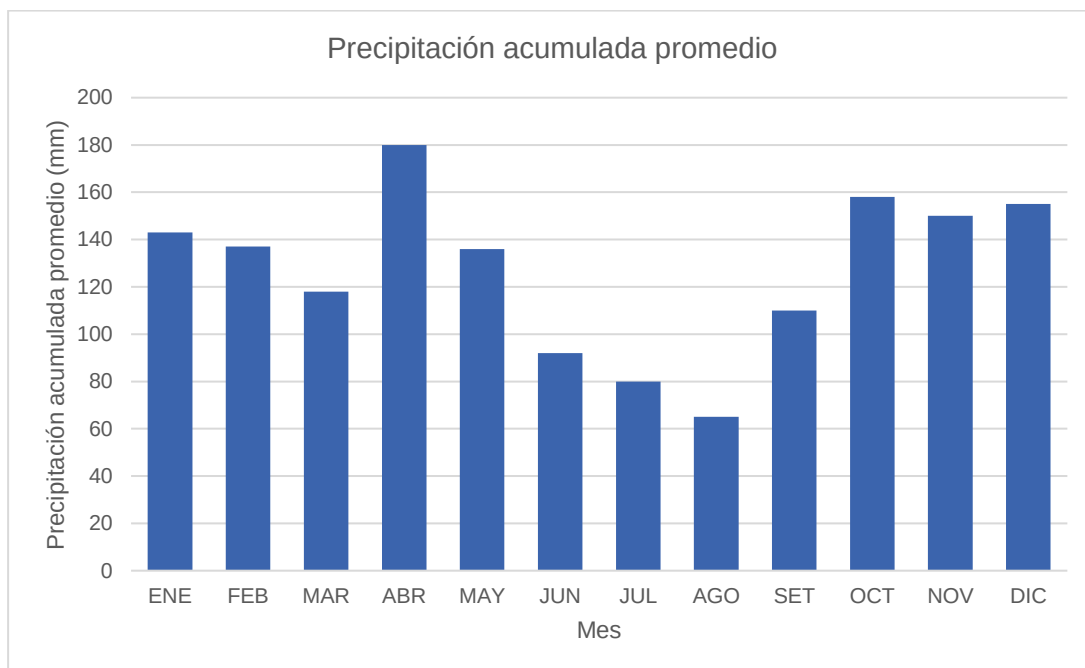


Figura 3: promedios mensuales para el período 1991-2020 del promedio de precipitaciones acumuladas.

3.2.2. Relieve

La topografía del área muestra alturas que varían entre 60 y 250 ms.n.m. Los menores valores de cota se encuentran sobre la margen izquierda del río Cuareim, mientras que los valores más altos se presentan al Sur y Suroeste, donde se encuentran dos sistemas de cuchillas: Cuchilla Yacaré Cururú (SW del área) y Cuchilla del Catalán (S del área), ambas con dirección N-SW (Figura 4).

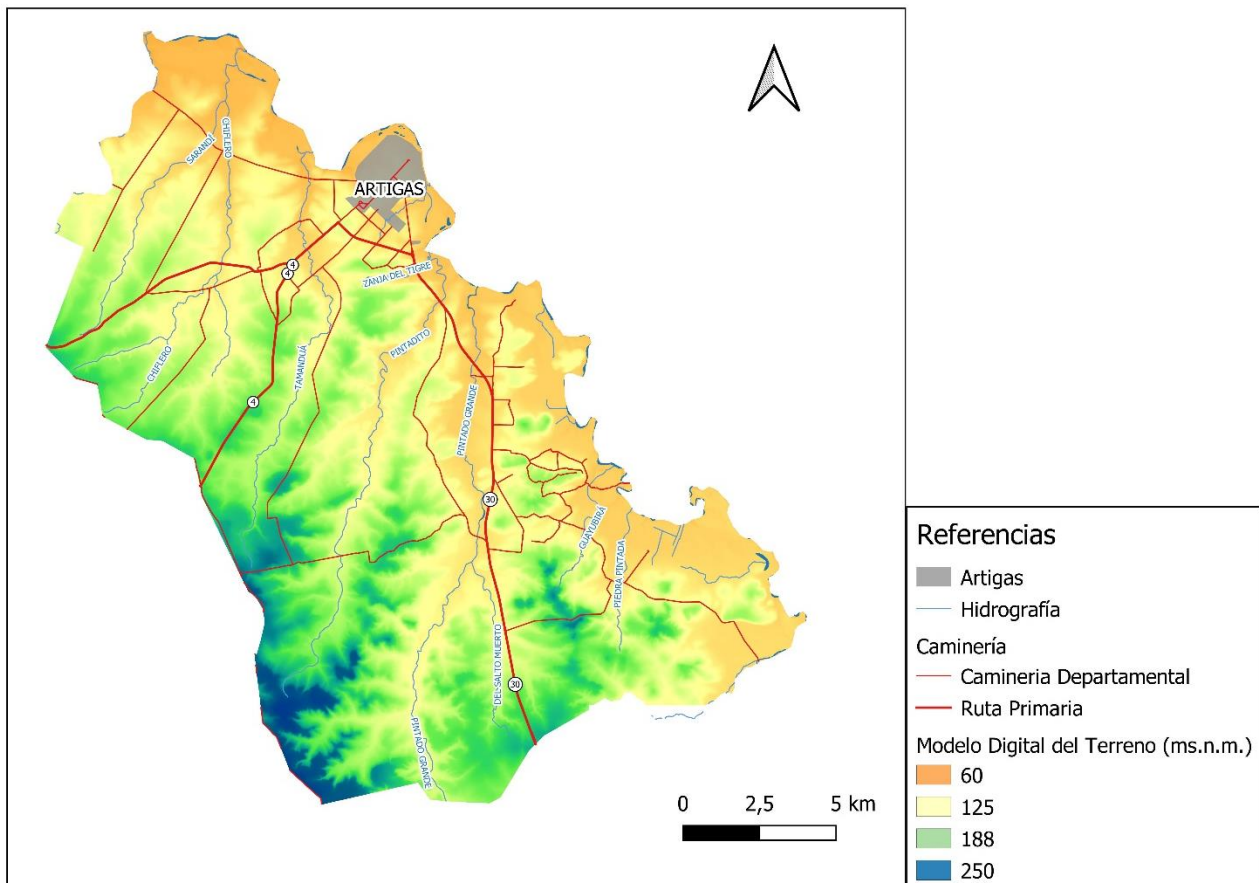


Figura 4: cotas topográficas e hidrografía principal de la zona de trabajo a partir del MDT a escala 1:10.000 (Fuente: Catálogo de Datos Abiertos <https://www.catalogodatos.gub.uy/>. Infraestructura de Datos Espaciales -IDEuy-: <http://ide.uy/>).

En las zonas más bajas se pueden observar algunas colinas que sobresalen de las planicies y que indican afloramientos de basalto (Figura 5).

La ciudad de Artigas se presenta mayormente en zonas relativamente bajas, aunque al Sur de la misma hay algunas variaciones abruptas que corresponden al cerro Ejido.

La red de drenaje en la zona de estudio presenta una densidad media y media a alta, siendo el río Cuareim el curso principal, limitando al Norte y Este la zona de trabajo y actuando de frontera con el territorio brasileiro (Figura 6).

Los principales arroyos y cañadas del área son tributarios directos o descargan indirectamente en el río Cuareim. Algunos de estos arroyos son: Tamandú, Chiflero, Pintado Grande, todo ellos con dirección preferencial NS (Figura 4).



Figura 5: zonas planas al frente, al fondo de la fotografía se observan las zonas altas vinculadas al cambio de unidad geológica (colinas de basalto).



Figura 6: río Cuareim al Norte de la ciudad de Artigas, por debajo del Puente Internacional de la Concordia. Se observan rocas basálticas aflorantes.

3.2.3. Suelos

Los suelos presentes en el área de estudio se encuentran principalmente sobre areniscas o basaltos. Las areniscas originan suelos generalmente profundos, ácidos y de textura liviana mientras que los basaltos dan lugar a suelos arcillosos que varían desde profundos a muy superficiales, de alta fertilidad, con alta rocosidad asociada en las zonas de suelos de menor espesor (Intendencia de Artigas, 2014).

En las partes bajas de la zona es donde aparecen suelos con alta capacidad agrícola, profundos, de alta fertilidad natural, texturas arcillosas, ubicados en las planicies aluviales adyacentes a las grandes vías de drenaje de la región (Molfino et al., 2000).

Particularmente, el área de estudio cuenta con un mapa de suelos a escala 1:100.000, confeccionado por Molfino et al. (2000) en el marco del trabajo “Zonificación de tierras de la cuenca del río Cuareim” (Figura 7).

El mapa de Molfino et al. (2000) se clasifica por códigos los cuales se componen de varios parámetros: un número que corresponde a la asociación de series de suelo, seguido de una forma del paisaje y materiales geológicos parentales de los suelos y luego le siguen códigos que expresan la rocosidad y/o pedregosidad asociada (Tabla 1).

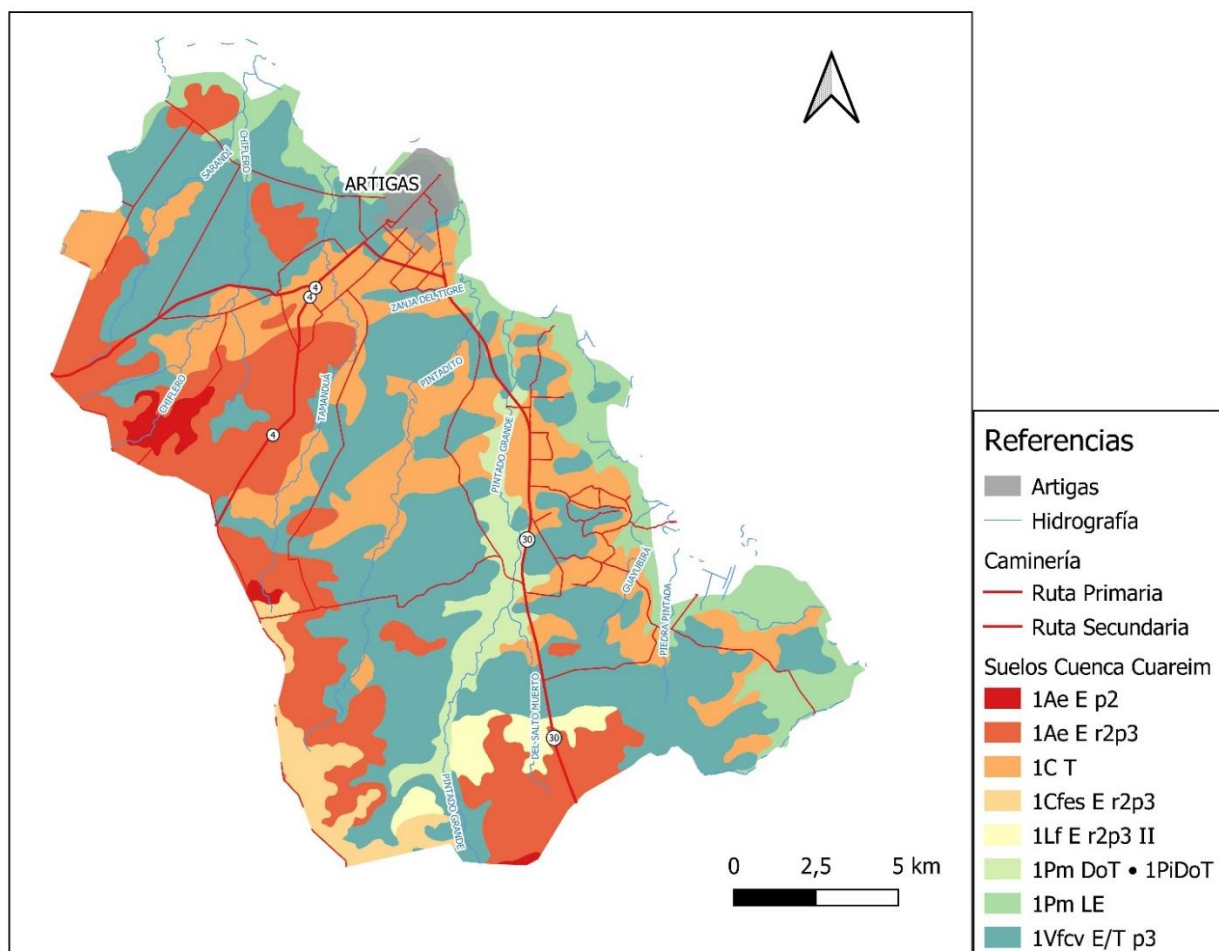


Figura 7: mapa de suelos para la zona de estudio basado en la carta de suelos de la Cuenca del río Cuareim a escala 1:100.000 (Modificado de Molfino et al., 2002).

Tabla 1: Significado de los códigos utilizados en el mapa de suelos de Molfino et al. (2000).

GEOFORMAS	Planicies: áreas de perfil topográfico plano, con predominio de pendientes menores a 0.5%	A: Altiplanicie
		ALs: Altiplanicie con Lomadas suaves
		P: Planicies altas
		Pm: Planicie media
	Lomadas: áreas de perfil topográfico predominantemente convexo, con concavidades asociadas a los talwegs y predominio de pendientes entre 1 y 6%	Ls: Lomadas suaves (predominio de pendientes entre 1.5 - 2.5%)
		L: Lomadas (predominio de pendientes 2.5 - 3.5%)
		Lf: Lomadas fuertes (predominio de pendientes 3.5 - 6%)
		LsA: Lomadas suaves con altiplanicies
		LA: Lomadas con altiplanicies
	Colinas: áreas de perfil topográfico convexo con concavidades asociadas a los talwegs y predominio de pendientes de 6 - 18%	C: Colinas (predominio de pendientes entre 6 - 12%)
		Cf: Colinas fuertes (predominio de pendientes entre 12 - 18%)
		CfA: Colinas fuertes con altiplanicies
	Valles: áreas de perfil topográfico variable, que ocupan una posición baja en el paisaje.	V: Valles de perfil convexo (pendientes predominantes menores de 4%)
		Vf: Valle fuerte de perfil convexo (pendientes predominantes menores de 4%)
		Vp: Valle de perfil plano (pendientes predominantes menores a 3%)
	Características de las geoformas	cv: coluvional, co: cóncavo, e: entalles, es: escarpas y M: mesetiforme
GEOLOGIA	Do: Formación Dolores	
	E: Rocas cristalinas ígneas efusivas (Formación Arapey)	
	L: Formación Libertad (facies limo-arcilloso)	
	T: Formación Tacuarembó	
ROCOSIDAD	r1: menor a 2%	
	r2: de 2 a 10%	
	r3: de 10 a 50%	
PEDEGROSIDAD	p1: menor a 0.1%	
	p2: de 0.1 a 1%	
	p3: de 1 a 10%	
	p4: de 10 a 50%	

3.3. Aspectos socio-económicos: actividades, servicios e infraestructura básica.

3.3.1. Población

El departamento de Artigas ocupa una superficie de 11.928 km² (6,8% del total del país), posee una población de 73.377 habitantes (2,4% de la población total del país y una densidad de 6,15 hab/km²) siendo urbana en un 95,2% (INE Censo, 2011). Las principales localidades del departamento son: la ciudad de Artigas, Bella Unión, Tomás Gomensoro y Baltasar Brum.

La distribución de la población muestra una fuerte concentración en la ciudad de Artigas, su capital departamental, donde residen aproximadamente 40.348 habitantes (INE Censo, 2011). Algunos informes departamentales refieren a una población de aproximadamente 5.000 habitantes para la microrregión. La tasa media anual de crecimiento intercensal entre los años 1996-2011 es de 0,16 para el área de la microrregión. Esto se puede visualizar en el ritmo y forma de expansión de la ciudad, que llevó a consolidar al Sur de la misma un área suburbana e incluso rural, conformada por barrios periféricos y asentamientos que albergan a un importante número de pobladores (Plan de Desarrollo Departamental, 2011). La Figura 8 muestra el crecimiento de construcciones hacia la periferia de la ciudad de Artigas a través de dos imágenes satelitales, una de 1985 y otra del 2022.

Según datos de la Encuesta Continua de Hogares de 2020, el 11,1% de los hogares de Artigas se encuentra debajo de la línea de pobreza. El Censo del 2011, muestra que el 54,4% de las personas tiene al menos una Necesidad Básica Insatisfecha, lo que lo posiciona como el departamento con mayor porcentaje en el país.

El 2,5% de la población mayor de 15 años de Artigas es analfabeta. Este porcentaje es uno de los más altos del país según cifras de 2019. El 11,3% de la población entre 25 y 65 años tiene estudios terciarios, este porcentaje es mayor en las mujeres que en los hombres (14,6% y 8% respectivamente). El promedio de años de educación de las personas de 25 años es de 8,2 años (OTU – OPP, 2023).



Figura 8: imágenes satelitales donde se observa la expansión urbana de la ciudad entre 1985 y 2022 (Imágenes extraídas de *Google Earth*).

3.3.2. Actividades económicas y recursos naturales

Los indicadores del mercado laboral para 2020 muestran que Artigas tiene una tasa de actividad de 56,8% y una tasa de empleo en 50,6%, valores menores al promedio nacional (OTU – OPP, 2023). Este mismo informe muestra que el porcentaje del desempleo se encuentra por encima del promedio país en un 11%. Por otro lado, es uno de los departamentos con valores más altos en términos de informalidad, el 39,5% de las personas ocupadas no hicieron aportes a la seguridad social.

Los recursos naturales más significativos del departamento incluyen amplias zonas de producción agropecuaria apta para diversos cultivos intensivos como la caña de azúcar y el arroz, la ganadería extensiva (especialmente bovina y ovina) y la minería. El departamento de Artigas participa con cerca de un 1,5% del producto bruto del total país según estimaciones de actividad económica departamental (OTU – OPP, 2023).

El área de estudio incluye zonas rurales dedicadas a la actividad agrícola y, en menor medida, ganadera, remarcando que la microrregión posee un pasado y presente fuertemente arraigado a la producción de tabaco artesanal.

La región tiene una amplia tradición en el cultivo tabacalero, particularmente en el área de estudio. Por ejemplo, desde el año 1969, en los parajes de Guayubira y La Estiva, se comenzó a producir tabaco el cual se vende únicamente a la empresa Monte Paz (Figura 4 A y B). Esta empresa seleccionó la zona luego de realizar estudios de suelos, con fotografías aéreas y técnicos extranjeros, y determinando que en esa zona existen afloramientos de tierras arenosas, adecuadas para el cultivo de tabaco (García, 2022). En el caso de los productores familiares, la industria tabacalera les ofrece a través de un

contrato, el acceso a los insumos necesarios para el cultivo del tabaco. Reciben desde asistencia económica, hasta los implementos para los almácigos, las semillas, los fertilizantes, equipos, todo lo cual será descontado de la paga de su producción al final de la cosecha (García, 2022).

El cultivo de tabaco transcurre entre los meses de julio a marzo o abril. En él repercute desde el clima a la hora de la siembra y la cosecha como distintas variables del mercado internacional que determinarán el precio total de lo ganado en la zafra (García, 2022). En los últimos años, la caída de la demanda de tabaco provocó que muchos productores rurales buscaran planes de reconversión, total y/o parcial, para pasar a producción hortícola cubierta.

Los emprendimientos industriales que se desarrollan en la ciudad de Artigas y su microrregión, son pocos, destacándose la presencia de dos frigoríficos (Frigorífico Municipal de Artigas y el Frigorífico Cuareim), una planta de secado y elaboración de arroz y una empresa encargada de la fabricación y venta de artículos de hormigón.

Otras actividades que se desarrollan en el área de estudio, de producción familiar, son la lechería y la apicultura (Intendencia de Artigas, 2011).

Uno de los esfuerzos gubernamentales por lograr la reconversión de los tabacaleros, fue construir en 2014 una microdestilería de ALUR en el km 141 de la ruta N° 30 con la particularidad de que funcionaría a base de boniatos que los productores locales debían cultivar. Lamentablemente, este emprendimiento no funcionó como estaba planificado, encontrándose la planta actualmente abandonada (Figura 7C).

Se destacan además las actividades relacionadas a la minería de ágatas y amatistas, las que se localizan en la capital departamental y su zona de influencia (Catalán Grande – Rincón de Pacheco). A partir de esta, surge el desarrollo de la artesanía de estas piedras semipreciosas en talleres ubicados, principalmente, en la ciudad (Figura 7D). Las tres empresas principales que operan en la minería de las piedras semipreciosas procesan la piedra para exportación, aunque la mayoría de la exportación es en bruto a destinos como Brasil y China (CIU, 2019).

Cabe señalar que la ley N° 19.238 declara a la ciudad departamental de Artigas como capital nacional de las piedras preciosas y semipreciosas. Es un sector que exporta la mayor parte de lo que produce y que emplea a unas 350 personas (CIU, 2019).

Las canteras que extraen material basáltico para la construcción también son abundantes en la zona de estudio, registrándose siete canteras a cielo abierto con permiso otorgado por la DINACEA (Observatorio Ambiental Nacional, 2023).



Figura 9: ejemplos de actividades económicas en la zona de estudio. A: plantaciones de tabaco en la zona de Guayubira. B: productores preparando las hojas del tabaco para su secado (nota El Observador, 2016a). C: planta de ALUR actualmente abandonada. D: taller de preparación de amatistas.

3.3.3. Infraestructura y servicios

Este sector tiene poco desarrollo en el departamento, pero se ha apostado por su mejora en los últimos años.

En el rubro comercial se destaca la presencia de los *free shops* que, como toda ciudad de frontera, está signada por la influencia de las circunstancias económicas que existan en la región de Quaraí. De esta manera, cuando la situación cambiaria es favorable, la ciudad se beneficia de las compras por parte de brasileiros, aunque es difícil visualizar mayores desarrollos por la competencia de Rivera y el bajo nivel de ingreso de la zona fronteriza (Intendencia de Artigas, 2011).

En 2015, se inauguró el Parque Eólico Juan Pablo Terra, ubicado en el km 111 de la ruta N° 30, que consta con una potencia instalada de 67,2 MW con 28 generadores de 2,4 MW de potencia cada uno (CIU, 2019).

Respecto a los servicios de recreación, en el área se encuentra el Complejo Turístico de la Piedra Pintada que cuenta con varias piscinas y es muy visitado en verano (Figura 10A y 10B) y el Cerro de La Estiva donde se encuentra la capilla de la Virgen de los Treinta y Tres

(Figura 10C). Otros emprendimientos en la zona son el Santuario Piedra Corazón, variadas chacras turísticas y campings.

La actividad minera referente a ágatas y amatistas también genera un atractivo turístico en la zona de estudio, ya que la mayoría de los talleres de preparación de las mismas se encuentran en la ciudad y en la microrregión y son visitados asiduamente por los turistas.



Figura 10: actividades recreativas en el área de estudio. A: Piedra Pintada (Foto: N. Aubet). B: piscinas dentro del Complejo Turístico Piedra Pintada. C: foto panorámica del Cerro de la Estiva (en el borde derecho de la foto se observa la capilla de la Virgen de los Treinta y Tres).

Cabe señalar también que, actualmente, la zona de Guayubira – La Estiva se ha convertido en uno de los destinos elegidos para que pobladores de la ciudad de Artigas se construyan casas a las cuales van a pasar los fines de semana o el verano, lo que hace que la construcción de piscinas en la zona esté en aumento y con importante demanda de agua.

Es de resaltar que el turismo departamental cobra significativa importancia durante carnaval, siendo uno de los más reconocidos del país. El carnaval involucra alrededor de 8 mil personas y entre 18 y 22 mil turistas procedentes de otras partes del Uruguay y de los países de la región (CIU, 2019).

3.3.4. Gestión de residuos sólidos y efluentes

La zona de estudio cuenta con tres vertederos a cielo abierto, dos no operativos y uno operativo que se encuentra sobre la ruta N°4 (Figura 9).

El vertedero operativo recibe 40,657 ton por día de residuos domiciliarios y residuos de obras de construcción (Figura 12). Inició sus operaciones en el año 2003 y cuenta con un personal de 30 empleados. Según la DINACEA (Observatorio Ambiental Nacional, 2023), no hay control de acceso al vertedero, cuenta con una capa de arcilla como impermeabilización y el tratamiento de lixiviados es parcial. Sobre los dos vertederos no operativos, ninguno cuenta con plan de cierre y ambos son a cielo abierto.

En 2014, OSE inauguró una planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en la calle Carmen Laviaguerre y Oficial 19, que fue diseñada para tratar los efluentes domésticos previo a su vertido en el río Cuareim y alcanzar valores que cumplan con la normativa vigente. Fuera de la ciudad, se encuentra una laguna de tratamiento de efluentes en la zona de Pintadito mientras que, en cerro Ejido, se encuentra la planta de lodos que provienen de esa laguna (Figura 13).

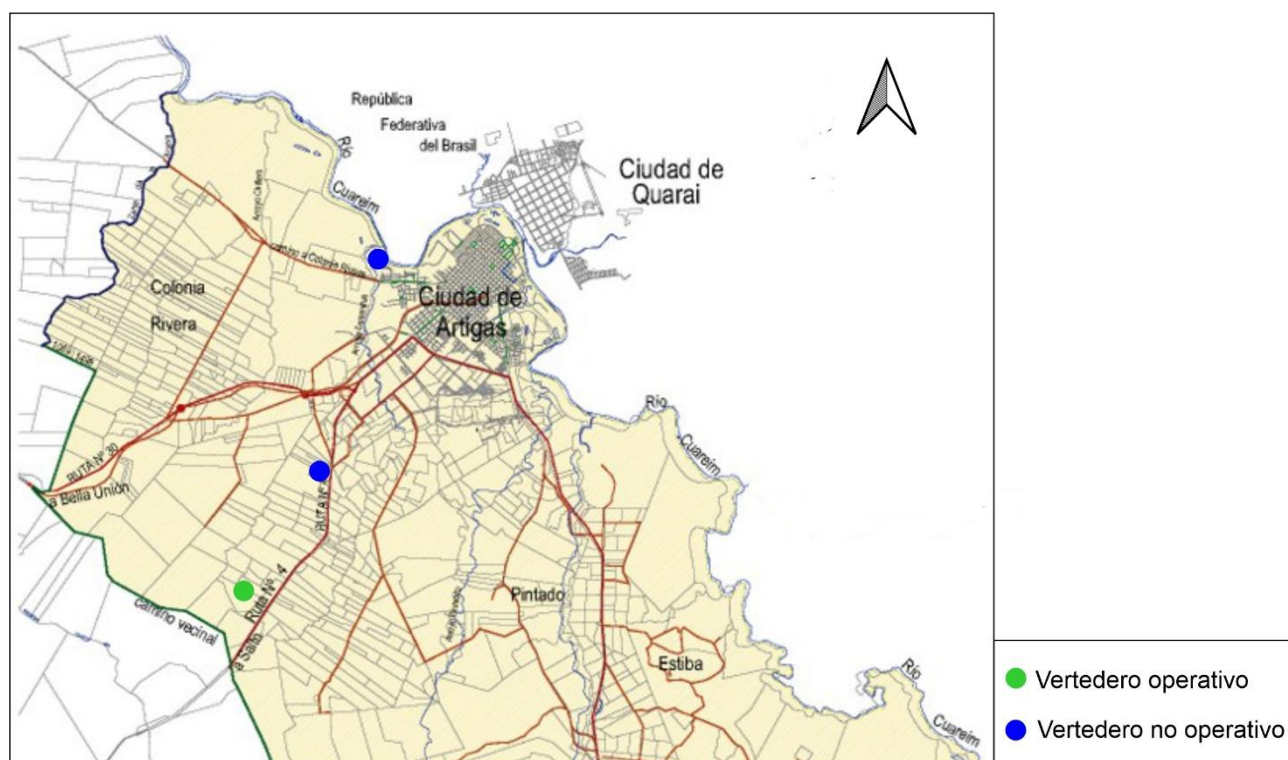


Figura 11: ubicación de los vertederos operativos y no operativos en la zona de estudio (modificado del visualizador de DINACEA).



Figura 12: entrada al vertedero operativo ubicado al Suroeste de la zona de trabajo (Foto: N. Aubet).

3.3.5. Abastecimiento público de agua y saneamiento

OSE es la empresa estatal encargada de prestar servicios de agua potable y alcantarillado sanitario a la población de Artigas. El sistema de abastecimiento es del tipo mixto, conformado por agua superficial captada del río Cuareim (30% del total de agua elevada) y tratada en la planta potabilizadora (Figura 13) y por agua subterránea extraída de perforaciones (70% del total de agua elevada) (Ing. Florencia García - OSE Regional Artigas, comunicación personal).

Para cumplir con la demanda de agua de la ciudad, OSE posee varios pozos en la zona de estudio, la mayoría concentrados en la ciudad y otros en pequeñas localidades o escuelas rurales.

El 8,7% de los hogares, según datos de 2019, no tiene conexión a la red de distribución general que garantice el acceso al servicio de agua potable para beber o cocinar (OTU - OPP, 2023). En zonas donde la red no llega, el abastecimiento se realiza a través de pozos particulares, los cuales, muchas veces también tienen otros usos como, por ejemplo, riego y abrevadero de ganado.

El servicio de saneamiento en la ciudad de Artigas cubre un porcentaje entre el 50 y 60% de la población según datos brindados por OSE en el año 2021 (Figura 14). Las zonas que no poseen saneamiento (en su mayoría rurales), frecuentemente utilizan pozos negros construidos en el terreno, muchos de los cuales no cuentan con una correcta impermeabilización.



Figura 13: plantas de tratamiento y potabilización administradas por OSE.

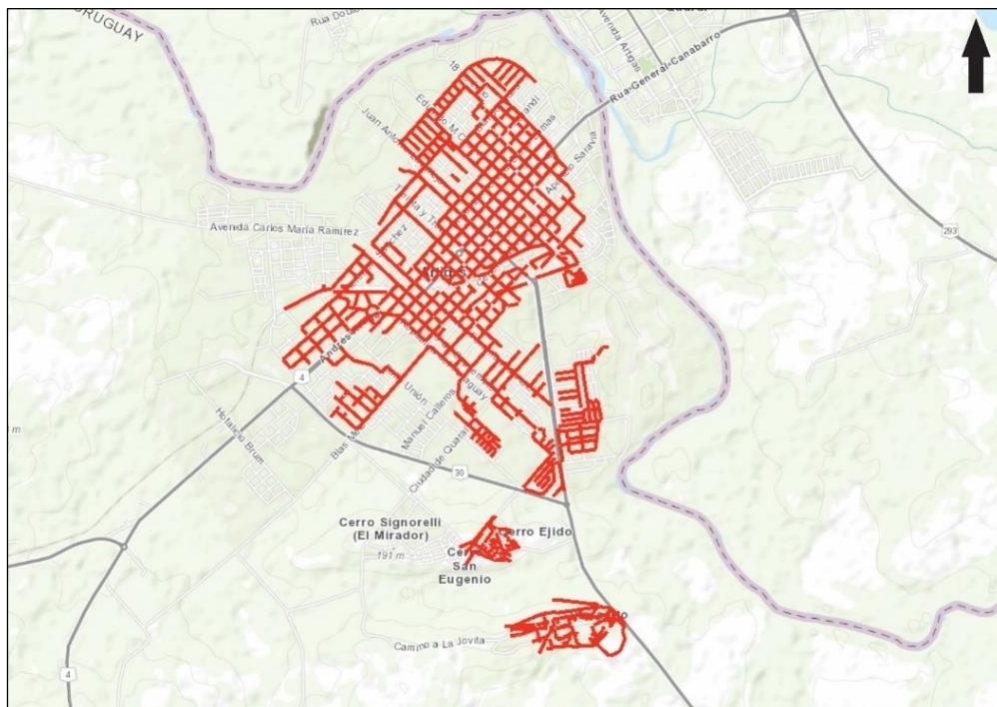


Figura 14: red de saneamiento en la ciudad de Artigas y alrededores (SIG OSE, 2023).

4. ANTECEDENTES

4.1. Geología

El área de estudio se emplaza en el sector basáltico de la Cuenca Norte donde afloran las formaciones cretácicas Rivera (areniscas medias a finas) y Arapey (basaltos), así como la Formación Sopas (cobertura sedimentaria cuaternaria) y los depósitos aluvionales y coluviales, de granulometrías variables, asociados a los cursos de agua.

En uno de los primeros mapas geológicos del Uruguay a escala 1:500.000 (Bossi et al., 1998) se puede observar en el área de estudio y sus alrededores a las areniscas de la Formación Rivera rodeadas de los basaltos que corresponden a la Formación Arapey.

La Figura 15 muestra la geología del área de estudio y adyacente, incluyendo los rasgos geológicos en continuidad en el sector brasileño.

La Formación Sopas (en el sentido de Antón, 1975 y Bossi y Navarro, 1991) está compuesta principalmente, por conglomerados, limolitas y limolitas arenosas de coloración marrón (Martínez y Ubilla, 2004). En la zona de estudio, se encuentra de manera intermitente en algunos bordes de los cursos de agua y es descrito por Salles (2023) en la orilla del río Cuareim a la altura de La Estiva.

En Uruguay, el área total de la Formación Arapey es aproximadamente de 60.500 km², de los cuales algo más del 70% (unos 44.000 km²) afloran y el resto está cubierto por algunas decenas de metros de sedimentos Cretácicos-Cenozoicos (Techera et al., 2020).

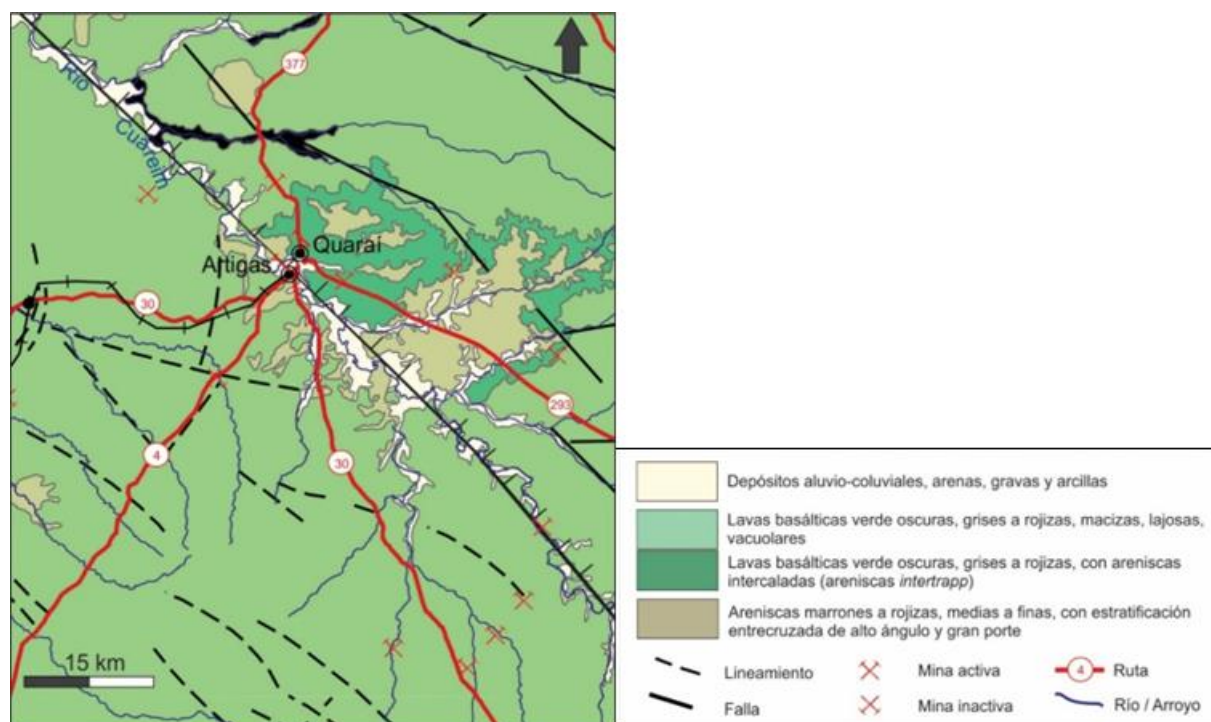


Figura 15: geología del área de estudio y su contexto regional, modificado y simplificado del Mapa Geológico y de Recursos Minerales de América del Sur, Hoja SH21(Comisión para el Mapa Geológico del Mundo, 2009).

La Formación Arapey se caracteriza por basaltos a andesitas con bajo contenido en titanio (Techera et al., 2020). Los datos radimétricos y paleomagnéticos disponibles indican que el episodio volcánico más intenso del Mesozoico (formación de los basaltos) tendría una edad en torno a 133 Ma (Muzio, 2004).

Tomando como modelo los perfiles descriptos en el distrito gemológico Los Catalanes la estructura interna de cada colada puede estar integrada por (Techera et al., 2007, 2020):

- parte basal: formada por lava de grano fino, tenaz, con porcentaje variable de vesículas, aunque en general bajo, con disyunción elíptica a esférica, potencia en general menor al metro. Excepcionalmente se observa fracturas horizontales apretadas en la base (estructura lajosa).
- zona central: formada por rocas masivas o con vacuolas dispersas, de grano fino a medio, con fracturación irregular tanto en espaciado como en dirección. En algunos derrames se observa hacia la base un "esbozo" de estructura columnar. En varios derrames la parte superior puede contener grandes cavidades vacías o rellenas de minerales secundarios (geodas). Esta zona puede alcanzar varias decenas de metros de espesor.
- tope de lava: caracterizado por una roca altamente vesicular, con vacuolas vacías o con relleno de minerales secundarios. Asociado espacialmente al nivel vesicular se observa en forma muy frecuente niveles "brechoides", formados principalmente por fragmentos de basalto/andesita vesicular, en una "matriz" en general volcánica.
- en la parte superior e inferior del derrame es común encontrar areniscas, representadas por mantos y dunas de arena (*intertrapp*) y "ocurrencias" complejas producto de la interacción lava-arena: diques clásticos, brechas ígneo-sedimentarias y "filones" de arenisca inyectados.

Los espesores de basalto en la zona de estudio fueron estimados a través de la información sísmica y de subsuelo, alcanzando los 150 y 200 m (de Santa Ana y Veroslavsky, 2004). También fueron inferidos por estudios audio-magneto-telúricos donde se describen espesores de hasta 200 m en varios sondeos ubicados al Sur de la ciudad de Artigas (Silverio da Silva et al., 2006).

Las relaciones estratigráficas de los basaltos en el área de estudio son hacia la base con las areniscas de la Formación Rivera y hacia el tope con la cobertura cuaternaria y depósitos actuales.

La Formación Rivera se asigna al Cretácico Inferior y está constituida por areniscas finas a medias, naranjas a rojizas, que presentan estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte (Ferrando et al., 1987). Las areniscas presentan composición cuarzo - feldespática y moderada presencia de clastos líticos. Su origen es interpretado como antiguos depósitos de dunas eólicas y en el área tipo de la ciudad de Rivera y alrededores, donde se le asigna un espesor máximo de 50 m (Ferrando et al., 1987).

En la Formación Tacuarembó (Jurásico Superior) predominan las areniscas finas a muy finas, blancas a blanquecinas, que presentan estratificación subhorizontal a horizontal, con ocasionales intercalaciones de niveles pelíticos (en el sentido del miembro inferior de la Formación Tacuarembó según Perea et al., 2009). La Formación Tacuarembó posee un

importante desarrollo en superficie en los departamentos de Rivera y Tacuarembó donde es interpretada como una sucesión de depósitos fluviales y eólicos, conformando extensas planicies arenosas rasas asociadas a canales efímeros y/o permanentes (do Amarante, 2017).

Cabe señalar que esta unidad, en el área de estudio, se reconoce sólo en el subsuelo, donde de Santa Ana y Veroslavsky (2004) le asignan un espesor de 190 m, pero sin diferenciar las areniscas que corresponden a la Formación Rivera.

En la zona de Artigas existen dos estudios geológicos de mayor detalle. Por un lado, Silverio da Silva et al. (2006) realizan un estudio transfronterizo de las ciudades de Artigas y Quaraí generando un mapa geológico como uno de los productos. Gagliardi (2008) considerando a todas las areniscas que afloran en el área como pertenecientes a la Formación Rivera, asumiendo el mismo criterio de mapeo que Bossi et al. (1998), aunque como se verá en los resultados de este trabajo, muchos de estos términos corresponden a las areniscas de intertrapps que forman parte de la Formación Arapey.

4.2. Hidrogeología e hidrogeoquímica

El área de estudio comprende dos acuíferos que tienen una significativa relevancia en el aprovechamiento del recurso hídrico de la región Norte del Uruguay: el acuífero fisurado Arapey y el Sistema Acuífero Guaraní (Figura 16).

En el acuífero Arapey, según la memoria de la Carta Hidrogeológica de la Cuenca del Cuareim (2015), el modelo hidrogeológico de circulación de aguas subterráneas en los basaltos posee un fuerte componente estructural. Las fracturas son las principales vías de circulación de agua, pudiendo cortar varios derrames, asociadas a diferentes tipos de discontinuidades horizontales y subhorizontales relacionadas a la naturaleza de los basaltos. Por un lado, algunos autores proponen que esta circulación alimenta y conecta a las diaclasas, de escasa longitud y generalmente restringidas a la zona masiva de la lava, y que actúan como vías de circulación menor (Hausman y Fernández, 1967). Estos autores minimizan la importancia de las estructuras horizontales para la circulación de agua. Por otra parte, en otras regiones sería relativamente importante la circulación y almacenamiento de agua en las juntas horizontales, localizadas en el tope y base de cada derrame, así como los contactos entre derrames (Lastoria et al., 2006), aunque puede tener una productividad baja si están aisladas (Reginato et al., 2007).

En Uruguay, la mayoría de las perforaciones que captan agua de este acuífero lo hacen a profundidades iguales o menores a 70 m, siendo los intervalos más frecuentes entre 30 y 40 m y entre 20 y 30 m. La media de profundidades está próxima a 49 m y la mediana en el entorno de 40 m (Techera et al., 2020).

El Sistema Acuífero Guaraní es un cuerpo hídrico subterráneo, transfronterizo, de fundamental importancia para el continente sudamericano, desarrollándose parcialmente en Uruguay, Argentina, Brasil y Paraguay y ocupando algo más de 1 millón de km² (Gastmans et al., 2012).

En nuestro territorio, el SAG, abarca un área de 36.170 km² (PEA, 2009) y aflora a lo largo de una extensa franja de unos 165 km de largo por 35 - 50 km de ancho en los departamentos de Rivera y Tacuarembó. Se extiende hacia el Oeste, en el subsuelo cubierto por basaltos con espesores que van desde los 100 a 150 m en el extremo oriental del borde de la cuesta basáltica hasta los 500 a 1100 m en los sectores más profundos de la cuenca, próximos al río Uruguay. Algunos asomos del SAG aparecen en la región basáltica y se denominan “ventanas” que se asocian a fuertes controles estructurales NW y, NS y NE.

En Uruguay, la geología del SAG se constituye por rocas sedimentarias, principalmente arenas siliciclásticas, pertenecientes a las formaciones Tacuarembó y Rivera que forman un paquete sedimentario con buena porosidad y permeabilidad.

Los principales antecedentes hidrogeológicos del SAG en Uruguay refieren a las contribuciones de Montañó et al. (1998), Oleaga (2002), Montañó (2003), Collazo (2006), Gómez (2007), PSAG (2003 - 2009), Techera et al. (2017) y Veroslavsky y Manganelli (2018).

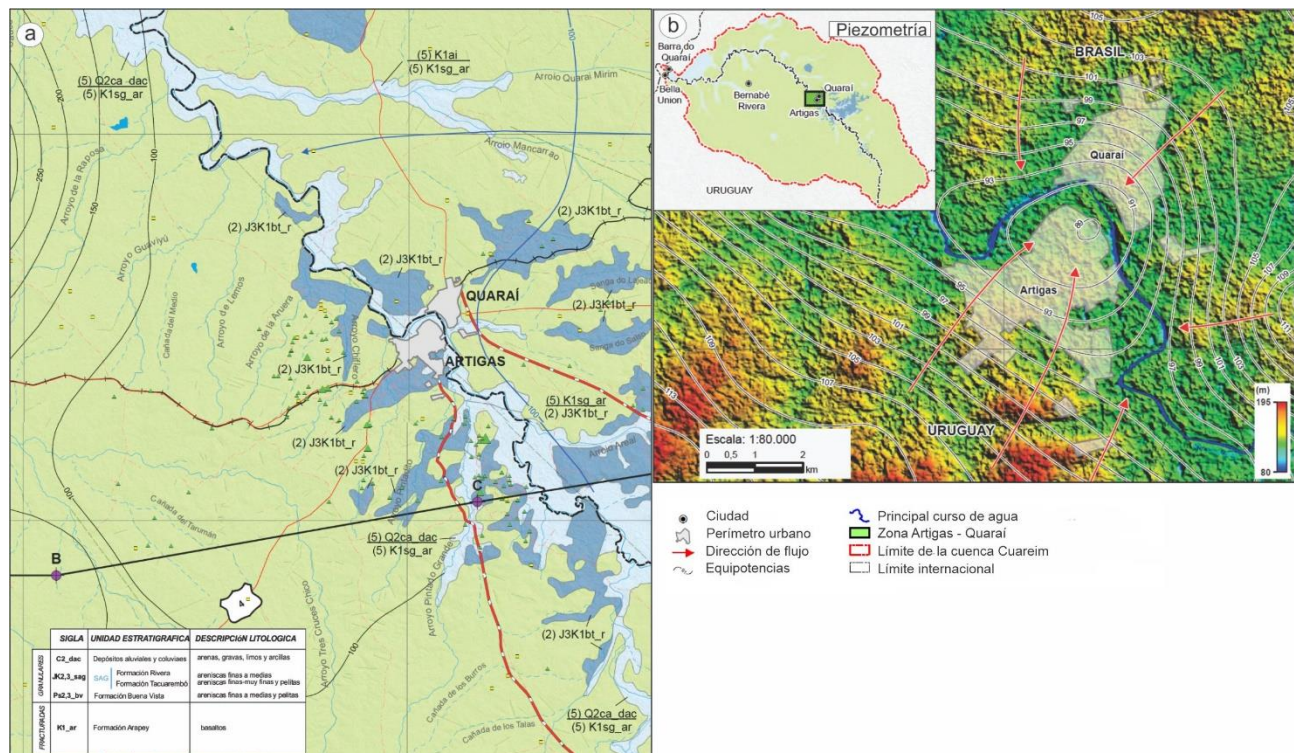


Figura 16: a: mapa hidrogeológico regional (parcial) que comprende el área de estudio y la región adyacente incluyendo el sector brasileño de Río Grande do Sul, b: piezometría y dirección de flujo del agua subterránea en el área (CPRM – DINAGUA, 2015).

En la ciudad de Artigas y alrededores, el SAG fue estudiado por varios autores, en particular, cabe destacar un estudio hidrogeológico de Pérez et al. (2001), quienes analizaron el comportamiento hidrodinámico del área a partir del estudio de 17 pozos, estableciendo tres niveles principales, siendo el inferior el de valores más altos de

transmisividad, sin detectar problemas en la calidad del agua y su explotación. Estos autores también incluyen la caracterización química de 10 pozos para abastecimiento humano.

Silverio da Silva et al. (2006), Camponogara (2006) y Camponogara et al. (2007) realizaron un trabajo geológico e hidrogeológico que abarcó las ciudades fronterizas de Artigas y Quaraí. Silverio da Silva et al. (2006) también presentan los resultados de análisis químicos de elementos mayores en 8 pozos de la ciudad de Artigas y el análisis isotópico de algunas perforaciones ubicadas en el área fronteriza.

Otros datos químicos preexistentes en la zona corresponden a los siguientes trabajos: Montañó y Carrión (1990), Oleaga, (2002), el Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní y análisis pertenecientes al laboratorio de OSE.

Gagliardi (2008) lleva a cabo una caracterización hidrogeológica con foco en la ciudad de Artigas, contribución que es discutida en este trabajo. Más adelante, Sapriza et al. (2011) realizan un modelo numérico de flujo del SAG en el área de aforamiento de Artigas y Quaraí y en 2015, se publica el Mapa Hidrogeológico de la Cuenca del Cuareim, a escala 1:250.000 (CPRM - DINAGUA, 2015) (Figura 16).

Ramos et al. (2015) realizan 5 sondeos audio-magneto-telúricos en el sector uruguayo de la cuenca del río Cuareim con el fin de obtener la cota superior o “techo” del SAG. Estos autores también definen una piezometría que abarcó las ciudades de Artigas y Quaraí y que posteriormente comparan con la obtenida por Silverio da Silva et al. (2006). Cabe señalar que, en esa piezometría, no se discriminaron los pozos pertenecientes al SAG de los que obtienen sus aportes de agua subterránea de los basaltos de la Formación Arapey.

Malagutti (2018) realiza un estudio hidrogeológico de toda la cuenca transfronteriza del río Cuareim/Quaraí, enfocándose en el Sistema Acuífero Guaraní y el Sistema Acuífero Serra Geral.

Aubet et al. (2018) exhiben los resultados preliminares de un estudio territorial de la zona de recarga del SAG en la zona transfronteriza de Artigas.

4.3. Vulnerabilidad y peligro de contaminación

CPRM (1997) define vulnerabilidad como el menor o mayor grado de disponibilidad que el acuífero presenta de sufrir una contaminación, lo cual puede ser de gran utilidad en trabajos de planificación de uso del territorio y de gestión de los recursos hídricos.

Silverio da Silva et al. (2006), Camponogara (2006) y Camponogara et al. (2007) realizaron estudios de vulnerabilidad en las ciudades fronterizas de Artigas y Quaraí (Brasil) utilizando el método DRASTIC y definen las áreas de mayor peligro de contaminación de las aguas subterráneas (Figura 17).

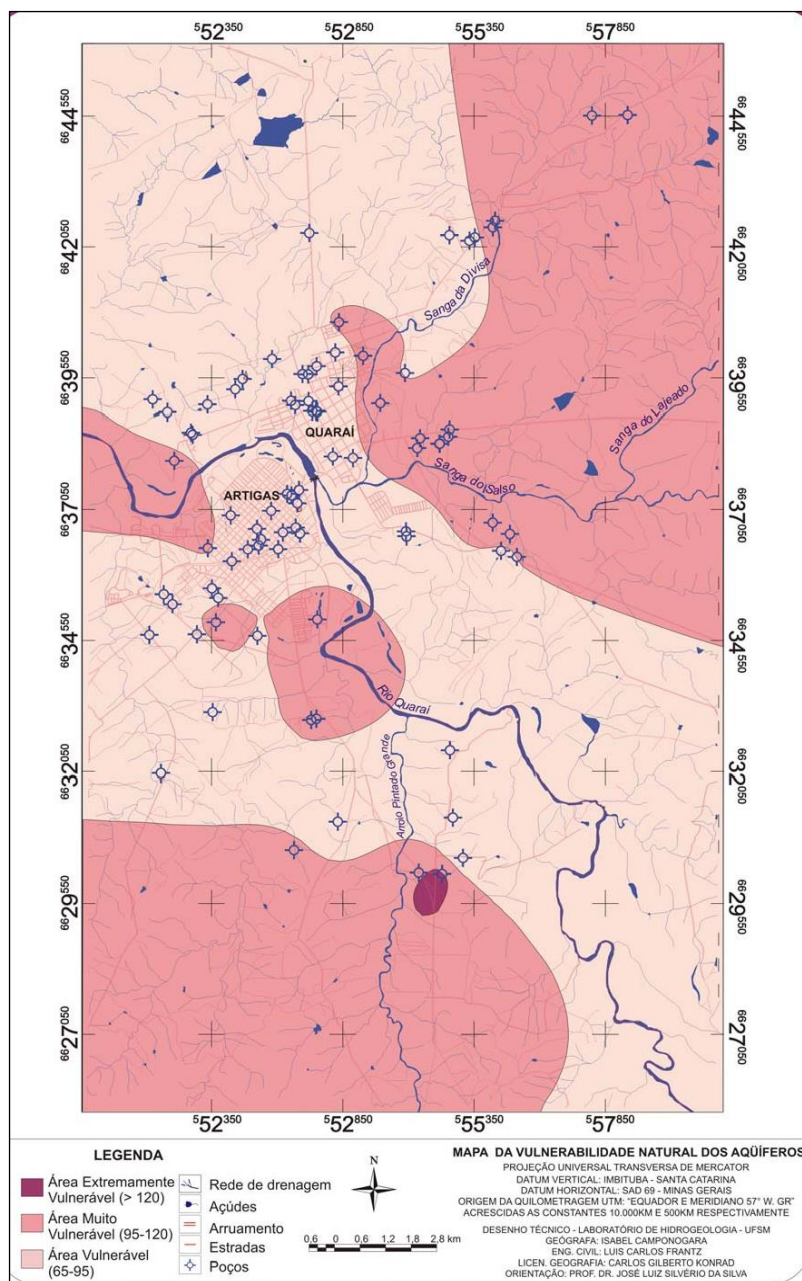


Figura 17: mapa de vulnerabilidad natural de los acuíferos en las ciudades de Artigas y Quaraí a partir de los datos de 55 perforaciones distribuidas en la ciudad de Artigas y en el Sur de la misma (Silverio da Silva et al., 2006).

Según Foster et al. (2002), el peligro de contaminación es la probabilidad de que el agua subterránea de un ac fero se contamine a concentraciones superiores a las marcadas en los lineamientos de la OMS para agua potable cuando una carga contaminante subsuperficial específica se genere en la superficie del terreno.

En el área de estudio no existen antecedentes sobre mapas de riesgo o peligro a la contaminación, ni sobre posibles fuentes contaminantes. A pesar de esto, en la zona se desarrollan varias actividades que pueden ser potencialmente contaminantes de los recursos hídricos. Como ejemplo, el área de Guayubira y La Estiva (donde predominan las areniscas), existen cultivos de tabaco, hortalizas y otros que potencialmente son fuentes de contaminación del agua subterránea al usar fertilizantes y pesticidas (Figura 18).

En relación a aspectos vinculados a contaminantes, García (2022) menciona que la mayoría de los productores tienen pozos que se encuentran a escasos metros del ambiente donde manipulan las hojas de tabaco y guardan los fertilizantes y/o se desechan los recipientes que generan un inminente peligro de contaminación. La autora constata una naturalización de dichas condiciones, integrando dicho aspecto a la vida cotidiana y no considerándolo un peligro por parte de los productores.

Otro peligro presente en los cultivos de tabaco es que contienen nicotina. Manipular el tabaco sin protección para manos, cuerpo y cara, es muy riesgoso. Por realizar la cosecha, un trabajador puede exponerse a hasta 54 mg de nicotina disuelta, lo que equivale a más de 50 cigarrillos (El Observador, 2016b). Los síntomas de la enfermedad del tabaco verde ocurren entre 3 y 17 horas después del contacto con la planta (El Observador, 2016a). La nicotina no solo presenta un riesgo para los humanos, sino que también puede llegar al agua subterránea.

Como se mencionó anteriormente, las áreas que no poseen saneamiento utilizan pozos negros que no siempre cuentan con un correcto mantenimiento o no son bien construidos.

También en las planicies aluviales del río Pintado Grande, se desarrolla cultivo de arroz bajo riego, en el período estival (diciembre a marzo), con uso de agroquímicos, en lugares donde existen sedimentos arcillo-arenosos típicos de esas planicies aluviales, también considerados vulnerables a la contaminación (Silverio da Silva et al., 2006)



Figura 18: zona de areniscas arada en la zona de Guayubira.

4.4. Gestión de los recursos hídricos

La gestión de los recursos hídricos en Artigas, así como en todo el Uruguay, es competencia del Ministerio de Ambiente a través de DINAGUA (en relación a la cantidad) y DINACEA (en relación a la calidad) y, como señalado, OSE es responsable del abastecimiento de agua a la población y por el saneamiento. Por lo tanto, si bien esta última no hace gestión del agua específicamente, está muy relacionada a la misma ya que es uno de los principales usuarios.

A la hora de la realización de perforaciones, sin importar su uso, se debe solicitar ante DINAGUA un permiso de estudio y luego de realizada la perforación se debe solicitar ante el mismo ente el derecho de uso del agua subterránea. En el capítulo 6.2.4. se tratará con mayor detalle el tema de los pozos registrados en la zona de trabajo.

En lo referido al vínculo entre el Ordenamiento Territorial y los recursos hídricos, tal como fue señalado anteriormente, el departamento de Artigas tiene un Plan Local de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible de la Ciudad de Artigas y su Microrregión aprobado en el 2014. Este documento contempla un artículo que establece una “zona de protección ambiental en pozos de agua potable en áreas cercanas a pozos de abastecimiento de agua potable y se restringe la autorización de permisos de construcción en distancias menores a 20 m, con centro en la ubicación del pozo”.

En mayo del 2019, la IMA presentó un Proyecto de Decreto Normativo de las Directrices Departamentales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible en el que se establecen dos artículos relacionados con los recursos hídricos subterráneos del departamento:

Artículo 59° Plan departamental de riego - Plan Sectorial de Aguas- El Ejecutivo Departamental deberá coordinar acciones entre los organismos del Estado competentes tendientes a impulsar la concreción del Plan departamental de riego, enmarcado en el proyecto “Agua como bien social”. Evaluar la elaboración de un Plan Sectorial de Aguas, de acuerdo a lo establecido en el Artículo 20 de la Ley 18.308 de 18 de junio de 2008, teniendo como lineamiento orientador la gestión integrada de los recursos hídricos del departamento de Artigas, y entre sus principales objetivos, el aportar un marco legal al Plan Departamental de Riego antes mencionado, la integración de los aspectos sociales, económicos y ambientales a la gestión de los recursos hídricos, la mejora de las condiciones de las áreas con potencial agrícola bajo riego, y la incorporación de la visión de Cuenca a estos procesos de planificación y desarrollo. La elaboración del Plan Sectorial de Aguas se coordinará conjuntamente con la DINAGUA, con Comisiones de Cuencas implicadas y con la Comisión del Sistema Acuífero Guaraní, entre otras instituciones involucradas en la temática.

Artículo 66° Acuífero Guaraní - Encomiéndase al ejecutivo Departamental en conjunto con la Dirección de Infraestructura Vial y de otras Direcciones con competencia en la materia, a realizar las coordinaciones con Ministerios o Entes del Estado, que tiendan a impulsar estudios del uso del Acuífero Guaraní con destino a riego agrícola. Se deberán incorporar las determinaciones territoriales surgidas desde la Comisión del Sistema Acuífero Guaraní dentro del ámbito departamental.

5. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta tesis puede resumirse en el siguiente flujograma (Figura 17). Fueron consideradas tres etapas principales para poder cumplir con los objetivos planteados. En este ítem, se detallarán las distintas actividades realizadas en cada una de estas etapas.

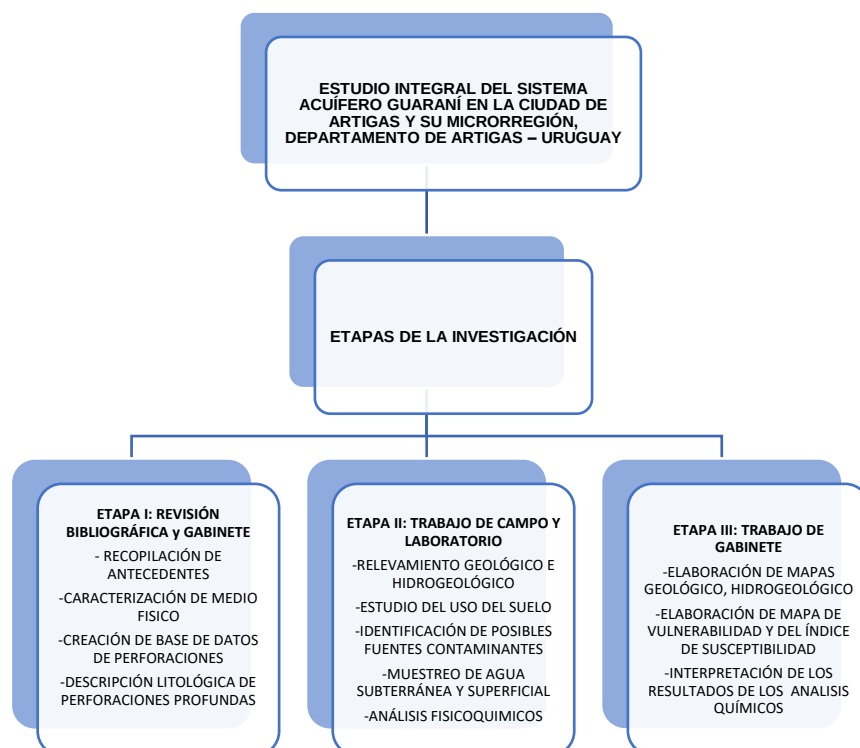


Figura 19: flujograma con la metodología utilizada en este trabajo.

5.1. Etapa I: recopilación y análisis de información

En la primera etapa de trabajo, se realizó una búsqueda bibliográfica de antecedentes relacionados al área de estudio y zonas aledañas, así como la recopilación de cartografía de la zona de trabajo, a fin de conocer los avances que se han logrado en el conocimiento geológico e hidrogeológico del área. Asimismo, se recopilaron diferentes bancos de datos con información de perforaciones, imágenes satelitales, uso del suelo y emprendimientos existentes en la zona.

La base de datos que se generó en este trabajo y que es un producto del mismo, fue formada a partir de las bases de datos existentes en DINAGUA, DINAMIGE, OSE, PRENADER, CeReGAS, ANCAP, Intendencia Departamental de Artigas, Empresa Perforista Raúl Silva y los antecedentes hidrogeológicos existentes. A estas bases, también se le agregaron los datos recopilados en campo durante los trabajos realizados.

La base de datos contiene la siguiente información: coordenadas (en UTM zona S21), código original del pozo (cuando corresponde), fuente del dato, nombre y apellido del propietario, contacto, ubicación del pozo (dirección), localidad, departamento, padrón,

empresa perforadora que construyó la perforación, profundidad del pozo, altura boca de pozo, nivel estático, nivel dinámico, nivel de succión de la bomba, niveles de aporte, caudal, diámetro tubería, existencia de filtros, tipo de filtro, uso del pozo y litología.

La calidad y confiabilidad de los datos relevados es variable, así como es heterogénea la información de cada perforación en cuanto a los datos que se tiene de cada una de ellas. Luego de eliminar datos duplicados y realizar una validación de los datos e información, se identificaron 329 perforaciones dentro de la zona de estudio (Figura 20).

Se realizó durante este trabajo, además, la descripción litológica detallada de los dos pozos profundos existentes en la microrregión: el 410 de DINAMIGE (registro que se ubica en dicha institución) y el pozo Artigas II de ANCAP (*cutting* ubicado en la litoteca del organismo). También se tuvo a disposición algunas perforaciones de OSE con *cutting* de las perforaciones a efectos de visualizar las características litológicas de las unidades atravesadas.

5.2. Etapa I: caracterización del medio físico

En esta etapa se recopiló información que permitió caracterizar el medio físico tales como: tipo de suelo, hidrología, geomorfología, información meteorológica y ecosistemas presentes.

En lo relativo a los datos de relieve y a las cotas topográficas, estos fueron extraídos del MDT (escala 1:10.000) proporcionado por el IDE, tratándose de imágenes obtenidas a partir del vuelo aerofotogramétrico realizado entre los años 2017 y 2018. El MDT de Uruguay está dividido en grillas donde cada una cubre una superficie de aproximadamente 5 km x 5 km, con una resolución espacial (tamaño de pixel) de 2,5 m.

Para cubrir el área de estudio se utilizaron 22 imágenes, las cuales fueron descargadas en formato tif y trabajadas en el programa QGIS.

Para los datos meteorológicos de la zona, se utilizaron datos de INUMET, mientras que, para datos sobre hidrología, ambiente y ecosistemas, se tomó información del Observatorio Ambiental Nacional del Ministerio de Ambiente.

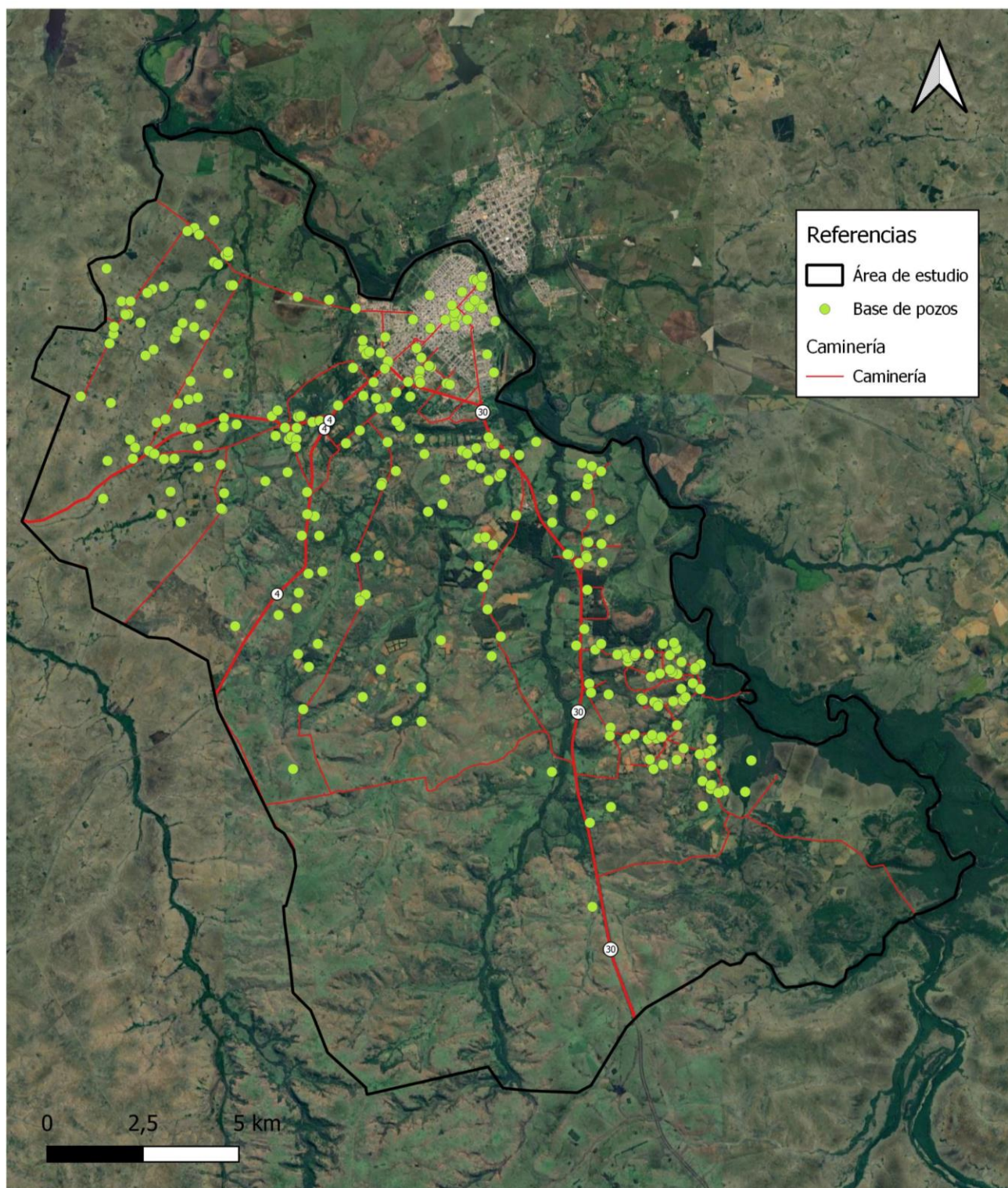


Figura 20: Ubicación de los pozos que conforman la base de datos de este trabajo.

5.3. Etapa II: análisis de suelos y uso del territorio

A partir de la capa de la Carta de Suelos de la Cuenca del Río Cuareim a escala 1:100.000 generada por Molfino et al. (2000), se elaboraron los mapas de vulnerabilidad e índice de susceptibilidad.

Para la cartografía de uso y ocupación del territorio necesaria para la construcción de los mapas de vulnerabilidad e índice de susceptibilidad se tomó como base la clasificación del proyecto MapBiomias Pampa Sudamericano (<https://pampa.mapbiomas.org/es/project>).

Para la elaboración de los mapas de uso de suelo y superficie de MapBiomias se utiliza el procesamiento en la nube y clasificadores automatizados operados desde la plataforma Google Earth Engine a partir del cual se genera una serie histórica de mapas anuales de cobertura y uso del suelo del Pampa Sudamericano. Para todos los productos de este trabajo fue utilizada la última clasificación disponible (año 2019) cuyas clases fueron definidas a escalas de trabajo compatibles con las escalas de trabajo.

5.4. Etapas II y III: relevamiento geológico y confección del mapa geológico

Se comenzó esta etapa con la interpretación de fotografías aéreas del Servicio Geográfico Militar (escala 1:40.000 y 1:20.000 en áreas específicas) e imágenes satelitales obtenidas de varias fuentes acompañando con trabajo de campo para el control de los límites de las unidades geológicas y para conocer las características litológicas de cada unidad, siguiendo la orientación metodológica del Manual de Cartografía Geológica de CPRM (CPRM, 2020).

Durante las salidas de campo, que comprendieron un total de 11 días, se levantaron 290 puntos de control que contemplaron puntos en el área de estudio y otros en zonas próximas (Figura 20). Asimismo, se realizó en territorio brasileño, un corte geológico aproximadamente NW desde la ciudad de Quaraí a efectos del reconocimiento de las unidades.

A efectos de cumplir con uno de los objetivos principales de este trabajo, mapa geológico a escala 1:50.000 de la microrregión de Artigas, se hizo énfasis en la identificación de las areniscas pertenecientes que forman parte de la Formación Arapey (intertrapps de la Formación Arapey) de aquellas que corresponden a la Formación Rivera, teniendo como criterio de separación litoestratigráfico de ambas unidades la aparición del primer nivel de basalto. Asimismo, se hizo énfasis en representar los rasgos estructurales más sobresalientes (fracturas) que se expresan a través de lineamientos morfoestructurales que controlan el relieve y drenaje, y la configuración estructural del subsuelo. Varios de estos lineamientos, constituyen fallas que compartimentan, total o parcialmente, el SAG. El foco fue puesto en la caracterización de los controles estructurales que definen los límites de la ventana del SAG y su relación con otras unidades.

Por último, y teniendo en cuenta el objetivo del trabajo y la escala adoptada, las unidades cuaternarias que conforman la cobertura sedimentaria en la región, la Formación Sopas (en el sentido de Antón, 1975 y Bossi y Navarro, 1991) sumado a los sedimentos que forman

parte de las terrazas y planicies fluviales actuales, se reunieron en una sola unidad cartográfica.

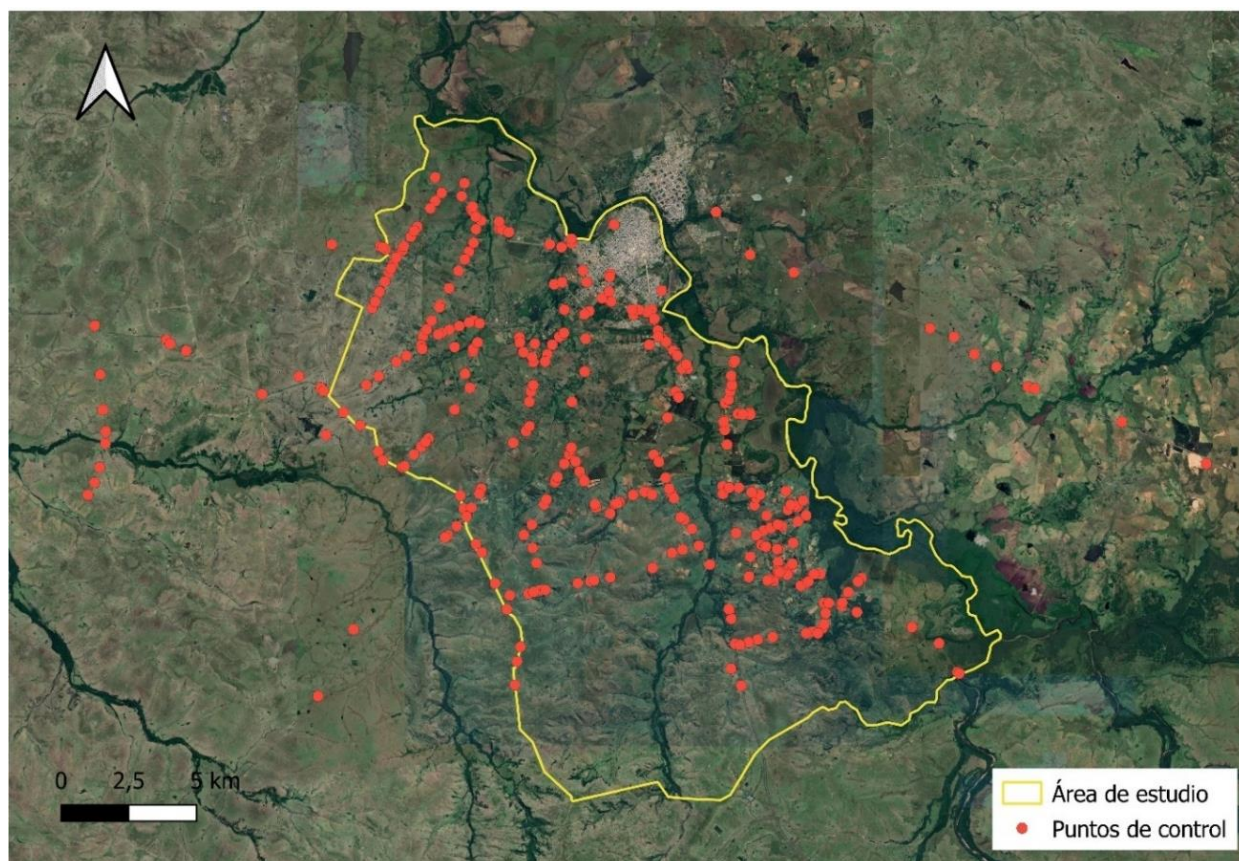


Figura 21: mapa de ubicación de los puntos de control relevados durante las salidas de campo.

5.5. Etapas II y III: estudio hidrogeológico y realización del mapa hidrogeológico

El estudio hidrogeológico tuvo como base los datos geológicos (de superficie y subsuelo) y de niveles de agua en pozos disponibles de la zona de estudio que habían sido previamente recopilados.

Esta información se complementó con trabajos de campo que incluyeron la revisión del inventario de pozos, ingreso de nuevas perforaciones (y su georreferenciación) y la toma de medidas de niveles piezométricos en algunos de los pozos que fueron muestreados.

A partir de los datos obtenidos y la información recopilada, se realizó un mapa hidrogeológico siguiendo las recomendaciones y metodología que se utilizó en el mapa de la Cuenca del Cuareim realizado durante el Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata (CPRM – DINAGUA, 2015).

A partir de dicha metodología, se establecieron dos unidades básicas de mapeo: las granulares y las fracturadas.

Estas unidades fueron luego jerarquizadas según la producción de agua, utilizándose para esto una “Tabla de Productividad Acuífera” (Struckmeier y Margat, 1995). Para su

representación en el mapa, fue utilizada la sigla de la unidad geológica seguida de un número, del 1 a 6, expresando su potencial de producción de agua (Tabla 2).

Tabla 2: clasificación de acuíferos según productividad (modificado de Struckmeier y Margat, 1995).

CRITERIOS DE CLASIFICACION DE ACUIFEROS					
Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)	Q (m ³ /h)	Clase	Productividad
≥4,0	≥10 ⁻²	>10 ⁻⁴	≥100	1	Muy alta: suministro de agua de importancia regional (abastecimiento de ciudades y grandes irrigaciones)
2,0 ≤ Q/s <4,0	10 ⁻³ ≤ T <10 ⁻²	10 ⁻⁵ ≤ K <10 ⁻⁴	50 ≤ Q <100	2	Alta: características semejantes a la clase anterior sin embargo se sitúa dentro de la media nacional de buenos acuíferos
1,0 ≤ Q/s <2,0	10 ⁻⁴ ≤ T <10 ⁻³	10 ⁻⁶ ≤ K <10 ⁻⁵	25 ≤ Q <50	3	Moderada: suministro de agua para abastecimiento local, en pequeñas comunidades, uso para irrigación en zonas restringidas
0,4 ≤ Q/s <1,0	10 ⁻⁵ ≤ T <10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ ≤ K <10 ⁻⁶	10 ≤ Q <25	4	Generalmente baja, pero localmente moderada: abastecimiento de agua para satisfacer la oferta de consumo local o privada
0,04 ≤ Q/s <0,4	10 ⁻⁶ ≤ T <10 ⁻⁵	10 ⁻⁸ ≤ K <10 ⁻⁷	1 ≤ Q <10	5	Por lo general muy baja, pero localmente baja: suministro continuo de agua es apenas garantizado
<0,04	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁸	<1	6	Poco productivo o No acuífero: suministro insignificante de agua. Suministro restringido al uso de bombas de mano.

Las unidades aflorantes relacionadas a acuíferos o a no-acuíferos, son representadas por un color determinado de acuerdo con la leyenda internacional. Los acuíferos granulares se representan por el color azul y los acuíferos fracturados por el color verde (Figura 22).

En el caso de estudio las formaciones Rivera y Tacuarembó, los depósitos aluviales y coluviales (Cuaternario) y las areniscas interbasálticas fueron consideradas acuíferos granulares por lo cual se representaron en el mapa hidrogeológico con diferentes tonalidades de azul según su productividad. En el caso de la Formación Arapey, esta se consideró acuífero fisurado y se representó en el mapa con el color verde.

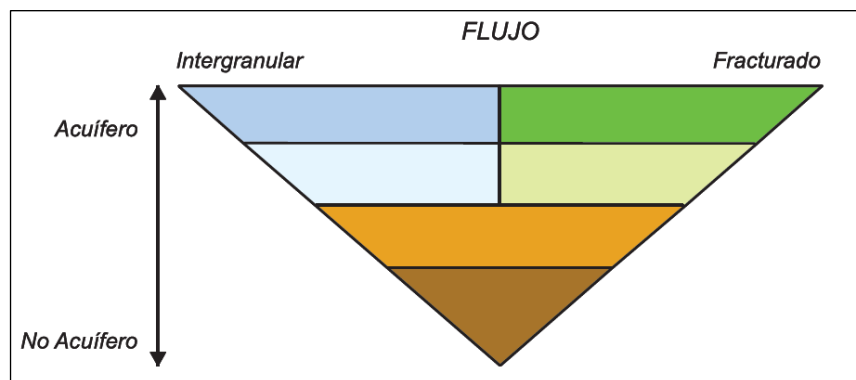


Figura 22: diagrama de clasificación de las unidades y los colores de representación correspondientes (modificado de Struckmeier y Margat, 1995).

Cuando se dieron acuíferos superpuestos, se insertó la sigla del acuífero subyacente más productivo, por debajo de la del acuífero aflorante.

En resumen, para la confección de la carta hidrogeológica del área de estudio se utilizaron dos criterios de clasificación. Por un lado, se separaron con diferente color los Dominios Hidrogeológicos y, por otro lado, se colocó un código alfanumérico según las diferentes las Unidades Hidroestratigráficas y su productividad. Para asignar la productividad a dichas unidades se utilizó la información hidráulica de las perforaciones existentes en el área y algunos valores tomados de antecedentes.

También se seleccionaron algunos pozos representativos de cada unidad y se colocaron en el mapa. En función de la información disponible, en algunos de esos pozos se colocó su profundidad, caudal específico, pH y conductividad medidos *in situ* (Figura 23). En otros pozos se colocó un perfil litológico esquemático, siguiendo la guía de colores utilizada en el mapa geológico.

Pozos representativos 	
Profundidad (m)	Caudal específico (m ³ /h/m)
pH	Conductividad (μS/cm ²)

Figura 23: representación en el mapa hidrogeológico de los pozos.

La estimación de la dirección de flujo del agua subterránea del SAG se elaboró a partir de la selección de 90 pozos históricos (pertenecientes a las bases de datos recopiladas) que contaban con datos de nivel estático (en la mayoría de los casos ese dato fue obtenido enseguida de construido el pozo). Estos pozos fueron planteados en el MDT brindado por el IDE para extraer las cotas topográficas a las cuales se encontraban cada uno de esos pozos y luego fue realizada la correlación con la cota del nivel de agua en el pozo (nivel estático corregido). Posteriormente, con esos datos, se definieron las isopiezas que permitieron conocer el sentido y dirección del flujo subterráneo. Cabe destacar que la estimación de dirección de flujo fue únicamente hecha para el sector donde se encuentra la ventana del SAG.

Cabe aclarar que para realizar esta estimación se colocaron 5 puntos de control en la red hidrográfica del área.

5.6. Etapas II y III: caracterización química del agua subterránea y superficial

Durante este trabajo se tomaron 13 muestras de agua subterránea en perforaciones seleccionadas y se realizaron análisis químicos para caracterizar los acuíferos. La selección de las perforaciones a muestrear fue realizada de tal manera que se pudieran tener muestras de pozos que, por su perfil constructivo y litológico, esté definido de qué nivel reciben el aporte de agua, ya sea de basalto, del SAG o de ambas unidades.

Los valores obtenidos fueron luego comparados con datos de análisis químicos de trabajos preexistentes para visibilizar posibles variaciones y para tener datos en lugares donde no fue posible muestrear.

Asimismo, se muestrearon cinco cursos superficiales representativos para conocer si existe alguna relación entre los recursos hídricos subterráneos y superficiales.

En la Figura 24 se puede observar la ubicación de los puntos muestreados, la terminología AP significa que allí se muestreó agua de pozo, mientras que AS significa que el muestreo fue de agua superficial.

Para el muestreo de pozos pertenecientes a particulares, se prendió la bomba del pozo y se dejó salir agua por la salida más cercana a la perforación por aproximadamente 10 minutos para obtener una muestra lo más representativa posible, en el caso de pozos de OSE no se consideró esa maniobra al ser pozos en explotación (Figura 25).

Para los cursos superficiales, la muestra se tomó desde la orilla de los mismos, a contracorriente y evitando zonas donde el agua estuviera estancada o con algas (Figura 25).

Se realizaron determinaciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura *“in situ”* en 21 pozos, mediante un analizador manual de lectura digital marca Extech ExStik.

Los análisis de los parámetros fisicoquímicos tanto de agua superficial como de agua subterránea se realizaron en el Laboratorio de Aguas y Suelos de CENUR Salto. Las técnicas analíticas utilizadas fueron las indicadas en los Métodos normalizados para Aguas potables y residuales – APHA-AWWA-WPCF. 23Ed. 2017. (Alcalinidad APHA_2320-B; Conductividad eléctrica APHA_2520-B; Sólidos totales disueltos APHA_2540-C; Cromatografía iónica APHA_4110-B; Dureza APHA_2340-B).

Se analizaron los siguientes elementos: cloruros, nitratos, sulfatos, nitrito, fluoruro, bromuro, fosfato, bicarbonato, carbonato, sodio, potasio, magnesio, calcio, litio y amonio.

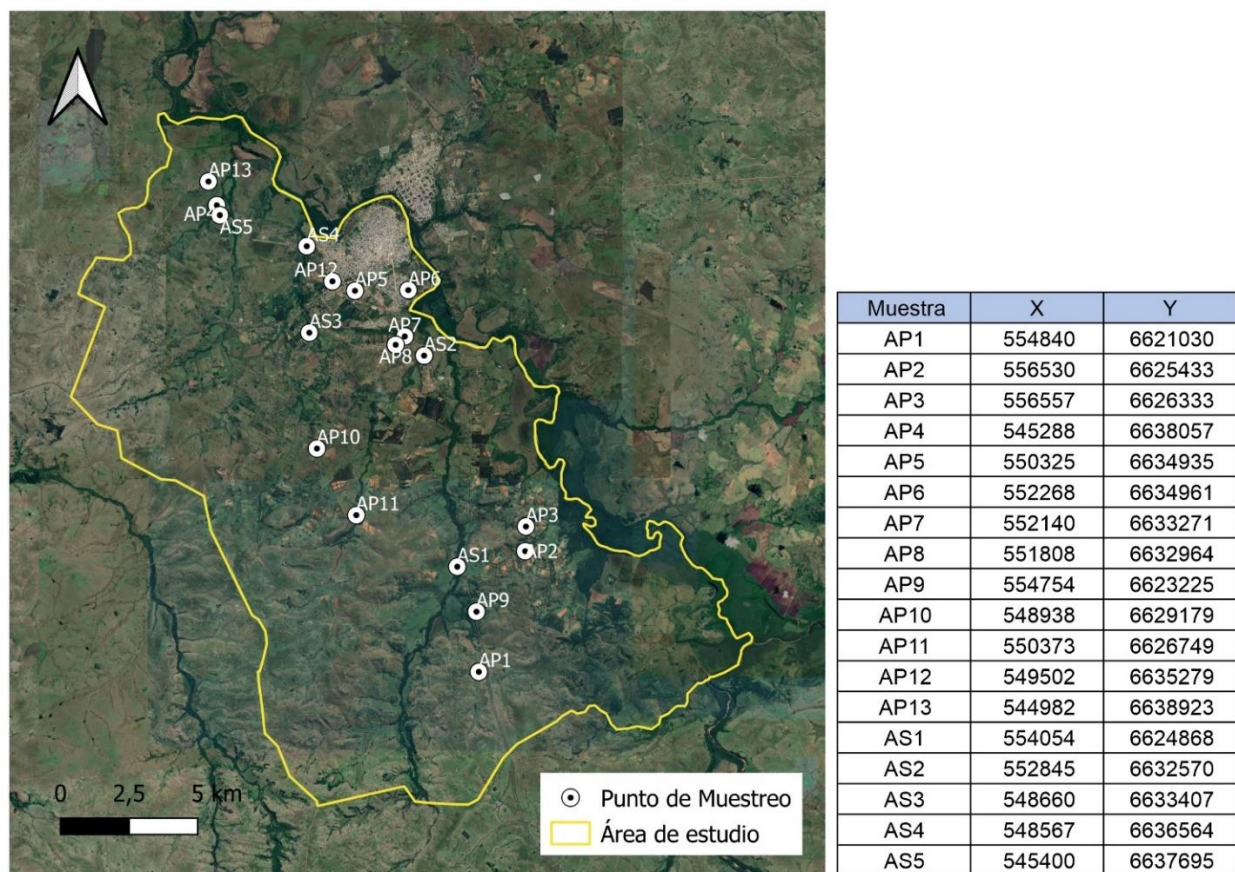


Figura 24: mapa de ubicación de los puntos de muestreo de agua superficial y subterránea en este trabajo. Las coordenadas UTM corresponden a la zona S21.



Figura 25: A: muestreo de un pozo en la zona de Pintadito. B: muestreo del arroyo Pintadito al Sur de la ciudad de Artigas.

Los resultados de los análisis fueron colocados en los diagramas de Stiff y de Piper que son utilizados puntualmente para el análisis de agua subterránea.

El diagrama de Piper se utiliza ampliamente para comprender los problemas relativos a la evolución geoquímica de las aguas subterráneas. Este diagrama consta de tres campos distintos que incluyen dos campos triangulares y uno en forma de diamante. Los cationes expresados como porcentaje del total de cationes en meq/l como un único punto en el triángulo de la izquierda mientras que los aniones se representan en el triángulo de la derecha (Piper, 1944). A continuación, cada punto se proyecta en el campo superior a lo largo de una línea paralela al margen superior del campo y el punto donde se cruza la extensión indica el carácter del agua representado por la relación entre los iones Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , CO_3^{--} + HCO_3^- , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$.

Las similitudes y diferencias entre las muestras de agua subterránea pueden revelarse a partir del diagrama trilineal, ya que el agua de cualidades similares tenderá a trazarse junta como grupos. Para la construcción de los diagramas se han utilizado planillas de cálculo y el programa *Diagrammes* desarrollado por la Universidad de Avignon.

Otro de los diagramas utilizados en hidrogeoquímica es el diagrama de Stiff (1951) que se trata de una representación gráfica de la composición de los iones mayoritarios en una muestra. La forma del polígono es creada a partir de la unión de dichas concentraciones sobre tres ejes horizontales extendidos a cada lado de un eje vertical.

Los cationes son expresados en miliequivalentes por litro en el lado izquierdo del eje vertical, uno en cada eje horizontal. Los aniones de igual forma, en el lado derecho.

5.7. Etapas II y III: estudio de la vulnerabilidad y protección del acuífero

Tomando como base el estudio geológico e hidrogeológico realizado durante este trabajo, se analizó la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a partir de diferentes metodologías las cuales fueron comparadas y analizadas.

Durante esta etapa se utilizaron los índices GOD (Foster, 1987) y DRASTIC (Aller et al., 1987) generando mapas de vulnerabilidad del acuífero a partir de cada uno de estos métodos.

Teniendo en cuenta las amenazas de contaminación identificadas y tomando como base los mapas de vulnerabilidad, se realizó un mapa de índice de susceptibilidad a la contaminación, lo que permitió conocer zonas más susceptibles a ser contaminadas teniendo en cuenta las actividades antrópicas.

La interpretación integrada de esta información permitirá establecer medidas de protección para promover la protección de la calidad del agua en el acuífero y en los pozos.

Como se mencionó anteriormente, para establecer la vulnerabilidad de los acuíferos se utilizaron los métodos GOD y DRASTIC. En ambos casos, fueron utilizados los diferentes productos temáticos elaborados en este proyecto para la aplicación de los métodos de construcción de los mapas de vulnerabilidad (MDT, Carta Geológica, Mapa de Suelos, Mapa de Dirección de Flujo).

El método GOD se aplica habitualmente como primer paso para la determinación del peligro de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades y determina la vulnerabilidad intrínseca, sin tomar en cuenta el tipo de contaminante que pueda afectar el acuífero. Los factores considerados para la evaluación de la vulnerabilidad son: el tipo de acuífero (G), el tipo de la zona no saturada (O) y la profundidad del nivel del agua o nivel freático (D), asignándole valores entre 0 y 1 a estas tres variables.

El tipo de acuífero (G) se clasifica entre 0 y 1, tomando 0 para no acuífero o surgente y 1 para no confinado, la litología de zona no saturada (O) toma valores entre 0.4 y 1 variando entre arcillas y gravas para rocas no consolidadas y calcáreos para consolidados y el nivel del agua o freático (D) toma valores entre 0.6 y 1 según la profundidad del mismo.

Los valores para los parámetros GOD utilizados en este trabajo pueden observarse en las tablas 3 y 4:

Tabla 3: valores atribuidos a los factores tipo de acuífero (G) y litología de la zona no saturada (O), para las unidades geológicas presentes en el área de estudio.

Formación	G	O
Planicies aluviales	1	0.75
Arapey	0.5	0.8
Arapey areniscas <i>intertrapps</i>	0.5	0.8
Rivera	1	0.75
Tacuarembó	0.9	0.7

Tabla 4: valores atribuidos al parámetro D, según la profundidad a la que se encuentre el agua subterránea.

Profundidad del agua (m)	D
< 5	0.9
5 a 20	0.8
20 a 50	0.7
> 50	0.6

En la siguiente tabla se pueden observar los intervalos de vulnerabilidad y el grado de vulnerabilidad correspondiente a cada uno según el método GOD (Tabla 5).

Tabla 5: clasificación de grados de vulnerabilidad según intervalo del método GOD obtenido.

Grado de vulnerabilidad	Intervalos de los índices GOD
Despreciable	0.0 – 0.1
Baja	0.1 – 0.3
Media	0.3 – 0.5
Alta	0.5 – 0.7
Extrema	0.7 – 1.0

El método DRASTIC fue desarrollado por Aller et al. (1987) para la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos, constituyendo un modelo cualitativo para evaluar la contaminación potencial de las aguas subterráneas utilizando variables hidrogeológicas.

Este método toma un mayor número de parámetros, comparado con el GOD, para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero. Los factores considerados son: (D) profundidad del nivel estático, (R) recarga efectiva, (A) litología del acuífero, (S) tipo de suelo, (T) topografía del terreno, (I) litología de la zona no saturada (zona vadosa) y (C) conductividad hidráulica del acuífero.

Para cada uno de los factores nombrados, se asigna un peso que está relacionado con la mayor o menor importancia que se le atribuye al factor en la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero (Tabla 6).

Tabla 6: factores considerados dentro del método DRASTIC y el peso correspondiente a cada uno.

Factores DRASTIC	Peso
D – Profundidad de las aguas subterráneas (<i>Depth to water</i>)	5
R – Recarga total (<i>Recharge</i>)	4
A – Medio acuífero (<i>Aquifer media</i>)	3
S – Suelos (<i>Soil media</i>)	2
T – Topografía (<i>Topography</i>)	1
I – Impacto de la zona vadosa (<i>Impact of the vadose zone</i>)	5
C – Conductividad hidráulica (<i>Hydraulic conductivity</i>)	3

A continuación, se presentan diferentes tablas con los valores utilizados para el cálculo de cada uno de los parámetros requeridos para la aplicación del método DRASTIC en el área de estudio.

Factor D: profundidad del nivel estático

Tabla 7: rangos de valores de profundidad del agua subterránea y la valoración asignada a cada uno de ellos (Barbulescu, 2020).

Profundidad del agua subterránea (m)	Valoración (Dr)
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
>30,5	1

Factor R: recarga efectiva - La estimación de la recarga neta es un fenómeno complicado e involucra una serie de variantes que dificultan la estimación. En este trabajo se utilizó la Recarga Potencial para el cálculo, que se trata de una metodología empleada por Santarosa et al. (2021) para estimar la recarga en el área de afloramiento de un sector del SAG en el estado de San Pablo (Brasil).

En este método, las tasas de recarga se estiman utilizando el método de recarga espacial (SR). Este método utiliza la combinación de datos de sensores remotos climáticos como la distribución espacial de la evapotranspiración y la precipitación, con la escurrimiento según el método empírico del *Soil Conservation Service* (SCS) para crear un balance hídrico espacial y calcular la recarga potencial a gran escala.

Santarosa et al. (2021) comparan los valores obtenidos en el método SR en San Pablo, con otros dos métodos tradicionales (separación del flujo base y método de fluctuación del nivel freático) obteniendo valores similares, lo cual valida y consolida el método.

La principal ventaja del método SR es la posibilidad de estimar patrones de recarga regionales basados en la variabilidad natural de los procesos hidrológicos en toda el área. Los métodos tradicionales mencionados anteriormente, requieren estaciones de monitoreo y, en cambio, proporcionan estimaciones de recarga válidas específicas para áreas restringidas (Santarosa et al. 2021).

Para este trabajo y a pesar de sus limitaciones intrínsecas, el método SR permitió una estimación robusta de la recarga con la capacidad de hacer frente a las variaciones

espaciales y temporales (20 años), especialmente en la región de estudio que carece de planes de monitoreo hidrológico.

Tabla 8: rangos de valores atribuidos a la recarga y la valoración asignada a cada uno de ellos (Barbulescu, 2020).

Recarga (mm/año)	Valoración (Rr)
0 – 50.8	1
50.8 – 101.6	3
101.6 – 177.8	7
177.8 – 254	8
>254	9

Factor A: litología del acuífero – Para la definición de este factor se tuvo en cuenta el mapa geológico realizado durante este trabajo.

Tabla 9: rango de valores asignados según las diferentes litologías observadas (A).

Tipo de acuífero	Rango de clasificación (Ar)
Lutita masiva	1 – 3
Metamórfica/Ígneas	2 – 5
Metamórficas/ ígneas metamorfizadas	3 – 5
Till Glacial	4 – 6
Secuencias de areniscas, caliza y lutitas	5 – 9
Arenisca masiva	4 – 9
Caliza masiva	4 – 9
Arena o grava	4 – 9
Basalto fracturado	2 – 10
Caliza kárstica	9 – 10

Factor S: tipo de suelo - Para la clasificación de este parámetro se utilizó como base la Carta de Suelos de la Cuenca del Río Cuareim, a escala 1:100.000 y se reclasificó en función de las clases texturales presentadas en la Tabla 10.

Tabla 10: diferentes tipos de suelo que pueden presentarse y la valoración atribuible a cada uno.

Tipo de suelo	Valoración (Sr)
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol	2
Arcilla no compactada	1

Factor T: topografía del terreno - Para la determinación de este factor se confeccionó el mapa de pendientes el cual se generó a partir del MDT disponible en IDEuy.

Tabla 11: rango de valores de pendientes (%) y la valoración asignada a cada uno de ellos (Barbulescu, 2020).

Pendiente (%)	Valoración (Tr)
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

Factor I: litología de la zona no saturada (zona vadosa) - Para el factor I se asumió igual valor que establecido para A.

Tabla 12: valores atribuibles al factor litología de la zona no saturada (I) según el material que la compone.

Material de la zona no saturada	Valoración (Ir)
Capa confinante	1
Limo-arcilla	2 – 6
Lutita	2 – 5
Caliza	2 – 7
Arenisca	4 – 8
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8
Arena o grava con contenido de limo y arcilla significativo	4 – 8
Metamórfica/ígneas	2 – 8
Grava y arena	6 – 9
Basalto	2 – 10
Caliza kárstica	8 – 10

Factores A e I adaptados a las unidades geológicas de la zona de trabajo

Tabla 13: valores adaptados a la zona de estudio para los factores litología del acuífero (A) y litología de la zona no saturada (I).

Formación	A	I
Planicies aluviales/sedimentos cuaternarios	7	7
Arapey	4	4
Arapey areniscas <i>intertrapp</i>	4	4
Rivera	7	6
Tacuarembó	6	6

Factor C: conductividad hidráulica del acuífero - Para el caso de la conductividad hidráulica del Acuífero Guaraní, se contempló la conductividad hidráulica determinada por Gagliardi (2008) quien la sitúa entre 0,3 y 4,7 m/día con una media de 1,5m/día.

Tabla 14: valoración atribuible al factor (C) según la conductividad hidráulica del acuífero.

Conductividad hidráulica (m/día)	Valoración (Cr)
0 – 4	1
4 – 12	2
12 – 28	4
28 – 41	6
41 – 82	8
> 82	10

Todos los factores nombrados se combinaron entre sí por medio de la siguiente ecuación que determina el índice DRASTIC:

$$ID = D_R * D_W + R_R * R_W + A_R * A_W + S_R * S_W + T_R * T_W + I_R * I_W + C_R * C_W$$

donde: R: Rango y W: Peso

En la siguiente tabla se pueden observar los intervalos de vulnerabilidad utilizados en este trabajo y el grado de vulnerabilidad correspondiente a cada uno.

Tabla 15: clasificación de los diferentes grados de vulnerabilidad encontrados según el intervalo del método DRASTIC al cual corresponda.

Grado de vulnerabilidad	Intervalos de los índices DRASTIC
Muy bajo	23 -64
Bajo	65 – 105
Moderado	105 – 146
Alto	147 – 187
Muy alto	≥ 188

5.8. Etapas II y III: estudio del peligro de contaminación e índice de susceptibilidad

Según Foster et al. (2002) para conocer el peligro de contaminación del agua subterránea se parte del análisis de la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y la carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada al ambiente sub-superficial como resultado de la actividad humana que ocurre en la superficie del suelo.

Las fuentes de contaminación que generan las cargas contaminantes pueden ser difusas o puntuales. Como actividades contaminantes difusas se destacan las actividades agrícolas a través de la utilización de fertilizantes y agroquímicos, y de las prácticas inadecuadas en la tierra. Las fuentes de contaminación difusas no generan plumas de contaminación claramente definidas, pero, normalmente afectan un área mucho mayor del acuífero (ENGECORPS, 2014).

Por otro lado, las fuentes puntuales de contaminación están asociadas a actividades industriales, comerciales y de servicios que generalmente están instaladas en las regiones urbanas, así como todo lo relacionado al saneamiento y disposición de residuos (PEA, 2009). En estos casos, las plumas de contaminación originadas a partir de fuentes puntuales son más concentradas, resulta más fácil su definición e identificación, y hasta algunas veces su control y remediación (ENGECORPS, 2014).

Para estudiar el peligro a la contaminación, se optó por utilizar el método Índice de Susceptibilidad (IS) desarrollado por Ribeiro (2000), que es una adaptación del método DRASTIC y fue desarrollado originalmente con la intención de evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación agrícola difusa. La principal diferencia con el método DRASTIC es la suma de un parámetro que define la cobertura del suelo, considerando así la actividad antrópica que existe por encima del acuífero.

El Índice de Susceptibilidad considera las propiedades específicas del acuífero, como las características hidrogeológicas y geomorfológicas modelando estos parámetros con la adición del parámetro de ocupación del suelo (Land Use, LU). Ribeiro (2000), Ribeiro (2005) y Stigter et al. (2006) intentan corregir a través del IS las deficiencias del método DRASTIC, superando la redundancia de resultados entre los parámetros y el sistema de ponderación.

Para determinar el IS (índice de susceptibilidad), se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de Susceptibilidad (IS)} = 0,186D + 0,212R + 0,256A + 0,121T + 0,222LU$$

la cual se introdujo mediante la herramienta *Raster Calculator* dentro del programa QGIS. Los factores considerados en la ecuación corresponden a los mismos utilizados en el método DRASTIC: (D) profundidad del nivel estático, (R) recarga efectiva, (A) litología del acuífero, y (T) topografía del terreno, sumándole el factor uso de suelo y superficie (LU). El LU se basa en los datos detectados de todas las formas de vegetación, tanto en bosques naturales como en áreas seminaturales, además de los entornos urbanos, de pastos y acuáticos, entre otros. En este caso se reconvirtieron las clases de la base del mapa de uso de suelo y superficie de MapBiomias Pampa en las clases designadas por Stigter et al. (2006) (Tabla 16).

Las fuentes de contaminación identificadas en la zona de trabajo fueron georreferenciadas, dando lugar a un inventario de potenciales cargas contaminantes al subsuelo. Producto de la superposición del mapa de vulnerabilidad con el mapa del inventario de fuentes contaminantes, se obtuvo una representación cartográfica del peligro de contaminación del agua subterránea del área (Tabla 17).

Tabla 16: clasificación de la cobertura del suelo (Stigter et al., 2006).

Áreas Agrícolas	
Perímetros de riego	90
Cultivos permanentes	70
Zonas agrícolas heterogéneas	50
Zonas de pasturas y agroforestales	50
Áreas Artificiales	
Vertido de residuos industriales, vertederos	100
Canteras, minas a cielo abierto	80
Áreas urbanas continuas, aeropuertos, caminos, áreas industriales y comerciales	75
Áreas urbanas discontinuas	70
Áreas naturales	
Ambientes acuáticos	50
Bosques naturales y zonas semi-naturales	0
Cuerpos de agua	0

Tabla 17: rangos del Índice de Susceptibilidad y su vulnerabilidad asociada

Intervalos del índice de susceptibilidad	Grado de vulnerabilidad
80 - 90	Muy alto
70 - 80	Alto
60 - 70	Moderado a alto
50 - 60	Moderado a bajo
40 - 50	Bajo
30 - 40	Muy bajo
< 30	Extremadamente bajo

6. RESULTADOS

6.1. Geología

En la Figura 26 se puede observar en mapa geológico a escala 1:50.000 realizado durante este trabajo.

En el área de estudio afloran las formaciones Rivera (areniscas - Cretácico Inferior) y Arapey (basaltos y basaltos a los que se intercalan areniscas - Cretácico Inferior) así como una cobertura sedimentaria cuaternaria que reúne a los sedimentos de origen continental, fosilíferos, de la Formación Sopas (Antón, 1975) y a los sedimentos más jóvenes que conforman las terrazas y planicies asociados a los principales cursos de agua (arenas, gravas, arcillas -a veces con alto contenido de materia orgánica).

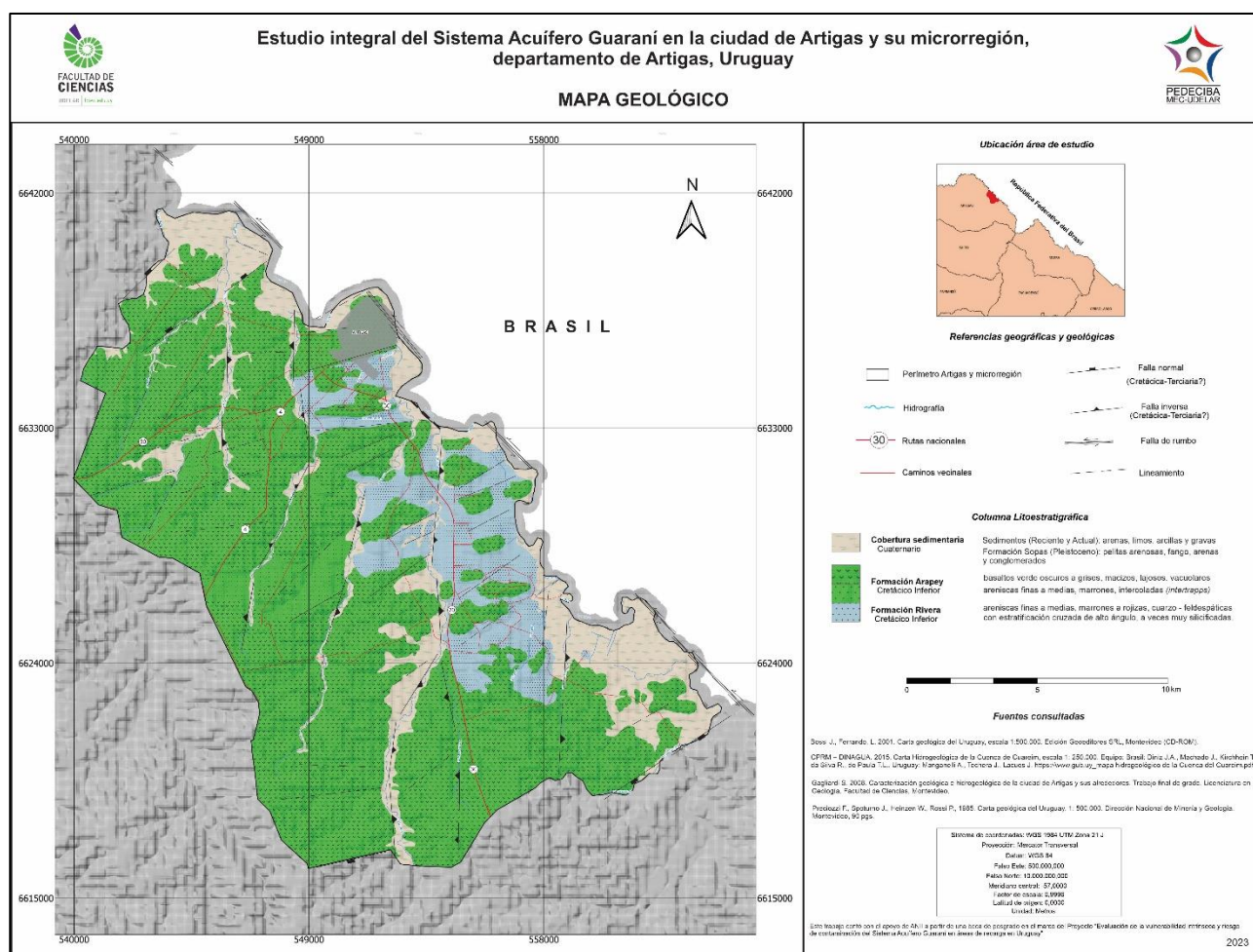


Figura 26: mapa geológico de la zona de estudio elaborado durante este trabajo. Anexo B.

Los asomos de las areniscas de la Formación Rivera en la región basáltica están asociados a un conjunto de controles estructurales (la mayoría asociados a fallamientos NW y N10 a N30°) que delimitan el bloque elevado que exhuma a estas areniscas en el área de estudio. La actuación de procesos erosivos en este bloque aún permite observar la presencia de

algunos relictos de basaltos sobre las areniscas, situación que configura la denominada “ventana de Artigas”. Este asomo de areniscas de la Formación Rivera se observa, asociado al mismo bloque, en los alrededores de la vecina ciudad de Quaraí (Br).

En el subsuelo del área de estudio, la naturaleza del relleno en este sector se conoce a través del pozo Artigas que atraviesa las secciones mesozoicas y neopaleozoicas de la Cuenca Norte hasta alcanzar el basamento cristalino a los 1850 m de profundidad.

La Formación Rivera en el área de estudio está representada por areniscas medias y medias a finas, con grado de selección bueno a regular, de tonalidades naranjas a naranjas rojizos, con estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte (Figura 27A). Generalmente se trata de areniscas friables a poco consolidadas a levemente cementadas con óxido de hierro en forma de pátina que recubre los granos, lo cual les brinda el color característico de las areniscas de la unidad (Figura 27B). Sin embargo, también se reconocieron situaciones donde las areniscas presentan una intensa silicificación, situación que en general, ocurre próximo al contacto con los basaltos suprayacentes (Figura 28).

Cabe señalar que, por las características sedimentológicas de las areniscas, no son frecuentes los afloramientos de buen porte que permitan visualizar con claridad sus principales aspectos geológicos. Sin embargo, en la zona de Guayubira y La Estiva, donde además de exposiciones naturales existen varias canteras donde se extrae material para vialidad, se pueden describir perfiles de más de 5 m de exposición de las areniscas de la Formación Rivera. En este sector del área de estudio, es donde se observa con claridad las características sedimentológicas típicas de la unidad, así como el desarrollo de la estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte y, en algunos casos, la presencia de gradación inversa en las láminas de la estratificación cruzada (Figura 27C).

Las relaciones estratigráficas de las areniscas de la Formación Rivera son de discordancia con su infrayacente, la Formación Tacuarembó. Esta situación se reconoce por el importante contraste litológico existente entre ambas unidades y puede ser constatado en las perforaciones Artigas y 410. Por otro lado, las areniscas aparecen generalmente cubiertas por los basaltos de la Formación Arapey, situación que se constata en las perforaciones estudiadas, así como en la “ventana” donde en ocasiones sobreviven relictos de basaltos. En esta última situación, las areniscas de la Formación Rivera también aparecen cubiertas por sedimentos, del reciente y actual, de diferente naturaleza que corresponden a gravas, arenas, limos y arcillas depositadas por coluviones y aluviones.

Las características sedimentológicas (aspectos texturales, composicionales y estructuras sedimentarias) presentes en la unidad permiten ser interpretadas como depósitos eólicos asociados a dunas de tipo barjanoide. La potencia máxima de la unidad en el área de estudio es de aproximadamente 40 m tal como se pudo observar en las muestras de los pozos de OSE 1.4.018 y 1.4.019 a las que se pudo tener acceso y en las descripciones ya existentes de algunos pozos (Figura 29).

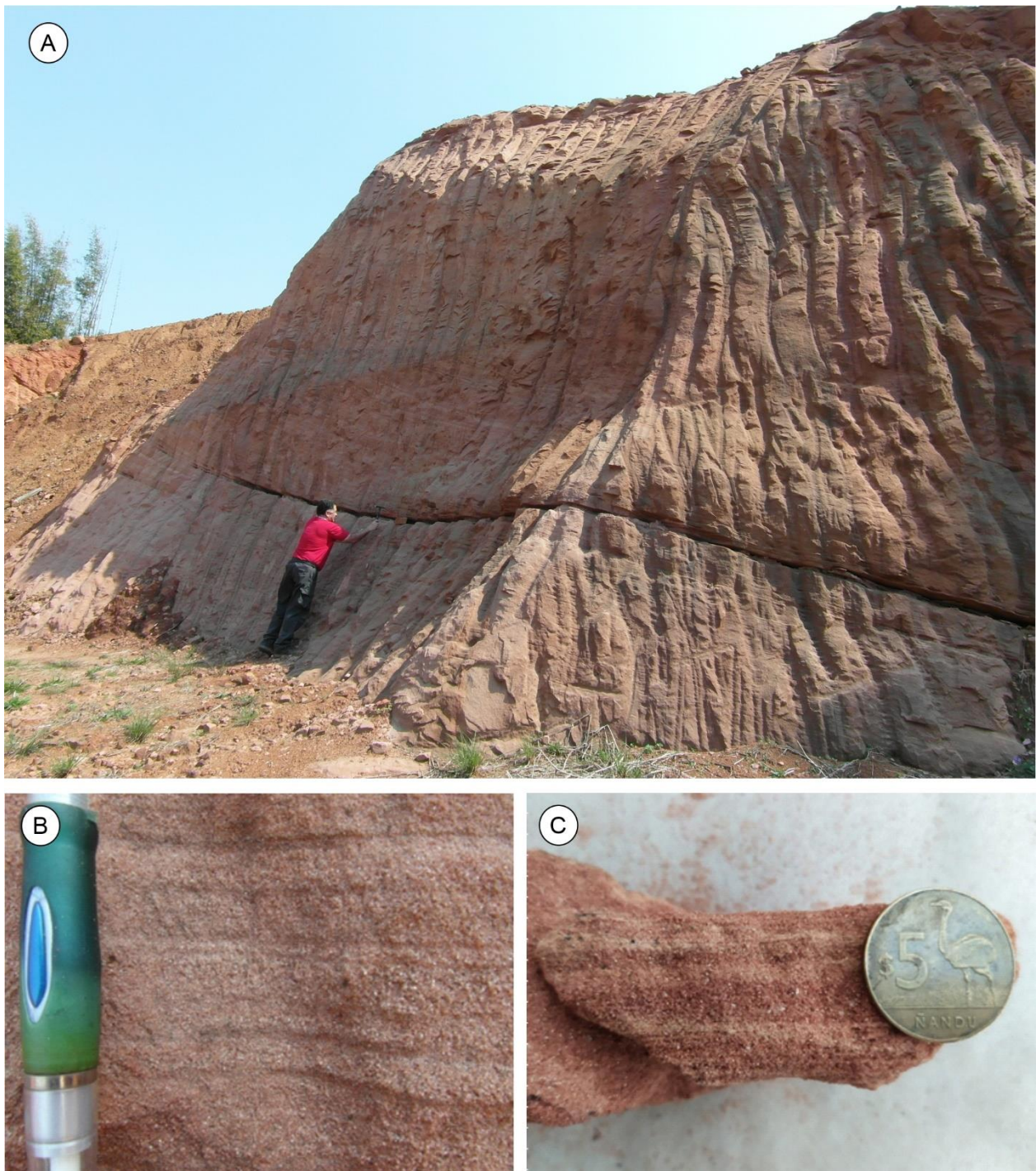


Figura 27: Formación Rivera aflorante en la zona de Guayubira. A: cantera para extracción de arena (X: 556122, Y: 6625531). Se observa en el perfil dos sets de areniscas media a finas con estratificación cruzada típica de la unidad. B: areniscas laminadas pertenecientes a la Formación Rivera. C: gradación inversa de los clastos intralámina, típica estructura sedimentaria asociada a los procesos de depositación eólica.



Figura 28: contacto entre el basalto de la Formación Arapey y las areniscas de la Formación Rivera en una cantera en la zona de Guayubira (X:555953, Y:6625595). Las areniscas próximas al contacto están fuertemente silicificadas y, parcialmente, enmascaran la estratificación cruzada de alto ángulo y gran porte que muestra la unidad en toda el área.

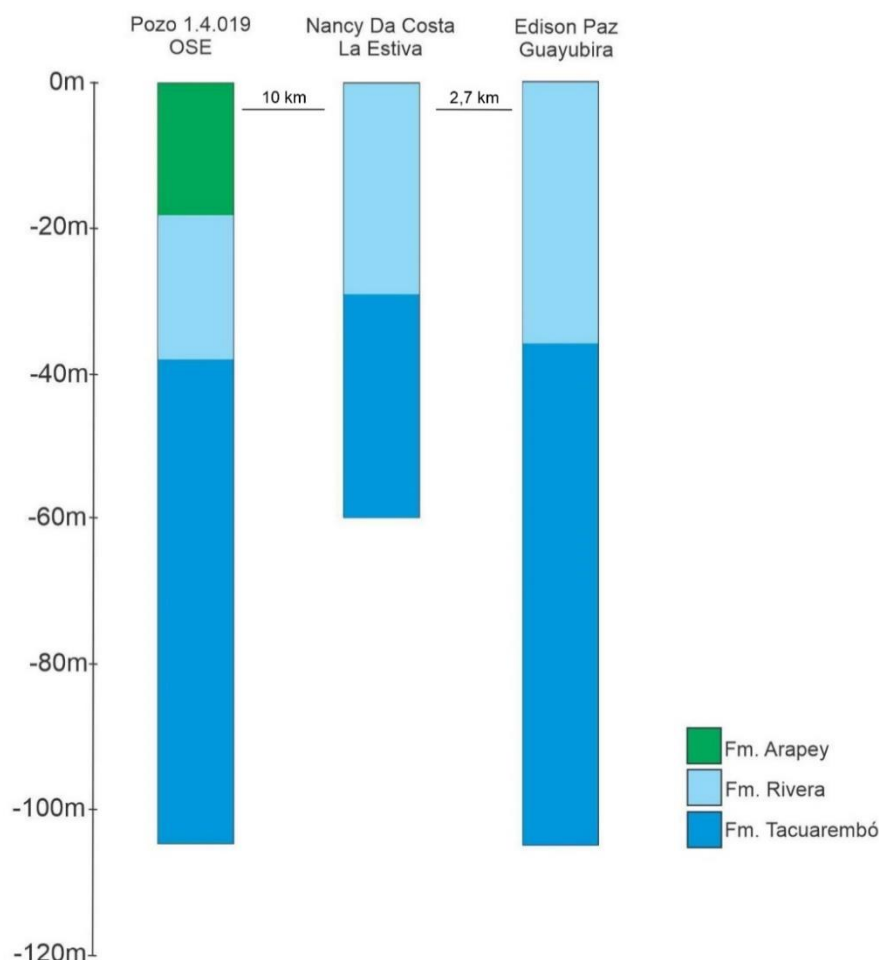


Figura 29: perfiles litológicos de algunas de las perforaciones que exhiben el contacto entre la Formación Rivera y la Formación Tacuarembó. Se indica la distancia (en línea recta) que separa a los pozos. El espesor máximo de la Formación Rivera no supera los 40 m en el área de trabajo.

La Formación Tacuarembó fue reconocida en el *cutting* de los pozos más profundos: 410 (IGU - DINAMIGE), 1.4.016 (OSE) y ARTIGAS (ANCAP).

En la perforación 410 donde se describió una sucesión de areniscas de 242 m atribuidas a la Formación Tacuarembó, por debajo de 44 m de areniscas de la Formación Rivera (Figura 30).

En el pozo 1.4.016 de OSE, los registros estudiados también evidencian la presencia de 202 m de areniscas atribuibles a esta unidad sin posibilidad de separarlas de las areniscas de la Formación Rivera por no haber podido acceder al registro litológico de sus primeros tramos.

En el pozo Artigas de ANCAP, situado al Sur del barrio Pintadito sobre la ruta N° 30, se pudo describir una sucesión de areniscas finas a muy finas, blanquecinas, esencialmente cuarzosas, con ocasionales intercalaciones de pelitas, de 177 m de potencia (Figura 30), donde la unidad pasa luego a areniscas medias a finas, rojizas, cuarzo-feldespáticas, con intercalaciones de pelitas y arcillitas que se asignan a la Formación Buena Vista (Figura 31).

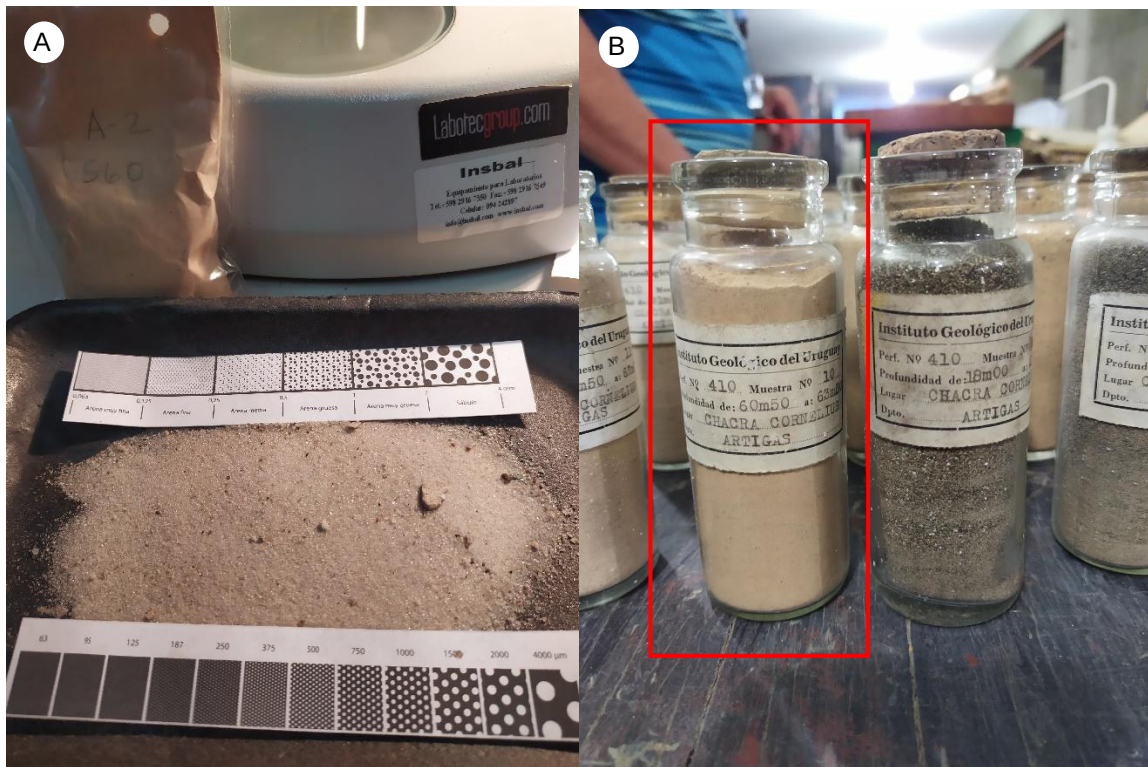


Figura 30: A: muestra de arena correspondiente a la Formación Tacuarembó en el pozo Artigas de ANCAP extraída a los 170 m. B: muestra de la Formación Tacuarembó correspondiente al pozo 410 realizado por el Instituto Geológico del Uruguay (ahora DINAMIGE) extraída a los 60,5 m.

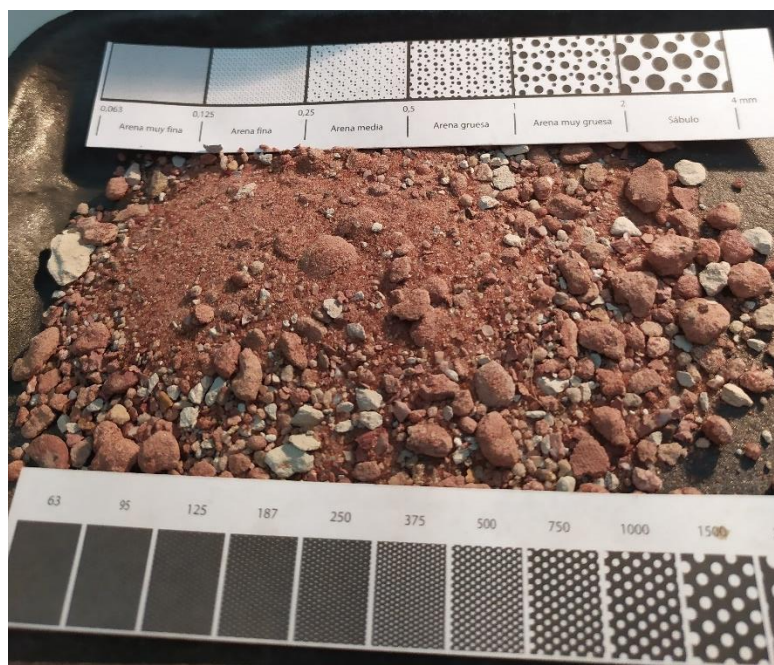


Figura 31: areniscas medias a finas, rojizas, cuarzo – feldespáticas correspondientes a la Formación Buena Vista presentes en el pozo Artigas de ANCAP a una profundidad de 240 m.

La Formación Arapey está compuesta por basaltos y ocupa la mayor parte de la zona de estudio donde se apoyan sobre las areniscas de la Formación Rivera. Los basaltos son generalmente masivos o lajosos, con distinto grado de alteración y coloraciones que van desde el gris oscuro al rojizo (Figura 32). En la zona de la ventana, puntualmente, se presentan formando pequeños cerritos, lo que facilita su identificación, tanto en fotografías como en el reconocimiento de estas litologías a través de imágenes aéreas y el campo.

El mayor espesor de basalto fue descrito en la perforación del Campo Experimental de la Escuela Agraria, donde se constató la potencia de 195 m de basalto.

Respecto a estructuras observadas en esta unidad, sobre la ruta N° 30, en el borde Sur del área de estudio se observó un nivel de basalto brechoide y sobre la ruta N° 4, en el km 198 se registró un filón de arenisca dentro de un basalto masivo (Figura 32).

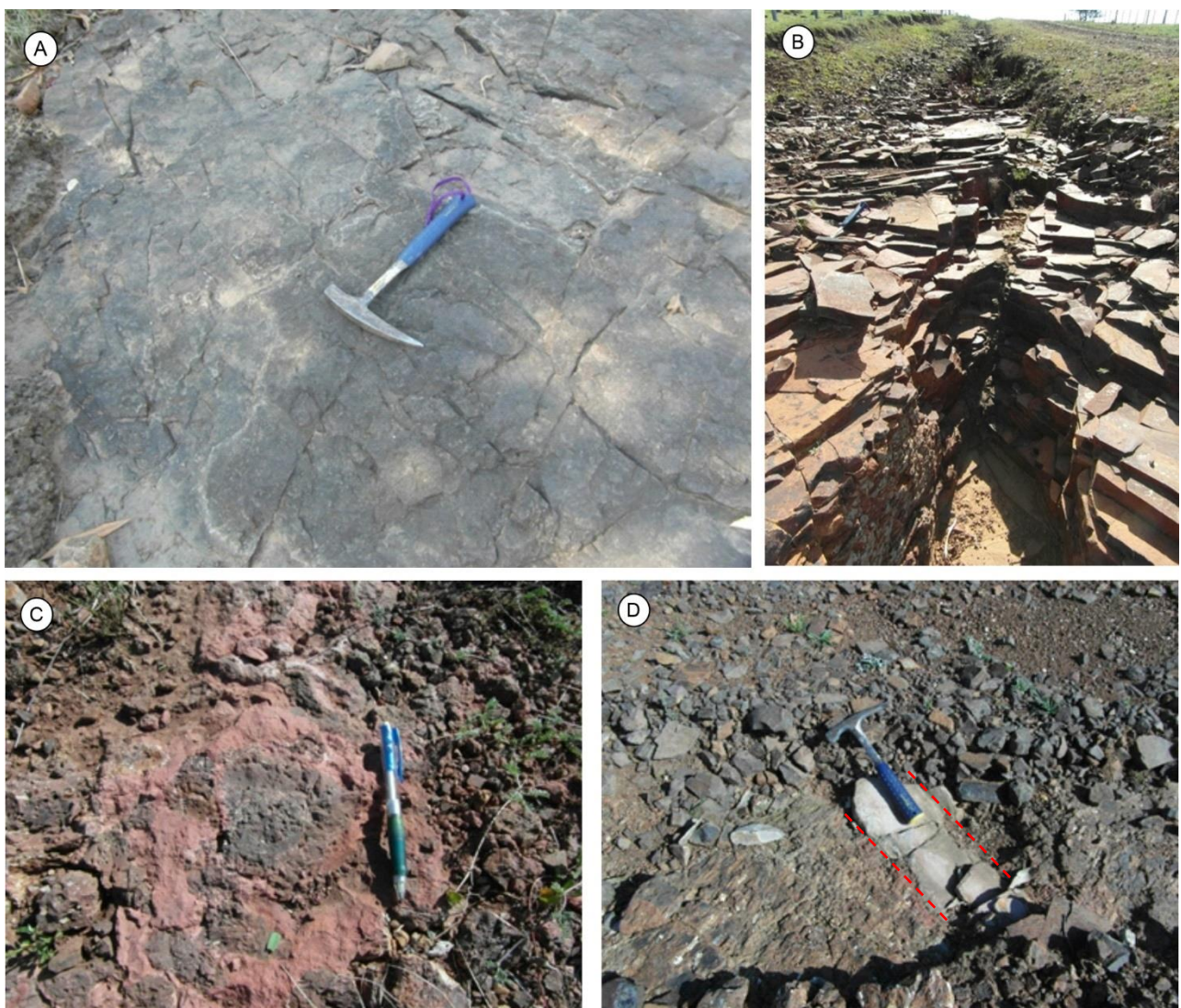


Figura 32: Formación Arapey en la zona de estudio. A: afloramiento de basalto masivo. B: afloramiento de basalto lajoso. C: afloramiento de basalto brechoide sobre la ruta N° 30. D: filón de arenisca silicificada en el basalto sobre ruta N° 30.

Otra particularidad de la Formación Arapey en el área de estudio es que, en varias situaciones y asociada a la base de la unidad, se intercalan a los basaltos lentes y estratos de areniscas de grano medio a fino, rojizas, con estratificación cruzada y potencias variables que van desde los pocos metros hasta los 34 m (en subsuelo).

Estos cuerpos arenosos, que se denominan areniscas *intertrapps*, forman parte de la definición litoestratigráfica de la Formación Arapey (Bossi, 1966). La intercalación de basaltos y areniscas también pudo ser reconocida en el corte geológico efectuado sobre la ruta N° 293 en la región brasileña.

Estas areniscas *intertrapps* generalmente aparecen en afloramientos de tamaño reducido y asociados a zonas altas (Figura 33). Desde el punto de vista sedimentológico, poseen características similares a los términos arenosos de la Formación Rivera, apareciendo desde muy silicificados a friables, aunque en el área de estudio aparecen muchas veces con granulometrías arenosas algo más finas (Figura 33).

Se constató que el espesor máximo de las areniscas de *intertrapps* en el subsuelo alcanza un espesor máximo de casi 50 m en un pozo realizado por PRENADER en la zona de Colonia Rivera. En la Figura 34 se pueden observar los perfiles litológicos esquemáticos de otras perforaciones en los que también se describen areniscas de *intertrapps* de importante desarrollo.

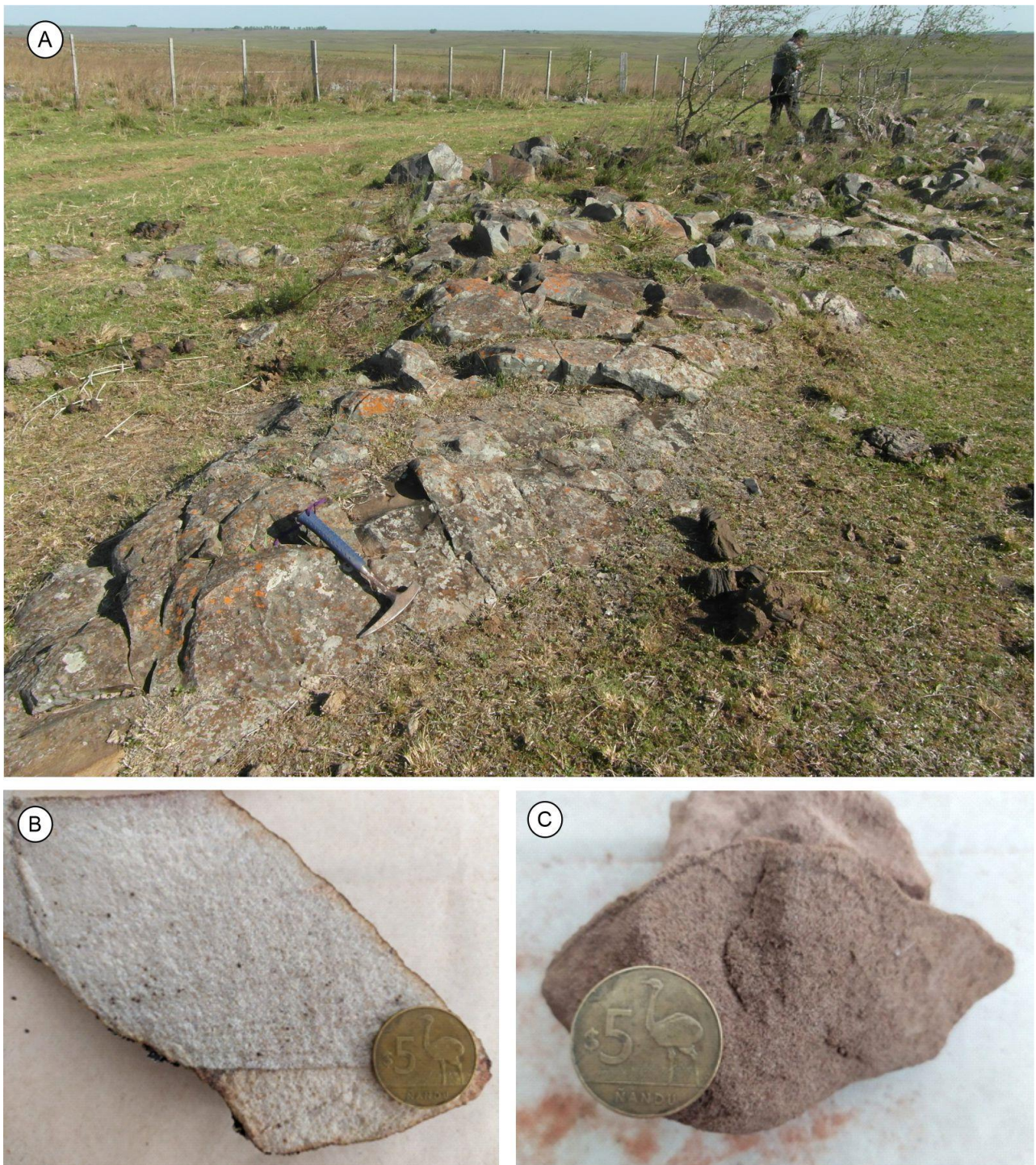


Figura 33: afloramientos de intertrapps pertenecientes a la Formación Arapey. A: afloramiento de arenisca *intertrapp* silicificada (coordenadas: X: 531068, Y: 6627429). B: areniscas finas blanquecinas fuertemente afectadas por la silicificación, exhibiendo estratificación. C: areniscas medias a finas, marrones a rojizos, friables.

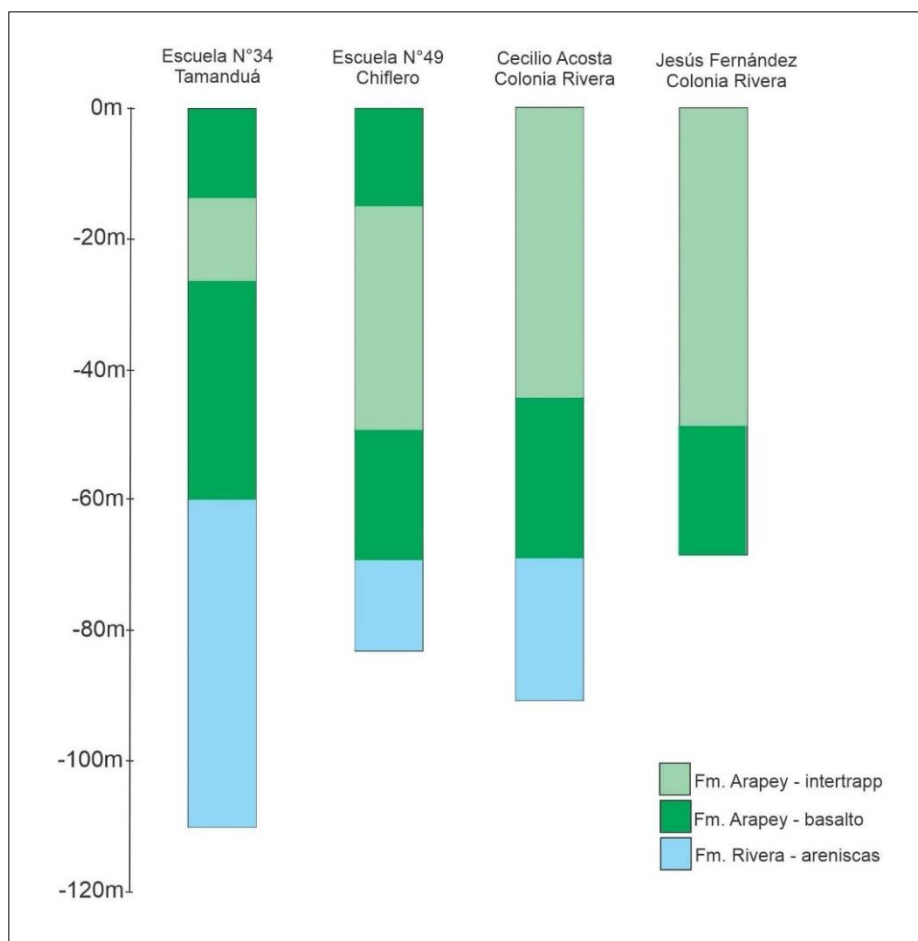


Figura 34: perfiles litológicos de algunas perforaciones en las que se describieron areniscas *intertrapps*. El espesor máximo de estas areniscas *intertrapps* en perforaciones es de casi 50 m en la zona de Colonia Rivera.

Las formaciones Arapey y Rivera pueden aparecer cubiertas por los depósitos cuaternarios en las áreas topográficamente más bajas. Por un lado, por la Formación Sopas que muestra la presencia de pelitas arenosas de tonalidades marrones con intercalaciones de lentes de conglomerados y areniscas, donde muchas veces los niveles pelíticos contienen carbonato de calcio. Los espesores máximos reconocidos en el área de estudio (3 - 5 m) se encuentran en la región noroeste, por ejemplo, sobre el arroyo Chiflero próximo a su desembocadura en el río Cuareim (Figura 34). Por otro lado, los depósitos más recientes (terrazas) y los que conforman las actuales planicies fluviales (arenas, fangolitas, arcillas y gravas) están estrechamente asociados a la dinámica del río Cuareim, destacándose el extenso desarrollo de áreas aplanadas en el sector sureste (cursos de agua Guayubira y Piedra Pintada).

En el sector brasileño, las características geológicas son similares, aunque cabe destacar únicamente en dicho territorio (ruta N° 293 entre Quaraí y Santana do Livramento), la presencia de importantes áreas donde se desarrollan “arenales”, depósitos de arenas finas a medias, totalmente inconsolidados, que se forman a partir del retrabajamiento de las areniscas mesozoicas a partir de la dinámica hídrica y eólica (Guasselli et al., 2010) (Figura 35).



Figura 35: erosión sobre el margen izquierdo del arroyo Chiflero exhibiendo los depósitos cuaternarios, arenas, grauvacas y fangos de tonalidades marrones que corresponden a la Formación Sopas.

Surge del análisis de los rasgos morfoestructurales del área de estudio y adyacente, sumados a los datos geológicos levantados en el campo, la revisión de las principales perforaciones y el apoyo de la información geofísica de subsuelo (gravimetría, magnetotélúrica y sísmica) que el asomo del SAG en el área de estudio está relacionado a un bloque elevado que se explica a través de una tectónica transcurrente asociada al lineamiento Cuareim (NW), con reactivación de antiguas fallas NE (con componente extensional) y N-S (con componente compresiva) (Figura 37). Ese bloque elevado con respecto al área basáltica circundante, teniendo en cuenta la base de la Formación Arapey como indicador cinemático sugiere fallamientos con rechazos próximos a los 200 m.

El bloque elevado posibilita la actuación de procesos erosivos sobre los basaltos permitiendo el asomo de las areniscas del SAG (Formación Rivera) preservándose aún relictos basálticos de espesores variables que van desde los pocos metros a 50-60 m. Esta situación es la que conforma la denominada “Ventana de Artigas”. Los límites estructurales del bloque son (Figura 37):

- i) al Oeste, la falla del Chiflero;
- ii) al Este, la falla del Pintado Grande;
- iii) al Sur, el bloque cierra contra la falla NEE que controla los cursos de los arroyos Catalán Grande y cañada de las Charcas;

Hacia el Norte, la Bloque Artigas interrumpe al Lineamiento Cuareim y tendría su cierre estructural en los alrededores de la ciudad de Quaraí.

Estos lineamientos están evidenciados en la hidrografía del lugar, especialmente en la zona basáltica, tanto en territorio uruguayo como brasileiro. En el territorio uruguayo se observa principalmente en los arroyos Pintado, Tamandú y Chiflero.

Los dislocamientos verticales, que alcanzarían casi los 200 m, quedan documentados en perforaciones y sondeos magnetotelúricos (pozo del campo de la escuela Agraria y AMT ART03 realizado por Silverio da Silva et al., 2006).

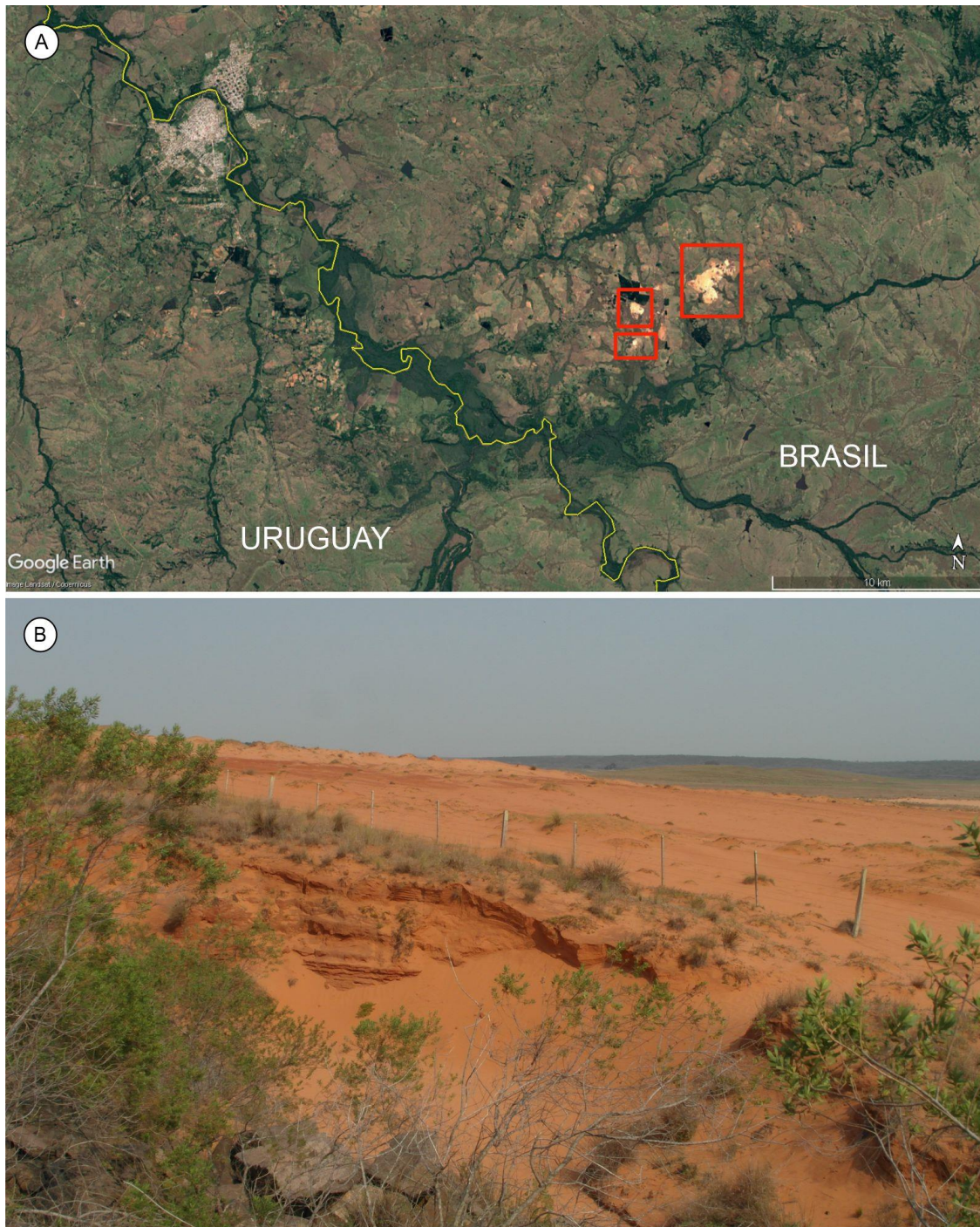


Figura 36: A: imagen satelital correspondiente al año 2019, donde se observa la extensión de la ventana a un lado y otro del río Cuareim. En rojo se señalan algunos de los arenales que se encuentran en territorio brasileiro. B: arenales formados en las ventanas del SAG en territorio brasileiro.

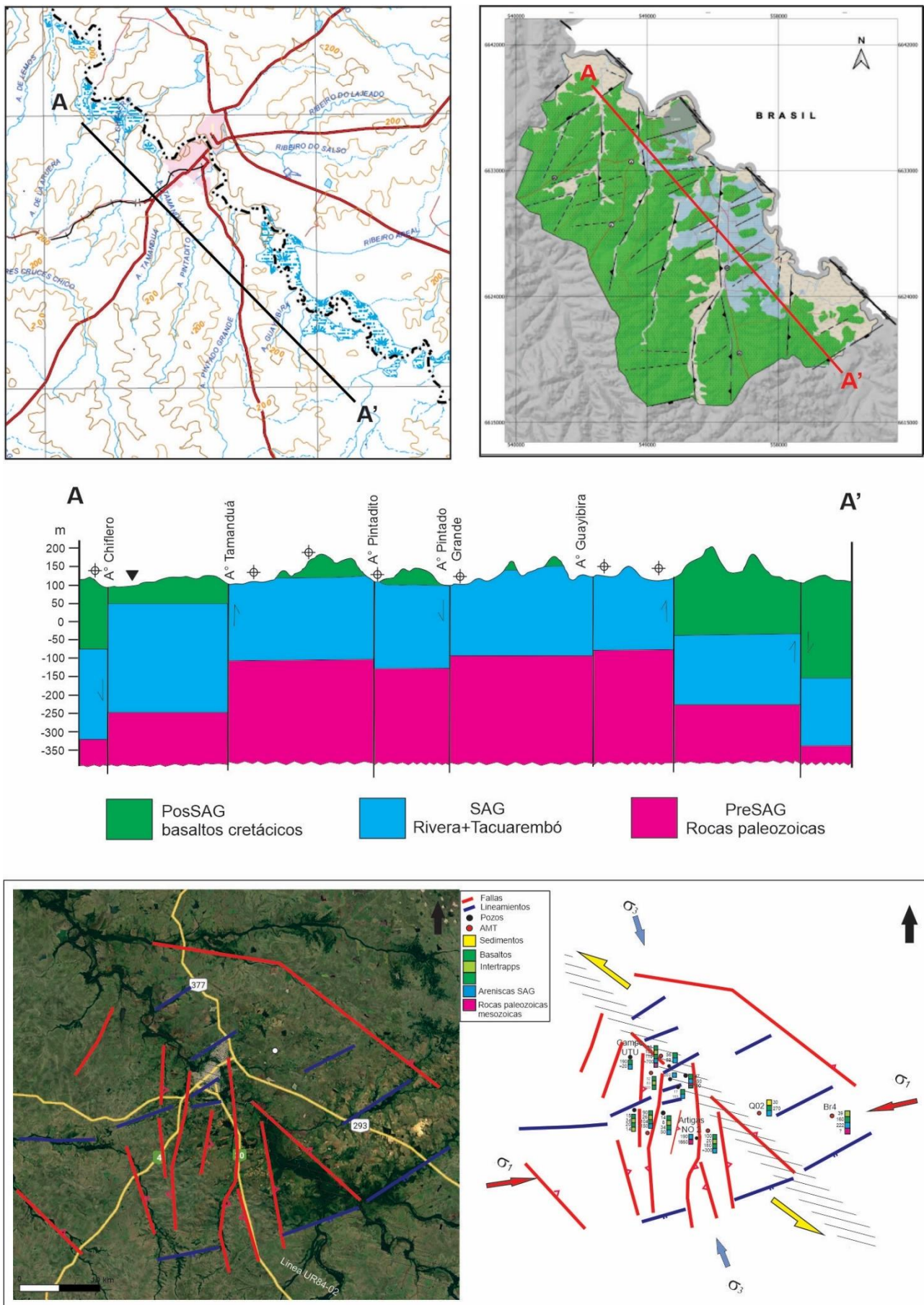


Figura 37: corte geológico y principales aspectos estructurales esquemáticos del área de estudio.

- Perforaciones que captan agua únicamente de areniscas intertrapps (3 perforaciones)
- Perforaciones que tienen una captación mixta, es decir que captan de dos unidades simultáneamente (48 perforaciones)

En los siguientes apartados se presentarán los resultados obtenidos en cuanto a profundidades y caudales de cada uno de los tipos definidos vinculándolos con la unidad hidrogeológica de la cual captan el agua subterránea.

- Acuífero Arapey

Como en todos los acuíferos fracturados, la circulación y el almacenamiento de agua en esta unidad está condicionada a la existencia de fracturas y la interconexión entre ellas, lo que permite el flujo subterráneo. Asimismo, la presencia o no de relleno en las fracturas es otro factor clave en este tipo de acuíferos.

Por eso mismo, es difícil caracterizar a este acuífero como algo uniforme, ya que la densidad de fracturas en las diferentes regiones puede variar sus características hidráulicas y de productividad. Incluso, en el área de estudio existen algunos pozos realizados en basalto donde no se obtuvo agua, lo cual demuestra la dificultad que tienen los acuíferos del tipo fracturado.

Sobre la profundidad de las perforaciones que captan agua de la Formación Arapey, podemos observar que la mayoría se encuentra entre 50 y 60 m (Figura 39), y que la mayoría cuenta con un caudal de entre 2 a 5 m³/h (Figura 40).

El valor promedio de profundidad es de 64 m, con un valor de profundidad máxima de 125 m y un valor mínimo de 5,2 m. Ese último valor corresponde a un pozo seco, que fue realizado hace muchos años y la maquinaria de ese momento no permitió seguirlo debido a la gran dureza del basalto.

Sobre los caudales erogados, el promedio es de 3,02 m³/h, mientras el mayor valor es de 6,3 m³/h y el menor de 0,5 m³/h.

La profundidad de la perforación también es importante y no siempre a mayor profundidad se obtiene mayor caudal, eso queda demostrado al analizar los pozos de la zona de trabajo que captan agua subterránea desde el basalto. Si bien puede observarse una tendencia que los mayores caudales se obtienen a profundidades que rondan los 40 m, se observa mucha dispersión en la gráfica y son pocos los pozos contemplados como para poder hacer afirmaciones certeras (Figura 41).

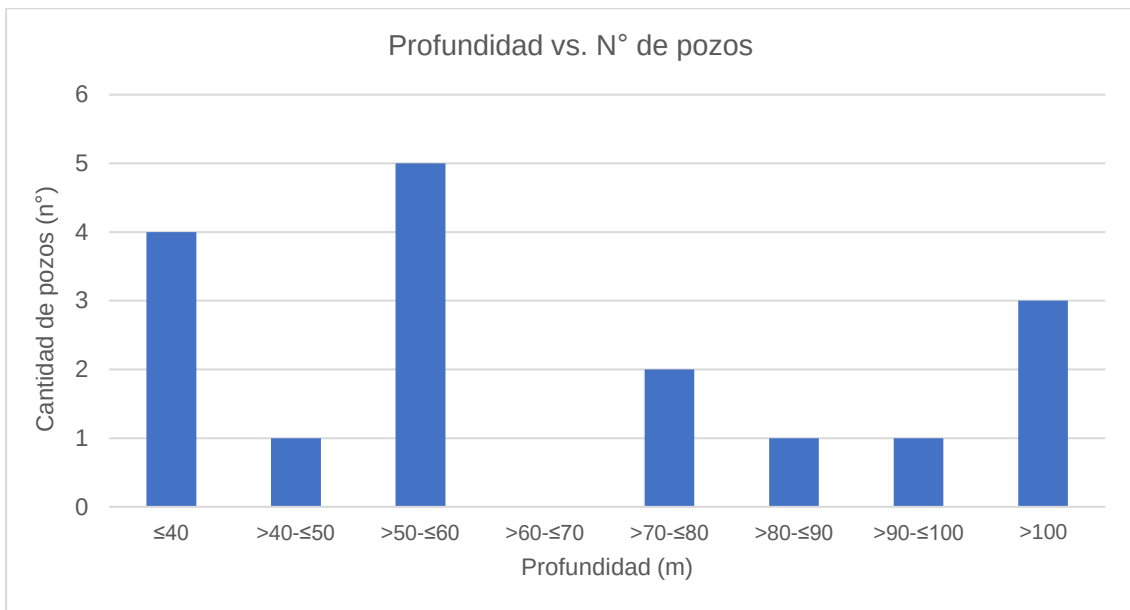


Figura 39: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de profundidad y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua del Acuífero Arapey.

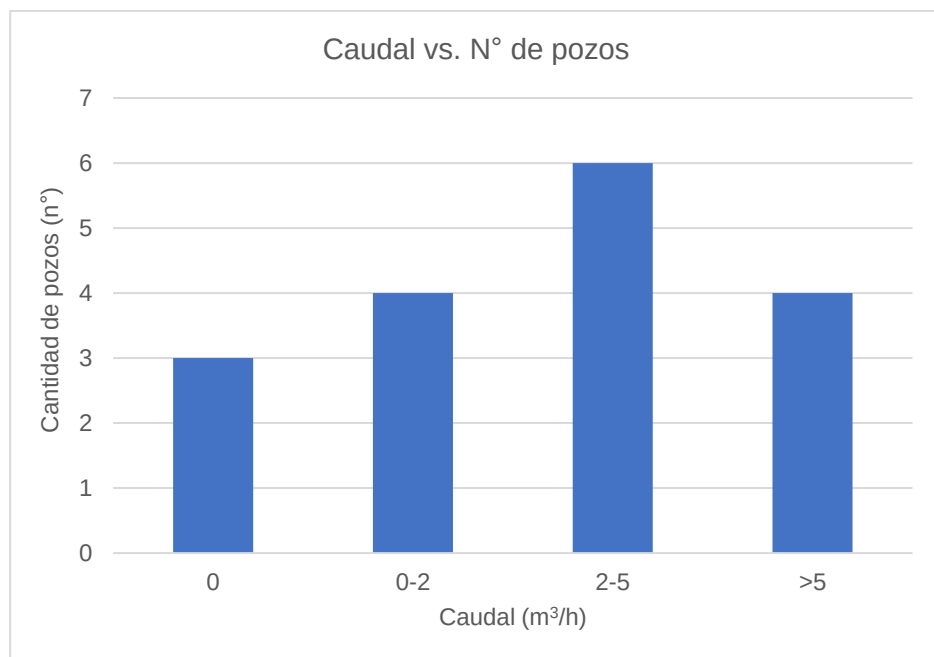


Figura 40: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de caudal versus el número de pozos que captan agua de la Formación Arapey.

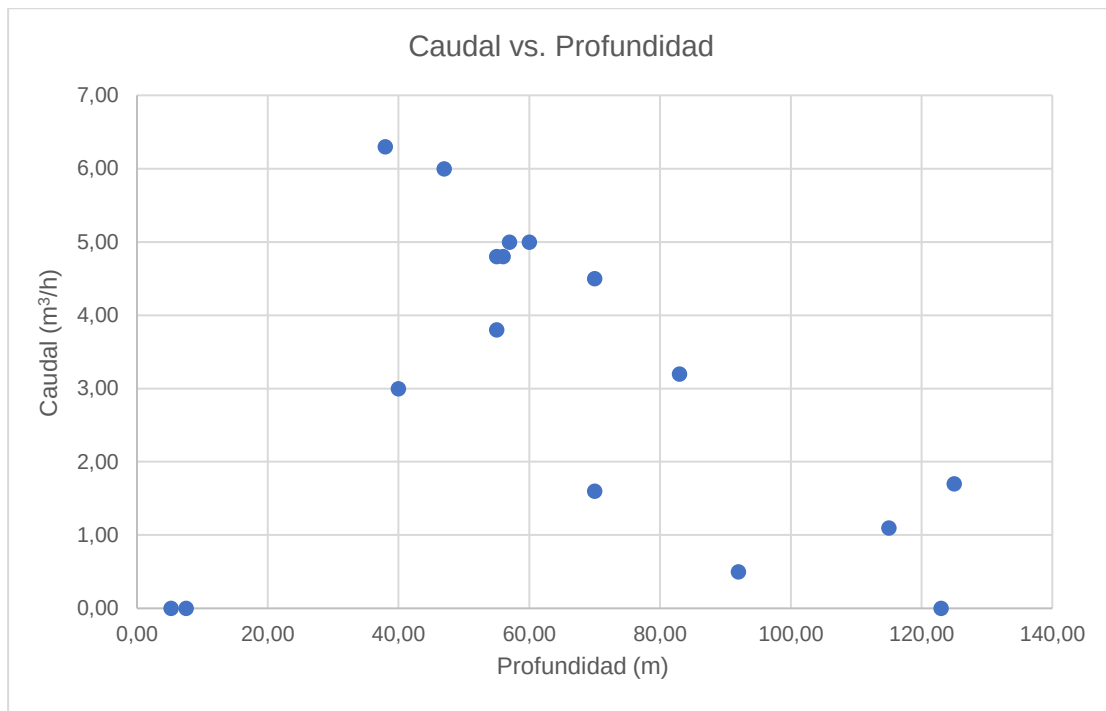


Figura 41: relación entre el caudal y la profundidad de las perforaciones que captan agua de la Formación Arapey.

Una de las particularidades del área es la presencia de *intertrapps* en los basaltos presentes al Oeste del arroyo Pintado Grande. Estos niveles arenosos generalmente tienen poca extensión lateral y no están conectados entre ellos, además de que generalmente se trata de areniscas silicificadas, lo cual hace que su productividad sea pequeña. Esto genera que muy pocas perforaciones de la zona capten agua de estas areniscas y los perforistas prefieran optar por realizar el pozo más profundo para captar agua desde el basalto o desde el SAG.

Al ser únicamente tres las perforaciones que captan agua exclusivamente de un *intertrapp* no se realizó un análisis de las mismas por la poca cantidad de datos. Dos de las perforaciones que captan de esta unidad se encuentran en la Colonia Rivera y una en la zona de Tamandúá. Las profundidades varían entre 68 y 45 m y los caudales entre 8 y 5,4 m³/h. Según los datos de profundidad vs caudal, a mayor profundidad, mayor es el caudal captado, pero al ser muy pocos los datos existentes no es correcto dar como válida esta relación.

- Sistema Acuífero Guaraní

Es un acuífero poroso, donde el agua se almacena en los poros que existen entre los granos de arena y circula a través de las conexiones intergranulares, que pueden ser más o menos afectadas por el grado de cementación de la roca y la presencia de materiales finos.

Dentro del área de trabajo, se presenta bajo dos situaciones estructurales/hidrogeológicas distintas. Por un lado, en la mayor parte de la cuenca está cubierta por pocos metros a

decenas de metros de basalto constituyendo un acuífero confinado. Por otro lado, se encuentra aflorando, constituyendo un acuífero de tipo libre en la zona de la ventana.

Se ha visto en los datos recabados que muchas veces, si la potencia de los basaltos que están por encima del SAG es de unos pocos metros (10 a 15), se opta por entubar esa unidad y obtener agua únicamente del SAG.

Al igual que para el acuífero Arapey, se analizaron los valores de profundidad y caudal. Sobre la profundidad de las perforaciones que captan agua del SAG, podemos observar que la mayoría tiene menos de 40 m de profundidad o se encuentra entre 50 y 60 m (Figura 42) y que la mayor parte de los pozos cuenta con un caudal mayor de 5 m³/h (Figura 43).

El valor promedio de profundidad es 61 m, con un valor de profundidad máxima de 202 m y un valor mínimo de 13 m.

Sobre los caudales erogados, el promedio es de 10 m³/h, mientras el mayor valor es de 130 m³/h y el menor de 1 m³/h. El pozo de mayor profundidad y mayor caudal es el mismo, tratándose de un pozo de OSE ubicado en la ciudad de Artigas.

Sobre la relación entre la profundidad y el caudal, se puede observar una relación exponencial entre estos parámetros, observándose que, a mayor profundidad, mayores son los caudales obtenidos (Figura 44).

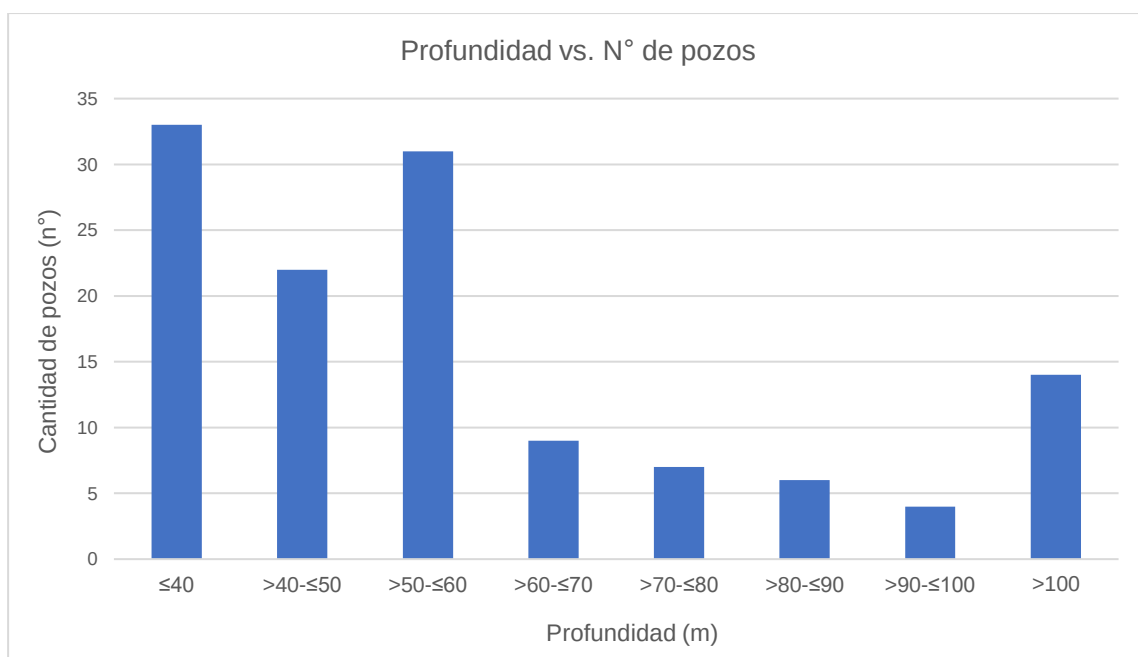


Figura 42: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de profundidad y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua del SAG.

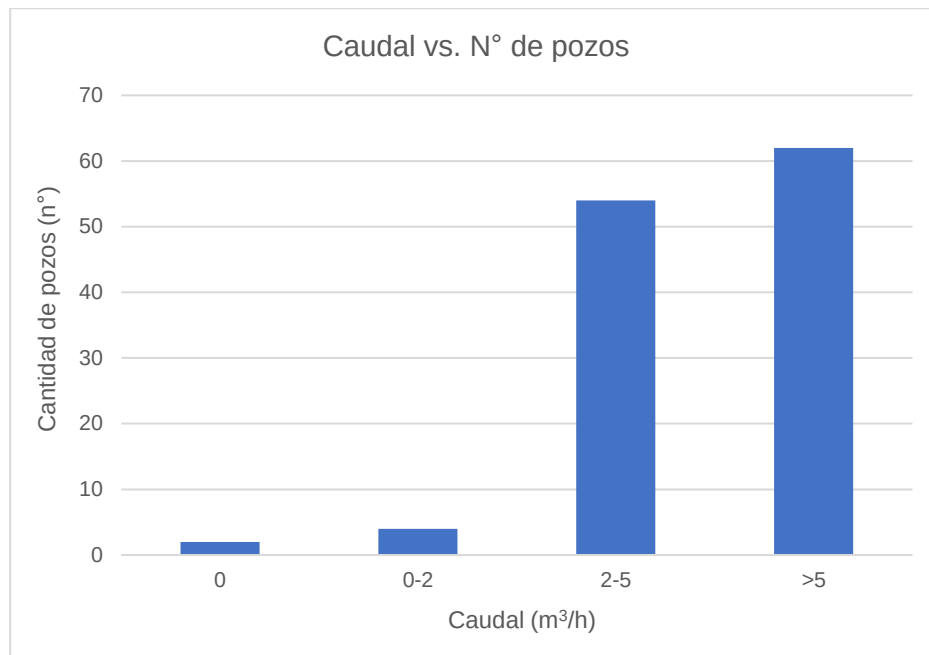


Figura 43: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de caudal y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua del SAG.

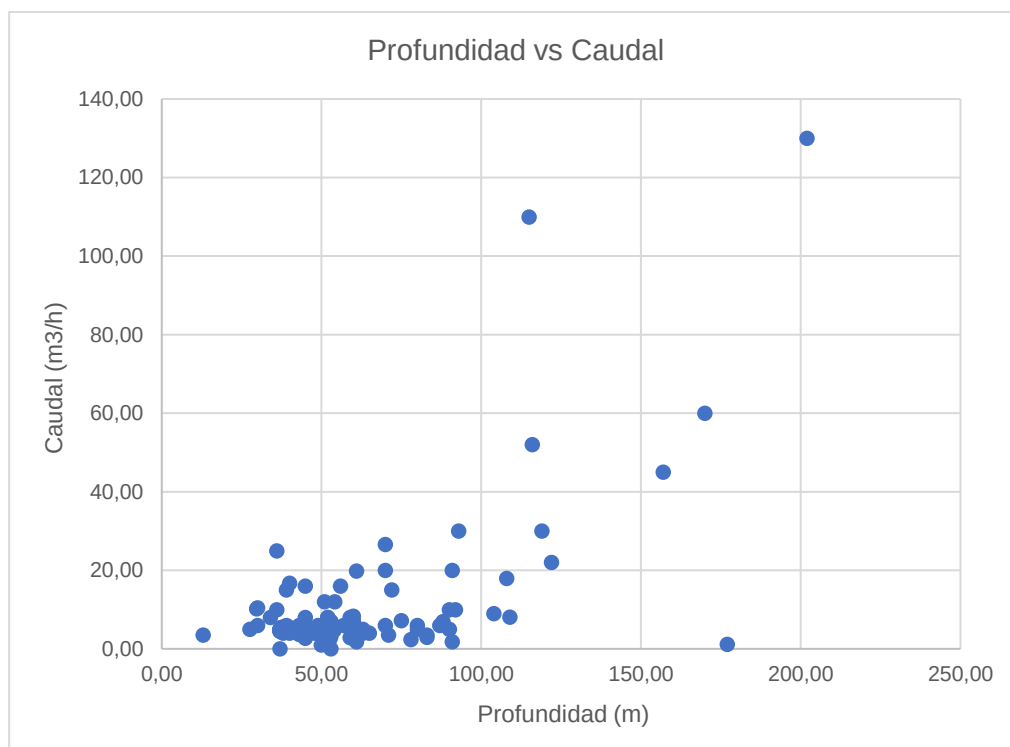


Figura 44: relación entre el caudal y la profundidad de las perforaciones que captan agua del SAG.

-Pozos de captación mixta

Estas perforaciones captan agua de dos o más unidades hidrogeológicas. Esto sucede muchas veces porque es necesario llegar a caudales específicos por lo que se necesitan varios aportes o porque las unidades superiores son secas.

Sobre la profundidad de las perforaciones que captan agua mixta, podemos observar que la mayoría se encuentra entre 70 y 80 m (Figura 45) y que la mayor parte de los pozos cuenta con un caudal de entre 2 a 5 m³/h (Figura 46).

El valor promedio de profundidad es de 70,5 m, con un valor de profundidad máxima de 200 m y un valor mínimo de 30 m. El valor mínimo de estos pozos es mayor que los valores de los pozos que captan solamente de una unidad debido a que para captar dos unidades muchas veces tienen que ir a mayores profundidades.

Sobre los caudales erogados, el promedio es de 5,9 m³/h, mientras el mayor valor es de 16 m³/h y el menor de 1,2 m³/h.

Sobre la relación entre la profundidad y el caudal, no se puede observar tendencias definidas, esto puede ser debido a que no capta una sola unidad y las profundidades y los caudales requeridos son muy variables (Figura 47).

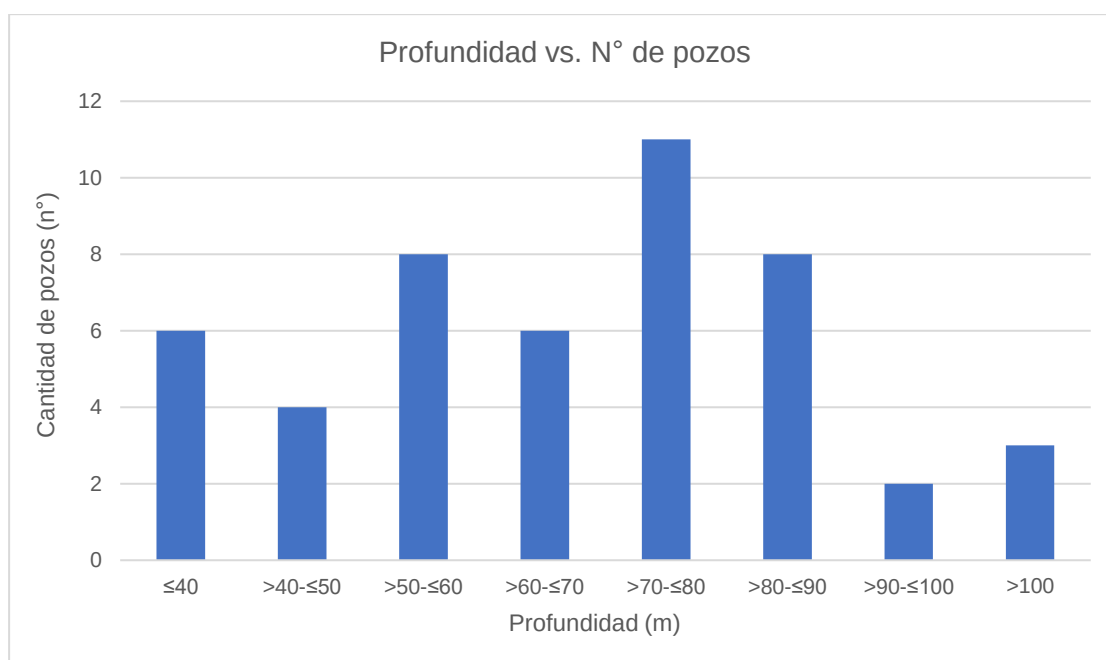


Figura 45: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de profundidad y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua de varias unidades.

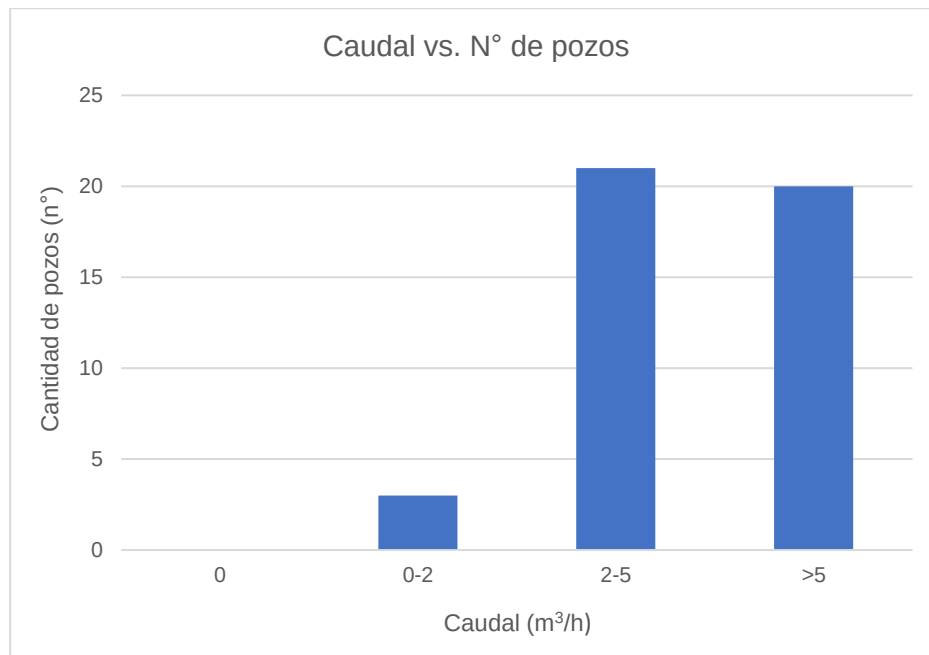


Figura 46: diagrama de frecuencias que ilustra los valores de caudal y la frecuencia en la cual se presentan en los pozos que captan agua de varias unidades.

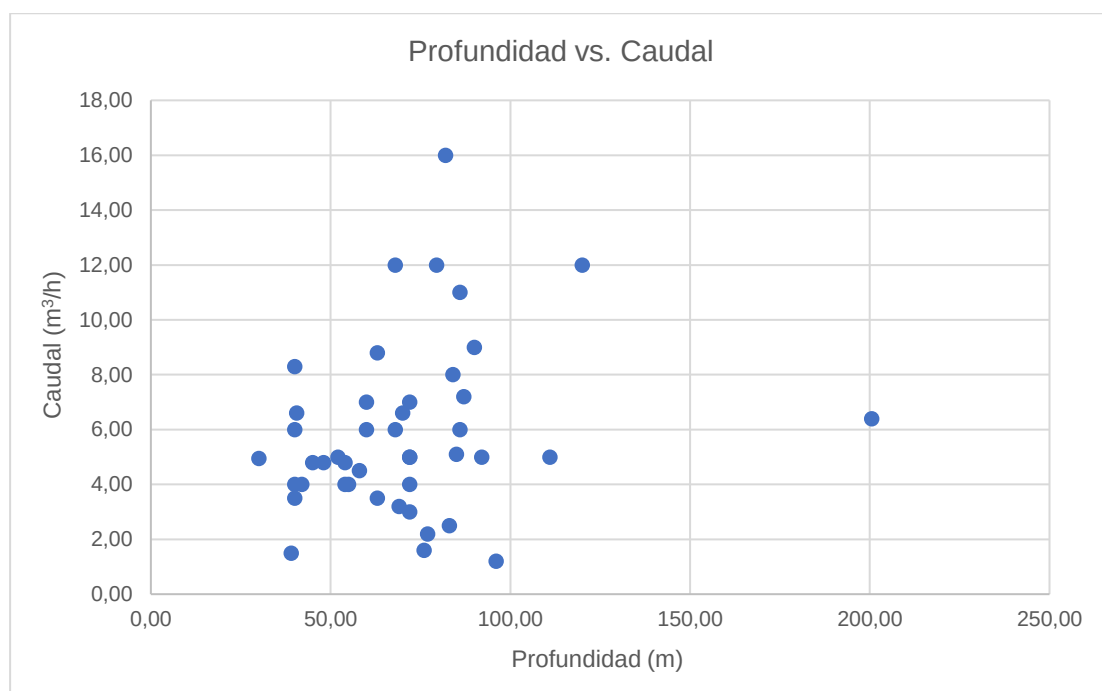


Figura 47: relación entre el caudal y la profundidad de las perforaciones mixtas.

6.2.3. Estimación del flujo del agua subterránea

Se realizó únicamente para el SAG aflorante (ventana), a partir de la creación de isopiezas resultantes de los datos de niveles estáticos recopilados de la base de datos de pozos de diversas instituciones.

Al realizar un zoom del área del SAG aflorante dentro del mapa hidrogeológico podremos observar que los máximos valores de las isopiezas encontrados son de 120 m, mientras que los menores son de 95 m en el área más cercana al río Cuareim.

El flujo del agua subterránea permite inferir que la zona de descarga del acuífero es principalmente hacia el río Cuareim, lo cual no quita que se produzcan algunas descargas locales en los arroyos y cañadas de la zona.

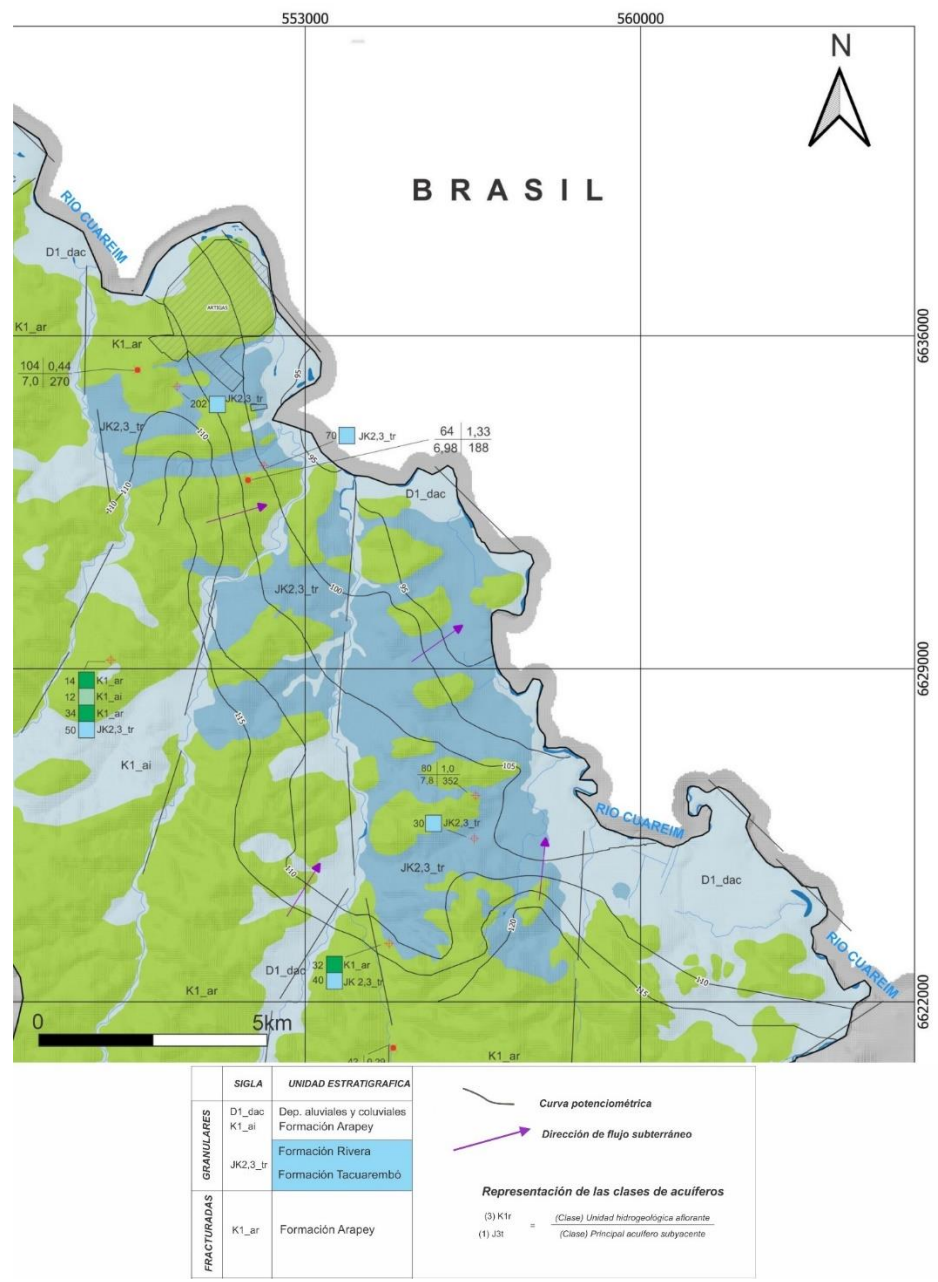


Figura 48: zoom a las isopiezas en la zona del SAG aflorante (ventana) y a la estimación de dirección del flujo desarrolladas durante este trabajo.

Si bien durante el relevamiento de campo se describió la presencia de areniscas sobre al Oeste del arroyo Tamanduá, estas no fueron consideradas durante la realización de la estimación de dirección de flujo del agua subterránea ya que se tratan de areniscas pertenecientes a *intertrapps* de la Formación Arapey y como se analizó anteriormente, estas litologías no se comportan como acuíferos sedimentarios debido a su silicificación.

6.2.4. Estimación de volúmenes extraídos

La normativa establece que para utilizar agua subterránea a partir de un pozo particular debe obtenerse el derecho de aprovechamiento de agua subterránea ante la Dirección Nacional de Agua del Ministerio de Ambiente. Esta institución encargada de administrar los recursos hídricos del país (superficiales y subterráneos) y entre otras cosas, ese registro permite conocer el volumen de agua subterránea que se extrae actualmente en las diferentes zonas/acuíferos/regiones del Uruguay y los usos que se le da a esos recursos hídricos.

Se estima que sólo entre el 10 y el 20% de la totalidad de pozos del país está registrado (Ximena Lacués, comunicación personal), aspecto que, entre otros perjuicios, no permite conocer los valores reales de extracción, evaluar una posible sobreexplotación de los acuíferos, así como tampoco permite conocer el estado estructural de las perforaciones y el cumplimiento de la normativa de construcción que establece el Decreto 86/004.

Para estimar los volúmenes extraídos totales en la zona de trabajo, primero se tomó en cuenta la suma de los volúmenes de extracción de cada uno de los pozos registrados ante DINAGUA.

La ciudad de Artigas y su microrregión solo cuenta con 42 perforaciones registradas (Figura 49). Del total de perforaciones registradas, un 75% se utiliza para riego, un 13% para consumo humano, un 7% para abrevadero de ganado y un 5% para otros usos (por ejemplo: servicios o recreación) (Figura 50).

La mayoría de los pozos utilizados para riego se ubican en pequeños predios de productores agrícolas donde se realizaron perforaciones destinadas a consumo humano y riego a través del proyecto PRENADER. Cabe recordar que el PRENADER, programa del MGAP que estuvo vigente entre los años 1994 y 1999, permitió que pequeños productores pudieran acceder a la construcción de una perforación para la obtención de agua subterránea con el fin de utilizarla para consumo humano y riego, lo cual les permitió un crecimiento en cuanto a la producción y una mejora en la calidad de vida. Si bien los pozos construidos por PRENADER se encuentran dispersos en toda el área de estudio, la mayor proporción se ubica en la zona de Guayubira-La Estiva, donde predominan los cultivos de tabaco.

Lamentablemente, un bajo porcentaje de perforaciones son las que se encuentran registradas ante DINAGUA. Como fue mencionado, en el área de trabajo, existen 42 pozos registrados y en la base de datos armada durante este trabajo se pudieron recolectar 329 pozos, lo cual indica que aproximadamente un 13% de los pozos del lugar está registrado.

Si consideramos que cierto número de pozos de la base de datos están abandonados o sellados el porcentaje podría variar, pero no más allá de un 20%.

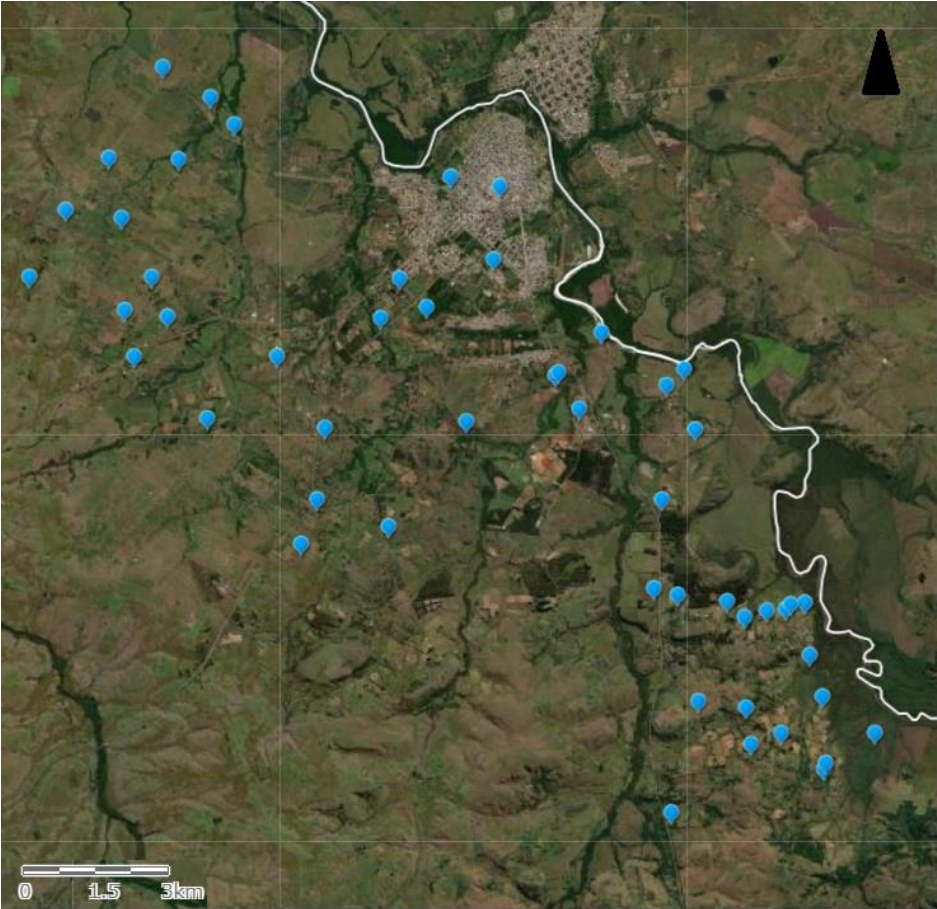


Figura 49: mapa de ubicación de las perforaciones registradas en el área de estudio indicadas con marcadores azules. Fuente: visualizador DINAGUA (15/01/2023).

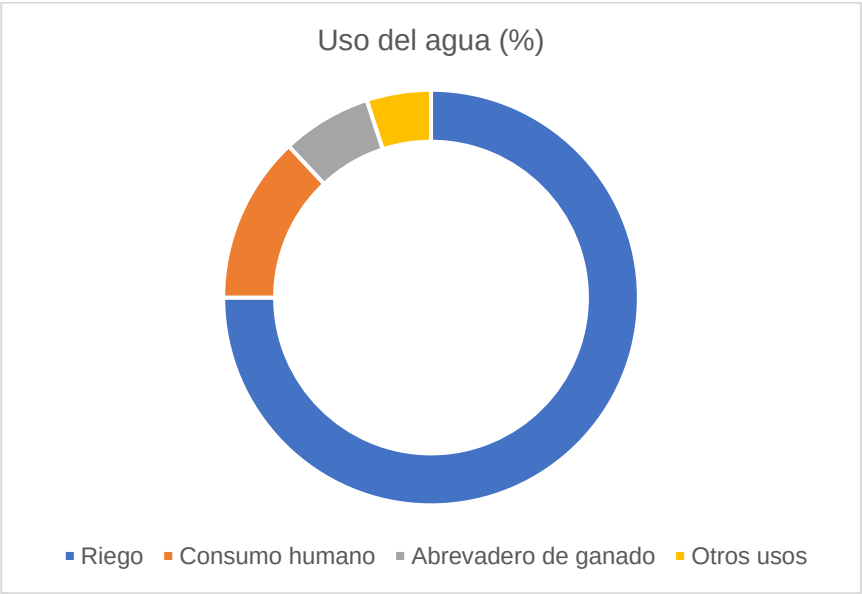


Figura 50: grafico que ilustra los diferentes usos del agua subterránea de los pozos registrados en la zona de estudio.

A partir de los datos de los pozos registrados (y de los volúmenes declarados por los propietarios) el volumen total de agua subterránea extraída de la zona de estudio es de al menos 1.367.148 m³/anuales (Tabla 18). Sin dudas el volumen real es mucho mayor teniendo en cuenta la baja cantidad de pozos con derecho de uso aprobada.

Si bien algunos de los pozos propiedad de OSE, se encuentran contemplados en los datos de los pozos registrados, se optó por sumar al volumen total declarado de agua extraída (1.367.148 m³/anuales) el volumen utilizado de agua subterránea comunicado por OSE Regional Artigas para este trabajo.

Según datos de agosto de 2022, en la ciudad, se extraen aproximadamente 573 m³/h de agua subterránea, mientras que del río Cuareim se extraen 245 m³/h (Tabla 19).

En la ciudad de Artigas hay 20 perforaciones de OSE, de las cuales algunas están en uso, otras inactivas y otras se tienen como reserva ante eventos extremos (Tabla 20). Otras perforaciones administradas por OSE dentro de la microrregión se encuentran en escuelas y parajes como Pintadito, Guayubira, Tamanduá y Chiflero sumando un total de 28 pozos en la zona de estudio (Figura 51).

Tabla 18: lista de perforaciones registradas en DINAGUA en la zona de estudio y los volúmenes extraídos autorizados.

Propietario	X	Y	Uso	Destino	Profundidad (m)	Volumen (m³/anales)	Caudal (m³/h)
Ana Verónica Pereyra Silveira	543168	6636796	Riego	Hortalizas	77	14260	2,2
Antonio Gabriel Fernández Lozano	543675	6632702	Riego	Hortalizas	87	9000	5
Bicera Hiriart/Jimenez Felice	552411	6632246	Otros Usos	Comercial y servicios	44	10560	5
Carlos Daniel Avedutto Franco	544042	6634328	Riego	Hortalizas	83	21000	3,2
Carlos Gómez	554714	6632035	Otros Usos Agropecuarios	Abrevadero de ganado	34	6480	1,8
Carlos Odriozola y otros	549200	6634287	Consumo Humano	Uso doméstico	20	13824	2,4
Diego Félix Soto Morales	544383	6633494	Riego	Hortalizas	86	19800	11
Eduardo Núñez Da Rosa	556763	6627365	Riego	Hortalizas	70	12000	15
Eduardo Núñez Da Rosa	557265	6627510	Riego	Hortalizas	38	9000	5
Eliberto Arocena Montero	557164	6627411	Riego	Hortalizas	45	10800	6
Enrique Hernández Suarez	548781	6633448	Riego	Hortalizas	36	18000	10
Ethel Dávila Argañaraz	555304	6631129	Riego	Hortalizas	54	19800	4
Guillermo Daniel Minutti Abadie	547132	6628817	Riego	Hortalizas	115	1200	1,1
Ignacia Renee Ferreira Maciera	552467	6632319	Riego	Hortalizas	78	19800	3,5
José Artigas De los Santos Sampayo	547607	6631211	Riego	Hortalizas	92	9000	5
José Celso Fuquez Catelotti	544617	6636741	Riego	Hortalizas	72	2000	5
José Honorio Meirelles Zabalegui	551259	6636171	Otros Usos	Turismo/Recreación	60	1200	0,18
José Orlando Recoba Fraga	547442	6629713	Riego	Hortalizas	120	3000	9
Juan Alvaro Romero	554419	6627840	Riego	Hortalizas	43	5000	4,8
Juan Carlos Fadigatti Napol	542257	6635716	Riego	Hortalizas	80	9000	5
Juan Nerí Silveira Correa de Souza	544287	6638644	Riego	Hortalizas	70	2880	1,6
Luz Marina Juayeck Pérez Figueredo	555946	6627574	Riego	Hortalizas	47	8640	4,8
Martina Batista Demetrio	543485	6633654	Riego	Hortalizas	111	9000	5
Mary Teresita Rodríguez Serra	552909	6631555	Riego	Hortalizas	55	6840	3,8
Mauricio Gómez Porto	554589	6629678	Riego	Hortalizas	54	17160	4,8
Miguel Arbiza	557565	6627557	Riego	Hortalizas	52	4500	2,7
Miriam Graciela Zanetti Fadigatti	545774	6637468	Riego	Frutales	48	31540	4,8
Nilson Fernández Díaz	557565	6627557	Riego	Hortalizas	60	8100	4,5
Orlanda Ferreira	541503	6634335	Riego	Hortalizas	62	17160	4
OSE	545167	6631408	Consumo Humano	Abastecimiento a poblaciones	83	14400	2,5
OSE	548932	6629167	Consumo Humano	Abastecimiento a poblaciones	91	11664	1,8
OSE	551143	6634672	Consumo Humano	Abastecimiento a poblaciones	170	357120	62
OSE	550261	6636381	Consumo Humano	Abastecimiento a poblaciones	157	535680	62
Patricia Ferreira Ramos Sarachaga	545281	6638033	Riego	Cereales/Oleaginosas	57	4500	5
Ramón Enrique Paiva Rodríguez	528007	6639816	Otros Usos Agropecuarios	Abrevadero de ganado	40	21600	6
Ricardo Marcelo Abreu	556312	6627250	Riego	Hortalizas	52	5040	2,8
Ricardo Marcos Paiva Piassini	549733	6633688	Riego	Hortalizas	72	25920	14,4
Rodrigo Jesús Focco	555067	6632381	Otros Usos Agropecuarios	Abrevadero de ganado	40	21600	6
Segundo Rodríguez Ferreira	543405	6635554	Riego	Hortalizas	82	28800	16
Sergio Noel Jacques Tafernaberry	554918	6627735	Riego	Hortalizas	47	8640	4,8
Susana Raquel Jiménez Barreneche	546623	6632671	Riego	Forraje/Pradera/Semillas	54	3000	4,8
Teresa Villanueva Silva	553376	6633149	Riego	Hortalizas	45	8640	4,8
						1367148	

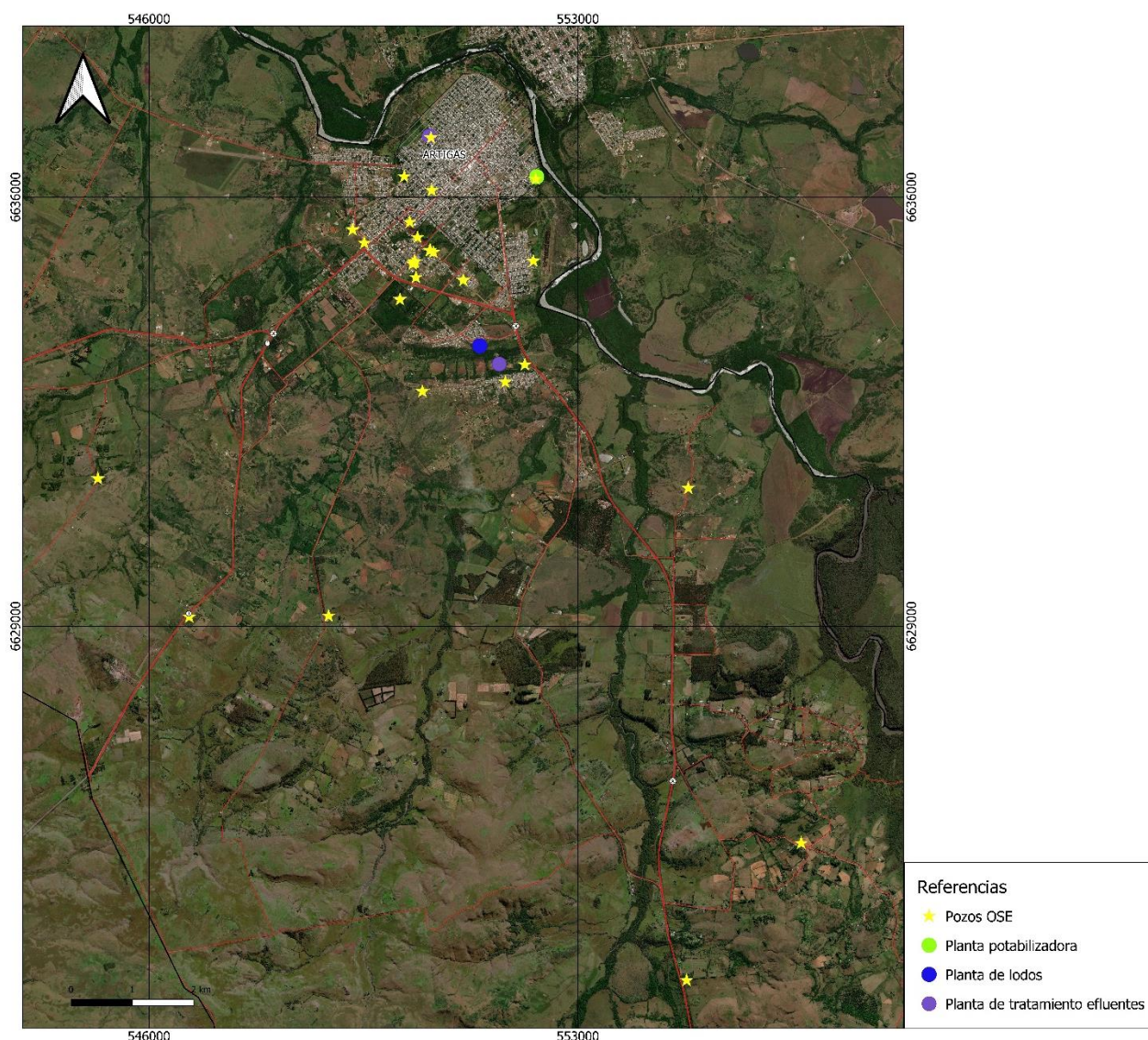


Figura 51: mapa de ubicación de los pozos administrados por OSE dentro de la zona de trabajo.

Teniendo en cuenta los caudales de las perforaciones de OSE, el total elevado es de 572,5 m³/h, lo que resulta en 3.407.520 m³/anuales (teniendo en cuenta un promedio de uso de 16 horas diarias por pozo y considerando pozos solo de la ciudad de Artigas). Si se suman ambos volúmenes, resultaría en un total de 4.774.668 m³/anuales de agua subterránea extraída en la zona de trabajo, aunque se vuelve a resaltar que ese valor dista mucho de ser el real.

Tabla 19: caudal elevado por las perforaciones operativas y la Usina de Artigas al 31.08.2022 (información recabada en OSE Artigas).

	Caudal (m ³ /h)	Total de agua elevada (%)	Total de Agua elevada (m ³ /h)
Perforaciones	572.5	70	817.5
Usina	245	30	

Tabla 20: aporte de cada perforación y la usina al 31.08.2022. Nota: al momento de obtener estos datos había dos perforaciones nuevas esperando ser habilitadas para su uso (información recabada en OSE Artigas).

Perforaciones Operativas	Caudal (m ³ /h)	Usina (m ³ /h)
1.4.001	47	(203-287) Promedio = 245
1.4.002	46	
1.4.003	53	
1.4.004	16	
1.4.011	40	
1.4.012	52	
1.4.016	94	
1.4.018	51.5	
410	173	
Total elevado (m³/h)	572.5	245

Otro aspecto de suma importancia es la construcción de los pozos que se utilizan para la captación de agua subterránea sin importar el uso que la misma tiene. En Uruguay, el Decreto 86/004 describe las condiciones que debe tener una perforación durante su construcción, así como en su superficie una vez terminado el mismo, para asegurar un buen rendimiento del pozo y una correcta protección del mismo de posibles contaminantes antrópicos.

Durante la recorrida de campo se pudo observar que algunos pozos particulares no cumplían con los requisitos descriptos en el Decreto 86/004 (no estaban tapados, no tenían loza sanitaria o la tubería estaba corroída al ser de hierro), muchos de ellos además no tenían ningún tipo de protección como ser una caseta o alambrado que impida el contacto de animales con el pozo.

Otro asunto preocupante es el vandalismo, sobre todo en pozos pertenecientes a OSE, en algunos casos se pudo observar la rotura y/o robo de los alambrados perimetrales al pozo o el robo de llaves reguladoras de la presión del agua.

6.2.5. Hidrogeoquímica

La composición química de las aguas subterráneas es controlada por varios factores entre los que se incluyen la mineralogía de los acuíferos y de las cuencas hidrográficas, la composición de la precipitación, la topografía y el clima (Güler et al., 2002). De la

combinación de estos se obtienen diferentes tipos que cambian temporal y espacialmente. El estudio de los procesos hidroquímicos colabora en el entendimiento del origen y distribución del agua subterránea, las mezclas de agua de diferentes orígenes, la influencia de la actividad antrópica sobre la calidad del agua subterránea, entre otros (Custodio, 1983).

Los resultados de los parámetros medidos *in-situ* en 13 pozos (ver ubicación Figura 24) se expresan en la Tabla 19. En la Tabla 20 se presentan los datos químicos reportados por el laboratorio del CENUR.

En términos de pH, la mayoría de los valores se encuentran entre 6,40 y 7,90. Hay un único valor que se aleja del rango y es el encontrado en el pozo AP11 que tiene un pH de 5,4.

Respecto a la conductividad eléctrica, los valores rondan entre los 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 430 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nuevamente el valor que se aleja del grupo es el correspondiente al pozo AP11 con una conductividad de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El pozo AP11 pertenece a un particular, al visitarlo se observó que el pozo se encuentra sin losa sanitaria ni protección, lo cual lleva a inferir que el agua del pozo es principalmente de lluvia.

Tabla 21: valores *in situ* medidos en los pozos relevados.

Muestra	Litología de aporte	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
AP1	Arapey y Rivera/Tbó	290	23,8	7,44
AP2	Rivera/Tbó	-	-	6,5
AP3	Rivera/Tbó	359	21,2	6,4
AP4	Arapey	430	21,5	7,78
AP5	Rivera/Tbó	200	20	7,4
AP6	Arapey, Rivera/Tbó y PreSAG	416	20,3	7,9
AP7	Rivera/Tbó	143	18	6,96
AP8	Rivera/Tbó	188	18	6,98
AP9	Rivera/Tbó	243	20	7,44
AP10	Rivera/Tbó	242	21,8	7,44
AP11	Arapey (<i>intertrapp</i>)	40	20	5,4
AP12	Arapey y Rivera/Tbó	270	18	7,0
AP13	Arapey y Rivera/Tbó	305	22	7,72

Tabla 22: datos obtenidos a partir del análisis en el Laboratorio de Aguas y Suelos del CENUR Salto.

ID	Alcalinidad [mgCaCO ₃ /L]	Dureza Total [mgCaCO ₃ /L]	Cl- [mg/L]	Nitratos [mg/L]	Sulfatos [mg/L]	Nitrito [mg/L]	Fluoruro [mg/L]	Bromuro [mg/L]	Fosfato [mg/L]	Bicarbonato [mg/L]	Carbonato [mg/L]	Sodio [mg/L]	Potasio [mg/L]	Magnesio [mg/L]	Calcio [mg/L]	Litio [mg/L]	Amonio [mg/L]
AP1 pozo particular	52,40	122,20	0,83	0,50	2,44	ND	0,22	ND	ND	183,00	ND	5,55	2,81	3,09	10,67	0,0019	ND
AP2 Escuela Guayubira	13,70	32,46	2,32	10,42	1,12	0,08	0,07	0,04	ND	47,20	ND	3,92	3,83	0,11	0,93	0,0003	ND
AP3 pozo particular	15,90	40,01	1,78	5,72	0,65	0,01	0,11	0,11	ND	63,90	ND	1,42	3,05	0,71	2,83	0,0004	ND
AP4 pozo particular	84,30	137,47	5,23	0,07	8,89	ND	0,43	0,05	ND	264,00	ND	16,69	2,85	3,34	12,50	0,0010	ND
AP5 - 1.4.016	38,70	135,56	2,81	2,98	1,82	0,02	0,31	ND	0,35	166,80	ND	3,56	3,19	2,40	7,17	0,0180	ND
AP6 - 410	45,60	133,65	24,62	4,26	6,81	0,83	1,28	1,28	ND	230,70	ND	17,93	6,50	4,83	3,24	0,1651	ND
AP7 - 5.1.005	29,60	80,19	2,78	1,46	0,67	0,09	0,25	0,03	0,62	119,60	ND	2,22	3,56	1,09	5,83	0,0018	ND
AP8 - 5.1.006	34,20	91,65	3,55	2,16	1,24	0,12	0,25	ND	0,39	113,90	ND	3,37	3,27	2,09	6,41	0,0027	ND
AP9 - 5.1.002	38,70	143,20	1,60	2,37	1,30	ND	0,12	0,04	ND	164,00	ND	3,37	3,38	4,05	7,49	0,0019	ND
AP10 - 5.1.003	41,00	154,65	0,58	0,37	0,56	ND	0,11	ND	ND	202,90	ND	2,84	2,98	3,00	8,81	0,0013	ND
AP11 - pozo particular	2,30	40,10	3,65	4,53	2,02	ND	0,01	ND	ND	72,20	ND	0,00	3,42	0,00	1,02	0,0031	ND
AP12 - 1.4.004	57,00	135,56	1,79	7,43	2,07	ND	0,16	ND	0,41	144,60	ND	2,79	3,23	4,16	9,41	0,0006	ND
AP13 - pozo particular	54,70	152,74	1,65	0,28	1,78	ND	0,31	0,04	ND	252,90	ND	5,33	3,21	2,53	10,19	0,0064	ND

El tipo de agua en la mayoría de las perforaciones del área de estudio, según el diagrama de Piper, indiferentemente de si se trata de areniscas recubiertas por basaltos o aflorantes, se clasifica como bicarbonatada cálcica y magnesiana (Figura 52). El agua subterránea perteneciente a las muestras AP2, AP6 y AP11, en cambio, es bicarbonatada sódica.

Llama la atención los resultados de la muestra AP2 ya que la misma fue tomada de un pozo que se encuentra captando agua de las areniscas pertenecientes al SAG y los datos no son coincidentes con otras muestras similares (como AP3) ni con los datos antecedentes de esa zona. Como ejemplo, la muestra AP2 muestra valores superiores respecto a otras muestras de: nitratos, sulfatos y sodio y valores menores de calcio.

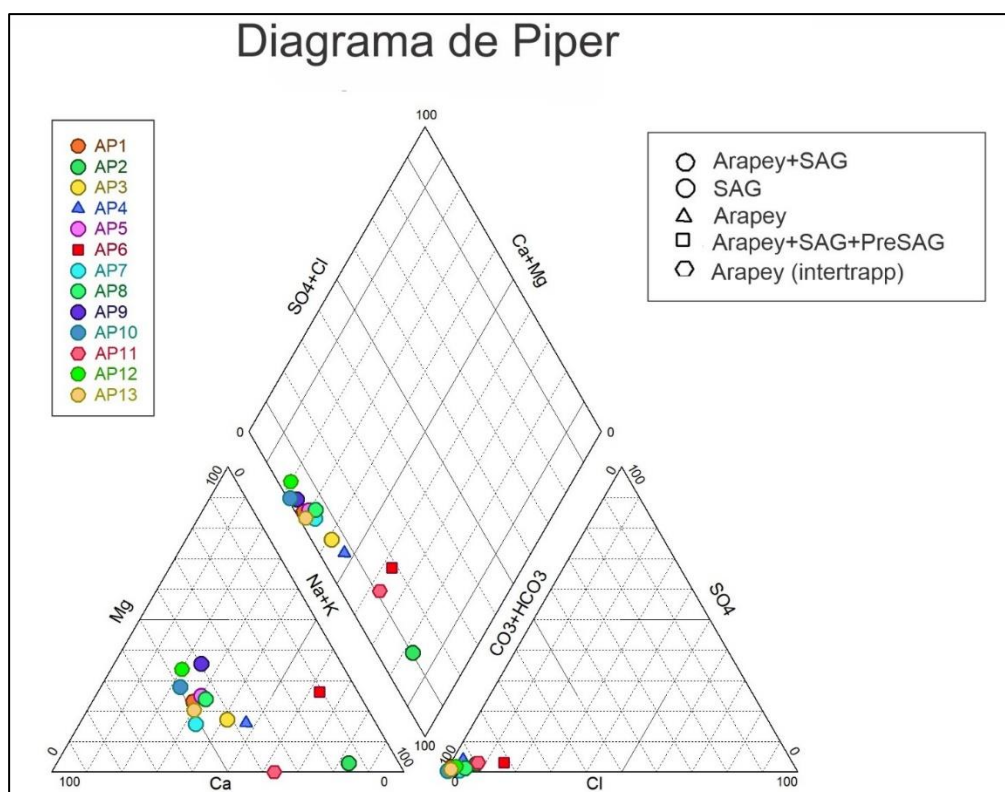


Figura 52: diagrama Piper utilizado para clasificar las aguas subterráneas muestreadas y analizadas en este trabajo. Los símbolos utilizados corresponden al origen litológico de las muestras, tal como se observa en la leyenda de la derecha.

El diagrama de Stiff permite visualizar mejor las concentraciones presentes en el agua de los elementos mayores. Estos diagramas se ubicaron geográficamente según la muestra a la que pertenecen para una mejor correlación con la geología presente en superficie (aunque no siempre refleje la unidad de la cual el agua subterránea es captada) (Figura 53).

A partir de los resultados químicos obtenidos y de la realización de los diagramas de Piper y Stiff, se pueden destacar varios aspectos:

- La muestra AP6 correspondiente al pozo 410 (OSE) que posee aportes de los Acuíferos Arapey y Guaraní e incluso de unidades anteriores al SAG posee una impronta única, en la que resalta su contenido de cloruro (24,6 mg/L) y de sodio (17,9 mg/L).
- Si bien hay varios pozos que captan agua subterránea únicamente del SAG, los mismos se pueden dividir en dos grupos: las muestras AP2 y AP3 por un lado, con valores bajos de alcalinidad y dureza (entre 14 y 16 mgCaCO₃/L y entre 32 y 40 mgCaCO₃/L respectivamente) y por otro lado las muestras AP5, AP7, AP8 y AP9 con mayor alcalinidad y dureza (entre 30 y 39 mgCaCO₃/L y entre 80 y 143 mgCaCO₃/L respectivamente). Vale aclarar que las muestras AP2 y AP3 ambas pertenecen a la ventana del SAG presente en la zona de Guayubira.
- En pozos que captan únicamente agua del SAG, también se pudo concluir que, a mayor profundidad de extracción, mayor es el contenido de bicarbonato del agua.
- La muestra AP10 capta agua subterránea únicamente del SAG, pero estas areniscas tienen una cobertura de 60 metros de basalto e *intertrapps* según el perfil del pozo, se infiere que, debido a la existencia de una vinculación entre estas dos litologías, resulta en un valor de calcio (8,81 mg/L) y de bicarbonato (203 mg/L) más alto que el presente en el agua de areniscas del SAG.
- La muestra AP4 se extrajo de un pozo que tiene todo su perfil formado por basalto, lo cual hace que resulte en una caracterización química particular (valores mayores que el resto de alcalinidad, sulfato, fluoruro y bicarbonato).
- Se puede observar que las muestras que tienen aporte mixto del Acuífero Arapey y el SAG poseen improntas similares (AP1, AP12 y AP13) con valores intermedios entre las muestras que captan únicamente del SAG y la que capta únicamente del Acuífero Arapey.

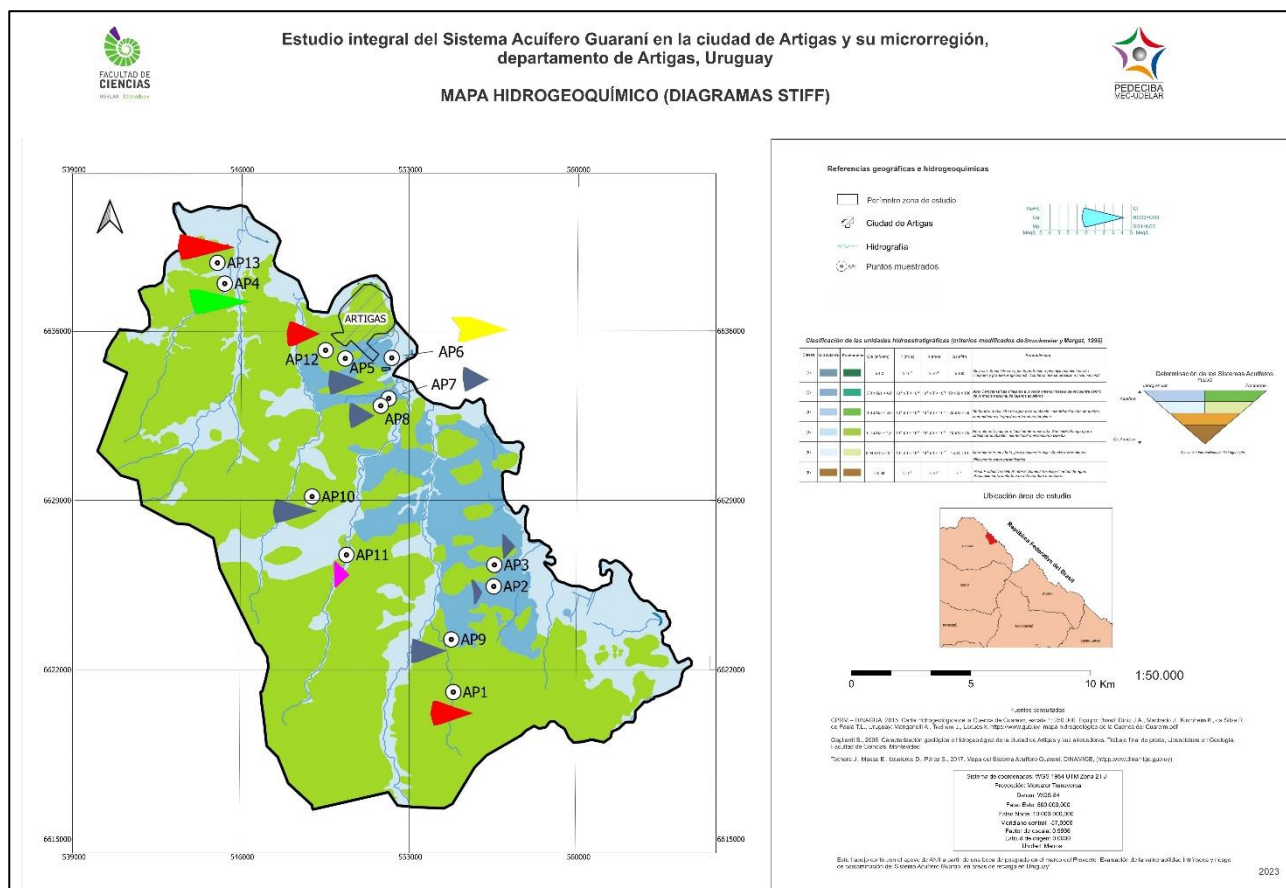


Figura 53: mapa de distribución de los pozos muestreados y el diagrama Stiff correspondiente a cada una de las muestras. Los colores de los diagramas son según el origen del agua: azul – SAG, verde – Arapey, fucsia- Arapey (*intertrapp*), amarillo – Arapey+SAG+PreSAG y rojo – Arapey+SAG. Anexo D

Respecto a los resultados de los análisis químicos realizados a algunos cursos superficiales de la zona de trabajo (ver ubicación de puntos en Figura 24), los mismos pueden observarse en las Tablas 21 y 22.

Tabla 23: datos químicos de aguas superficiales obtenidos *in situ*.

Muestra	Curso	Conductividad (μS/cm)	T (°C)	pH
AS1	A. Pintado Grande	78	14	8,5
AS2	A. Pintadito	43	13	7,5
AS3	A. Tamanduá (aguas arriba)	43	13	7,7
AS4	A. Tamanduá (aguas abajo)	156	12	7,7
AS5	A. Sarandí	110	12,5	7,8

Tabla 24: datos químicos de cursos superficiales obtenidos en el laboratorio.

ID	Alcalinidad [mgCaCO3/L]	Dureza Total [mgCaCO3/L]	Cl- [mg/L]	Nitratos [mg/L]	Sulfatos [mg/L]	Nitrito [mg/L]	Fluoruro [mg/L]	Bromuro [mg/L]	Fosfato [mg/L]	Bicarbonato [mg/L]	Carbonato [mg/L]	Sodio [mg/L]	Potasio [mg/L]	Magnesio [mg/L]	Calcio [mg/L]	Litio [mg/L]	Amonio [mg/L]
AS1	84,30	43,91	7,43	0,97	0,66	ND	0,16	ND	ND	102,80	9,10	1,77	6,79	2,53	9,07	0,0493	ND
AS2	30,00	30,55	2,04	2,22	0,72	ND	0,04	ND	ND	36,10	ND	0,35	3,14	0,28	1,58	0,0014	ND
AS3	27,00	30,55	2,98	0,81	0,84	ND	0,07	ND	ND	33,30	ND	0,44	3,32	0,26	1,74	0,0019	ND
AS4	62,00	63,01	8,69	3,57	3,25	0,06	0,08	ND	0,12	75,00	ND	2,74	3,77	1,29	5,37	0,0002	ND
AS5	71,00	59,19	1,21	0,37	0,82	ND	0,09	ND	ND	86,10	ND	1,61	2,88	0,95	4,90	0,0006	ND

El arroyo Pintado Grande es el que contiene los mayores valores de fluoruro, calcio, potasio y magnesio, respecto a los otros cursos de agua superficiales analizados. También es el único en el que se constata la presencia de carbonato.

Del arroyo Tamandúá se tomaron dos muestras en puntos separados por una distancia de 3 km (en línea recta). De los resultados se concluye que aguas abajo el contenido de todos los elementos químicos aumenta, incluso apareciendo nitrito y fosfato que no eran detectables agua arriba.

6.3. Vulnerabilidad

Entre los varios métodos existentes actualmente para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, como se mencionó anteriormente, en este trabajo se utilizaron: GOD (Foster et al., 1987) y DRASTIC (Aller et al., 1987). Los resultados de la aplicación de ambos métodos pueden observarse en las Figura 54 y 54).

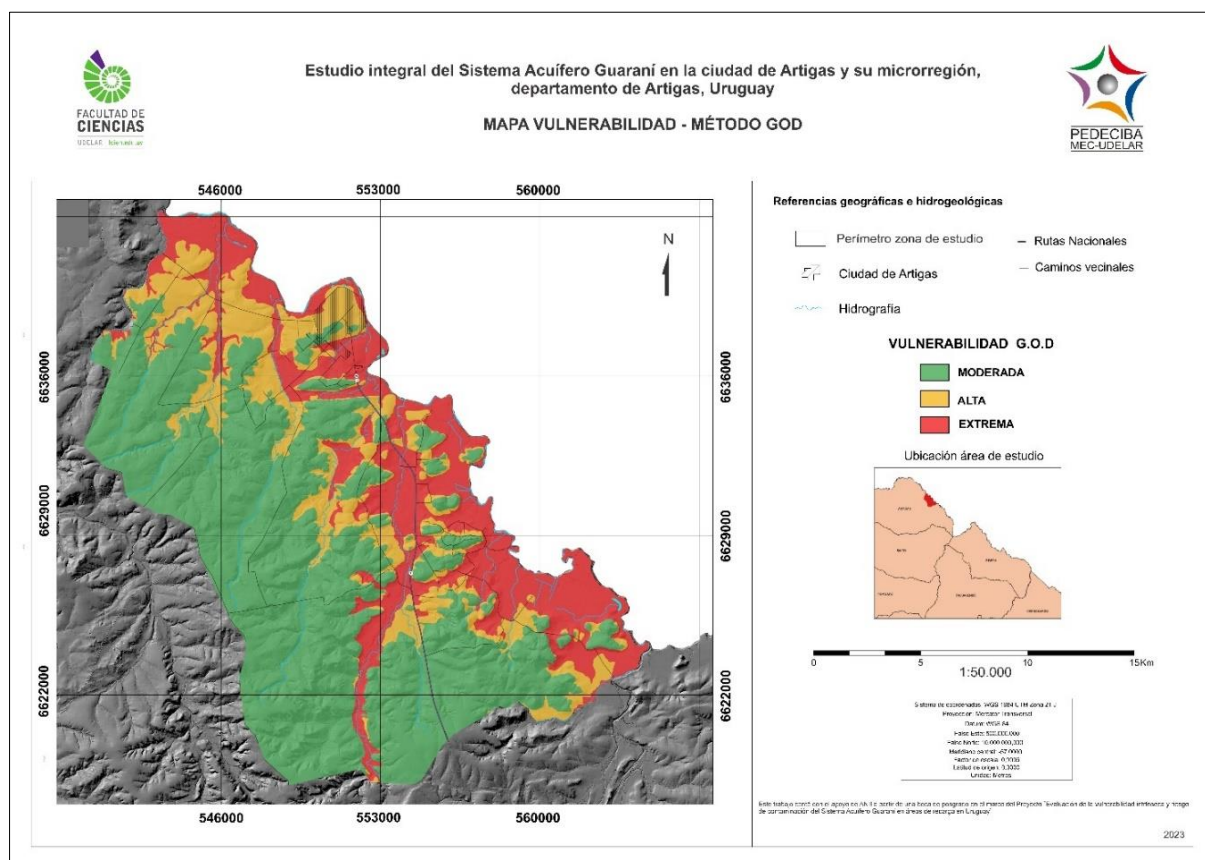


Figura 54: mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio según GOD realizado en este trabajo. Anexo E.

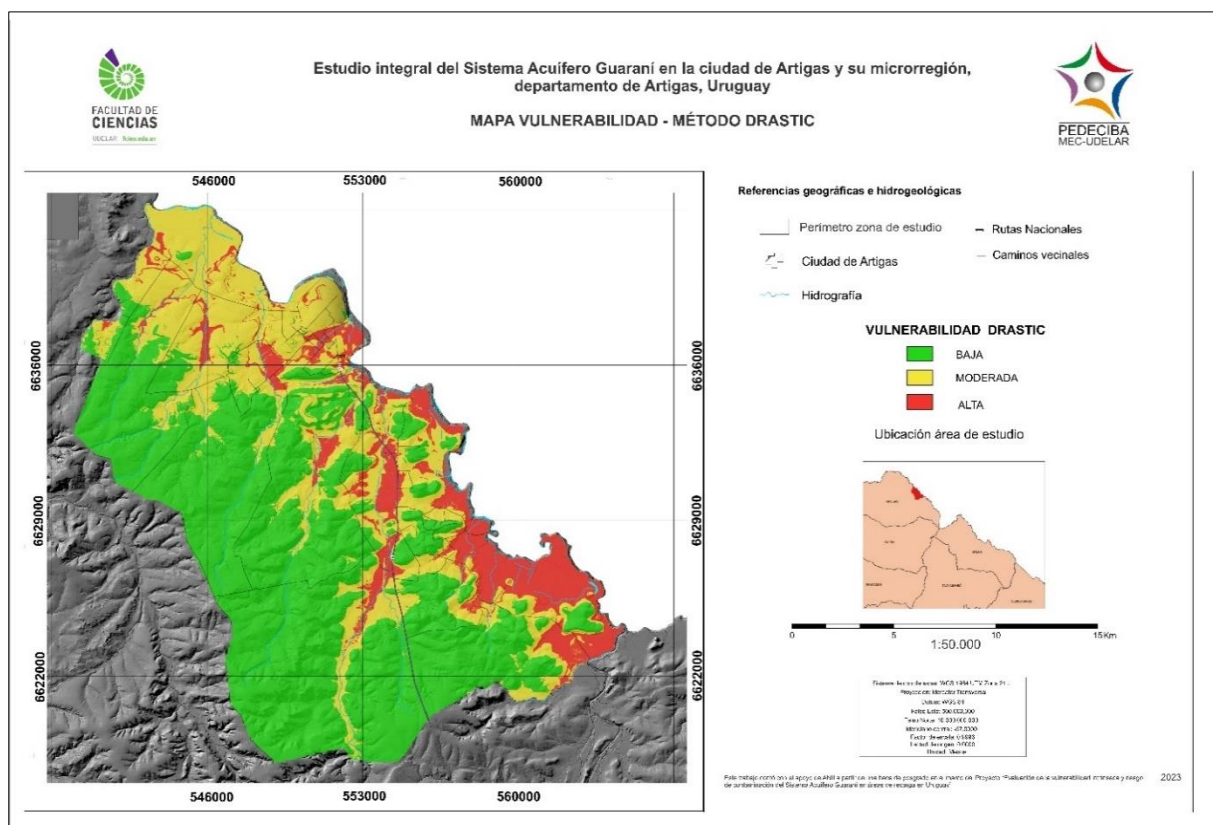


Figura 55: mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio según DRASTIC confeccionado durante este trabajo. Anexo F.

A efecto de definir numéricamente las áreas caracterizadas con sus diferentes índices de vulnerabilidad, se calculó el tamaño de cada pixel y se convirtieron en área (km²). Así, se obtuvieron los valores que identifican el área que ocupa cada categoría (alta, media, etc.) según los dos métodos (Tabla 24).

Tabla 25: resultados de vulnerabilidad según GOD y DRASTIC.

	GOD	km ²	% área
Valoración	Extrema	77,56	24,71
	Alta	55,11	17,56
	Moderada	181,24	57,73
	Baja	0	0
Total		313,91	100

	DRASTIC	km ²	% área
Valoración	Muy alta	0	0
	Alta	41,18	13,12
	Moderada	92,58	29,49
	Baja	180,15	57,39
Total		313,91	100

A simple vista se puede observar que el método GOD es más restrictivo que el método DRASTIC como consecuencia, principalmente, de la cantidad de parámetros que contemplan cada uno.

6.4. Peligro de contaminación e índice de susceptibilidad

Para el peligro de contaminación, se debe tener en cuenta una estrategia amplia que satisfaga las diferentes condiciones del área particularmente si consideramos que el peligro es determinado por las actividades antrópicas que se den en la región evaluada. De esta manera, el peligro de contaminación del acuífero deberá vincularse a su vulnerabilidad, la naturaleza de la carga contaminante y las medidas preventivas propuestas.

Lo ideal es que la evaluación del peligro de contaminación sea realizada actividad por actividad y consecuentemente contaminante por contaminante, resaltando los altamente móviles y/o persistentes y los que son dispuestos bajo el nivel freático.

En el área de Artigas y sus alrededores, las aguas subterráneas tienen una utilización amplia y diversificada, entre las que se destacan: fuente de agua potable, recreación, riego, uso industrial y otros. Las principales actividades contaminantes en dichas áreas incluyen: el saneamiento in situ, las actividades industriales (estaciones de servicio, descargas en el suelo), disposición de residuos sólidos, tratamiento de efluentes, lixiviados generados en cementerios y los cursos superficiales potencialmente contaminados.

Si bien no se han calculado las cargas contaminantes de las fuentes puntuales y las difusas, se considera en la evaluación del peligro la distribución de las fuentes de contaminación sobre las áreas de vulnerabilidad. La mayoría de las fuentes puntuales se concentran en áreas de alta vulnerabilidad donde ofrecen un riesgo alto de contaminación. Si bien podría considerarse que la magnitud de estas actividades no es suficiente para generar una carga de contaminante elevada es importante evaluar caso a caso para definir su impacto.

Cabe destacar que, en este trabajo, si bien se muestran las variaciones del Índice de Susceptibilidad en la Formación Arapey, el mapa fue categorizado sobre el SAG subyacente a los basaltos por considerarse la unidad de mayor susceptibilidad a la contaminación.

En primera instancia, tal como fue mencionado en la metodología, se utilizó el mapa de uso del suelo procedente del proyecto MapBiomás (Figura 56).

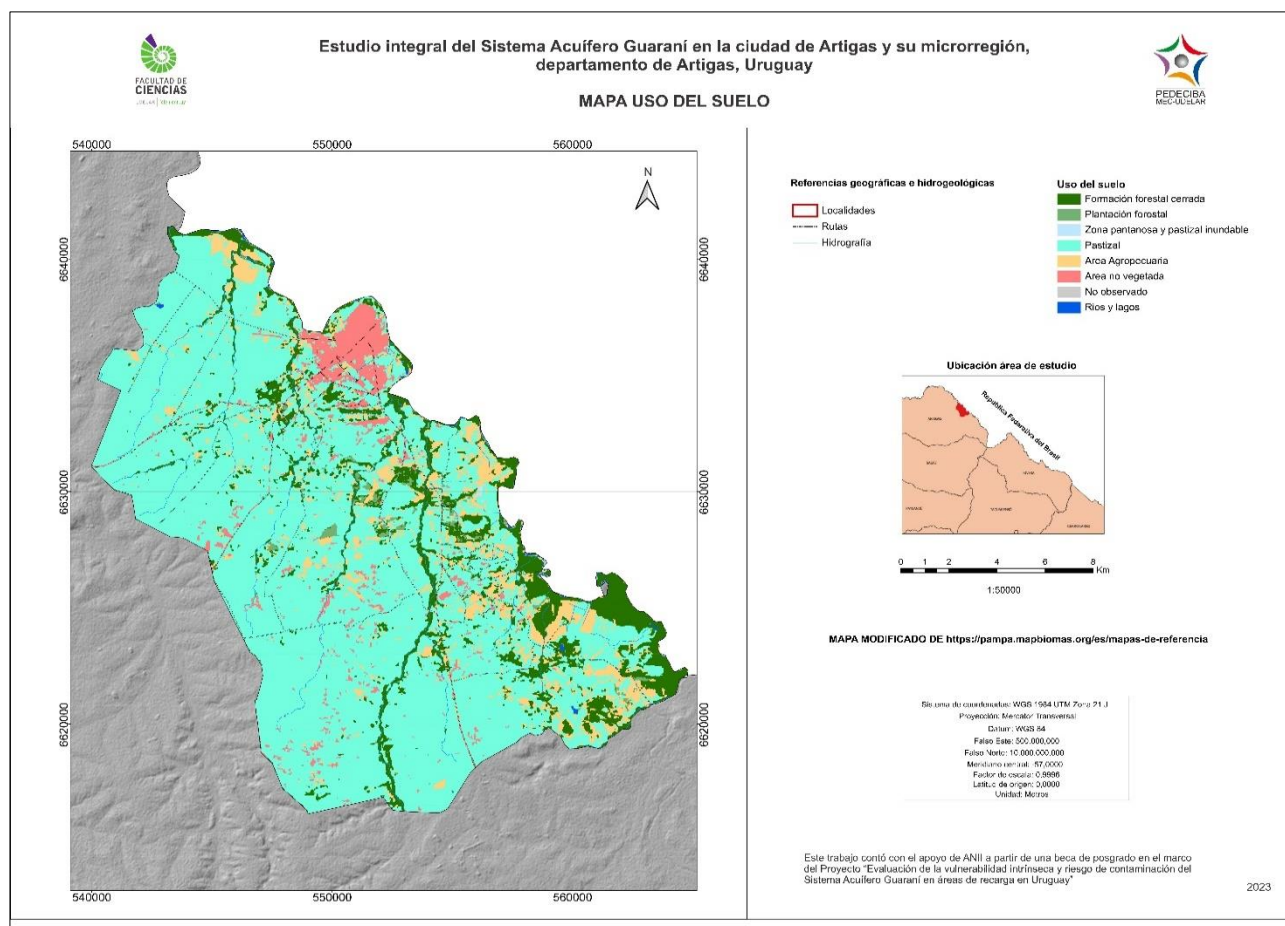


Figura 56: cobertura del suelo en la ciudad de Artigas y su microrregión extraído de MapBiomas Pampa. Anexo G.

En segunda instancia se identificaron posibles fuentes contaminantes puntuales y difusas. Para ello se utilizó el Observador Ambiental de DINACEA que permitió identificar los emprendimientos que tienen control de vertidos y otros emprendimientos relevados durante las salidas de campo. Como posibles fuentes puntuales se identifican: estaciones de servicio, cementerios, vertederos, plantas de tratamiento de efluentes. Las fuentes difusas de contaminación pueden ser los cultivos a los que se le aplican pesticidas o fertilizantes y las zonas sin saneamiento.

Luego, se aplicó la propuesta de Stigter et al. (2006) y se realizó la clasificación de los suelos según su peligrosidad, para luego calcular el Índice de Susceptibilidad, considerando este valor una aproximación al ingreso de contaminantes al acuífero. En la Figura 57, se pueden observar las posibles fuentes contaminantes puntuales y el mapa del Índice de susceptibilidad resultante.

De la misma forma que se realizó para los mapas de vulnerabilidad, se contabilizó el área según la valorización del Índice, donde se puede observar que un poco más de la mitad del área posee un Índice moderado (Tabla 25).

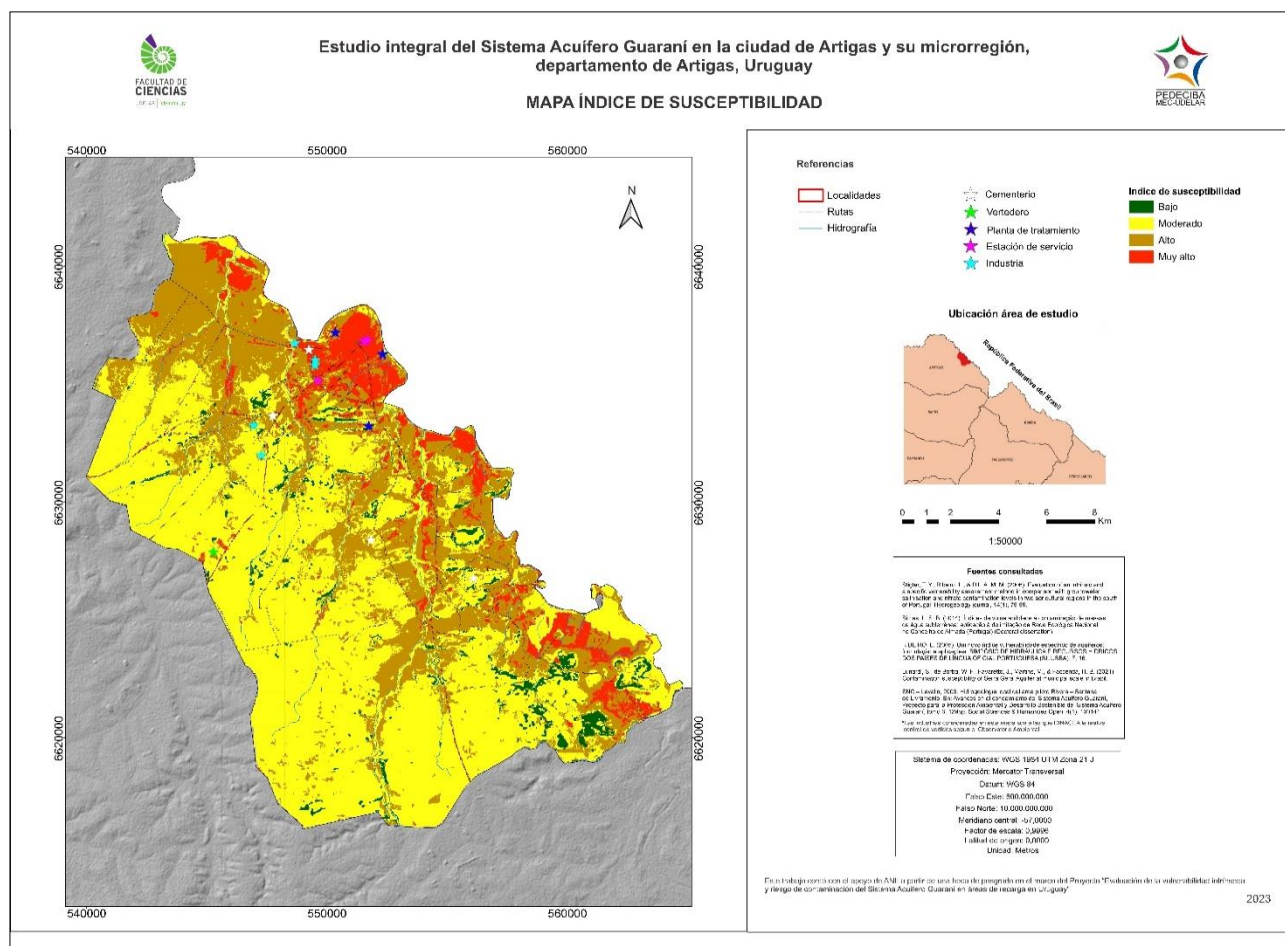


Figura 57: mapa realizado para este trabajo donde se observa el Índice de Susceptibilidad en la zona y las potenciales fuentes contaminantes. Anexo H.

Tabla 26: resultados cuantificados para el Índice de Susceptibilidad.

	Índice	km ²	% área
Valoración	Muy alto	28,29	9,01
	Alto	92,78	29,56
	Moderado	178,27	56,79
	Bajo	14,57	4,64
Total		313,91	100

7. DISCUSIÓN

En este capítulo se interpretan y analizan los resultados obtenidos en este trabajo y cómo estos están relacionados con los objetivos planteados.

En algunos casos se comparan los resultados obtenidos con antecedentes del área para identificar similitudes y diferencias con los mismos.

Se detalla también la importancia de esta investigación para el área de estudio y la protección del agua subterránea de la zona, haciendo recomendaciones para los gestores, así como para futuras investigaciones.

7.1. Geología

El relevamiento geológico permitió definir que las únicas areniscas encontradas en la zona que forman parte de la ventana del SAG, son las que se encuentran en la porción Centro-Este de la microrregión, en el sector sobre el río Cuareim, y formando parte de un bloque delimitado por fallamientos. El resto de las areniscas presentes en la región corresponden a areniscas de *intertrapps* y, por lo tanto, forman parte de la Formación Arapey. Este aspecto tiene una significación relevante al momento de analizar el comportamiento hidrogeológico del área de estudio.

La utilización correcta de esos criterios litoestratigráficos y estructurales durante la confección del mapa geológico del área de estudio, terminó por definir un área sustancialmente menor para el área de afloramiento del SAG cuando comparado con los trabajos precedentes (e.g. Silverio da Silva et al., 2006; Gagliardi, 2008; Techera et al., 2017).

En la Figura 58 y Figura 59, se pueden observar dos mapas geológicos antecedentes en los que se cartografió a las areniscas correspondientes al SAG (Formación Botucatu / Formación Rivera respectivamente). En ambos casos, estas areniscas se extienden hacia el Oeste del área de estudio, lo cual durante este trabajo se comprobó que las mismas corresponden a areniscas de *intertrapps* de la Formación Arapey así como tampoco se consideró la compartimentación del área en bloques delimitados por fallas. En particular, la intercalación de las areniscas a los derrames fue constatada en los relevamientos de superficie y en varios pozos estudiados.

De las dos unidades que conforman al Sistema Acuífero Guaraní, en superficie solamente se desarrolla la Formación Rivera. Las areniscas de la Formación Tacuarembó sólo aparecen en pozos que superen aproximadamente los 40 m de profundidad. Es decir, que los pozos que superen los 40 m de areniscas en el área de estudio, muy probablemente están captando agua subterránea de ambas unidades del SAG.

Respecto a los arenales que se encuentran en el territorio brasileiro, al Este de la zona de Guayubira/La Estiva, no hay antecedentes que identifiquen estos arenales en territorio uruguayo y durante este trabajo tampoco se pudo comprobar su existencia.

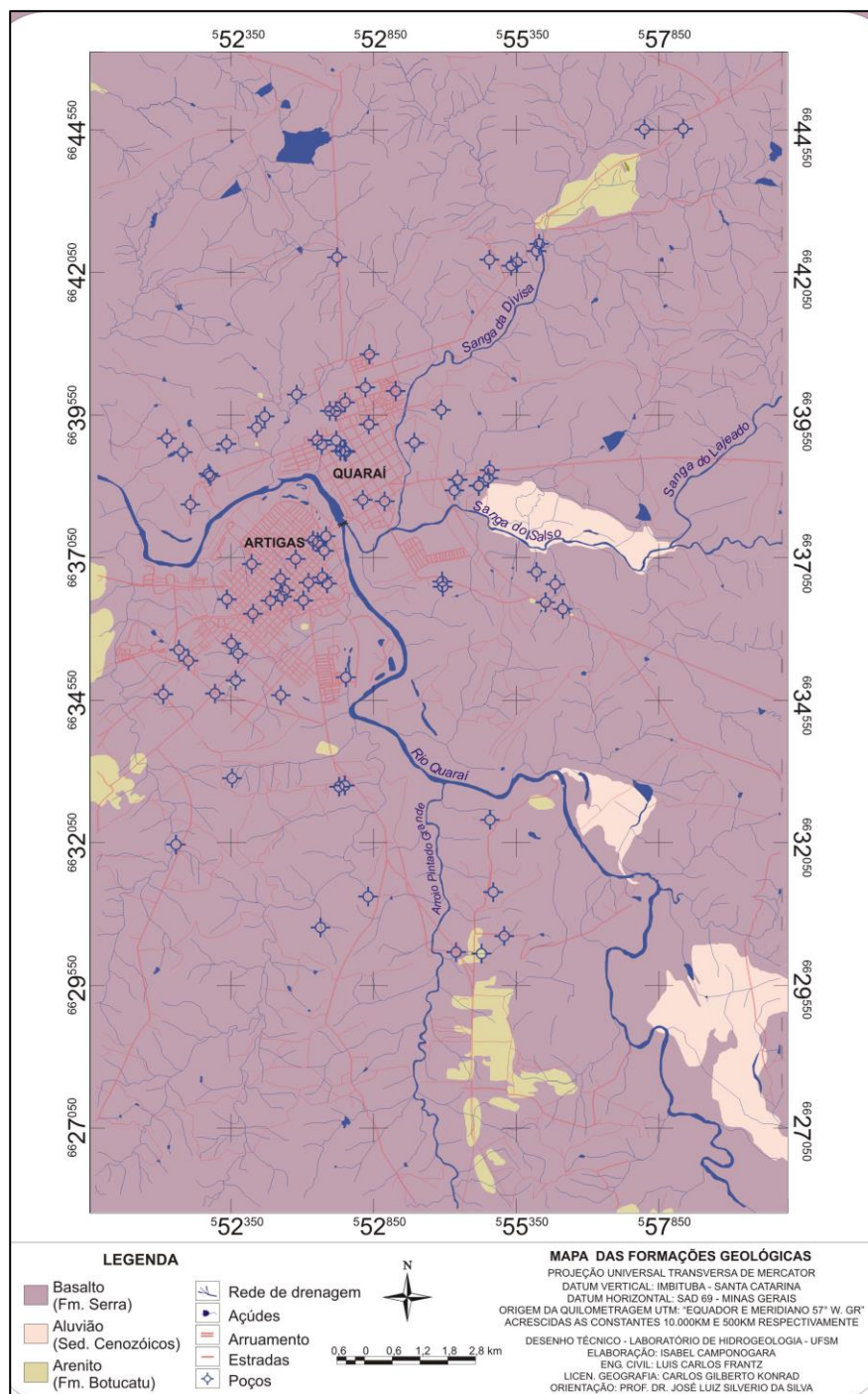


Figura 58: mapa geológico de la zona Artigas – Quaraí (Silverio da Silva et al., 2006).

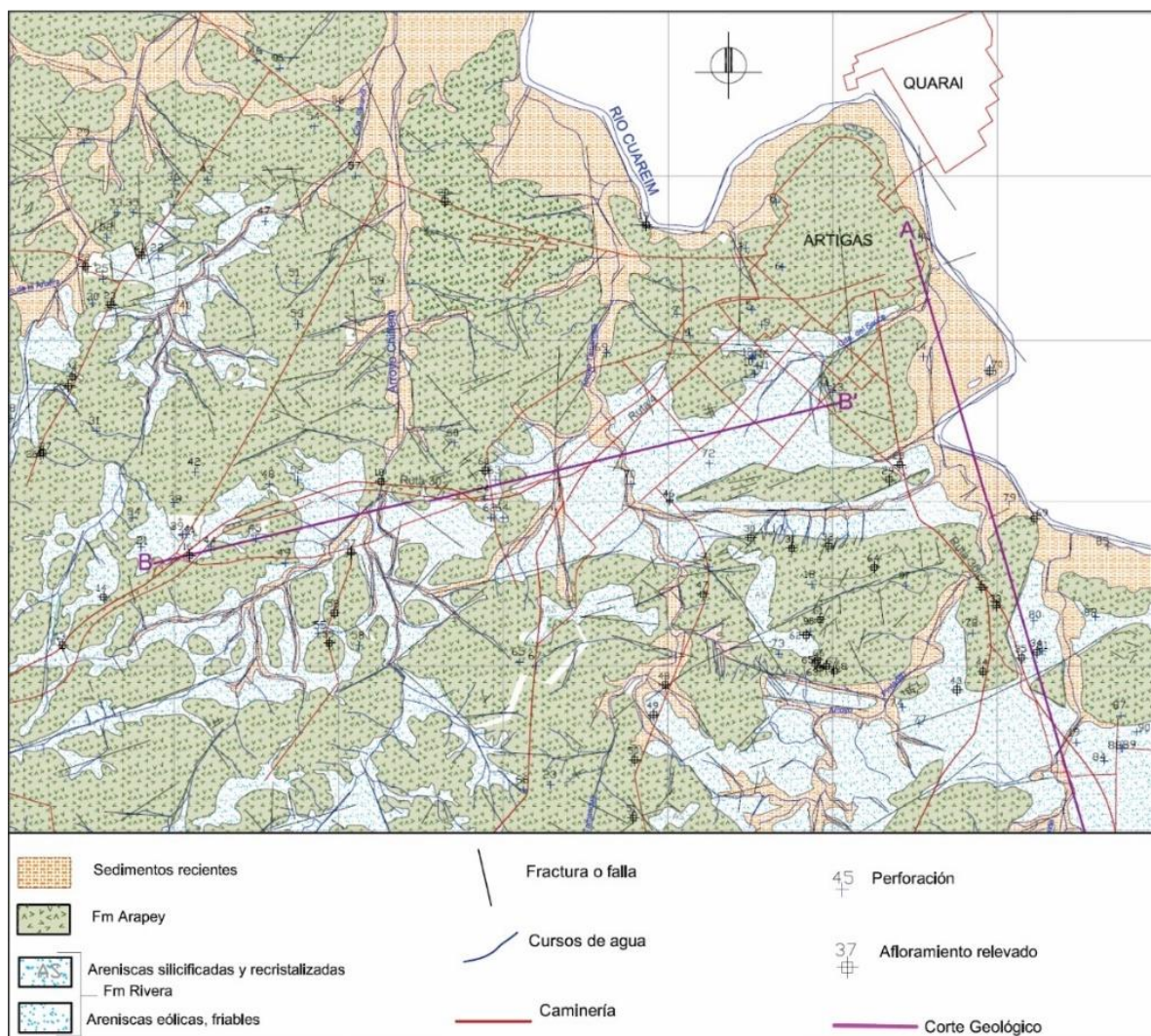


Figura 59: carta geológica de la ciudad de Artigas a escala 1:50.000 (Gagliardi, 2008).

7.2. Hidrogeología y demanda de recursos hídricos subterráneos

La hidrogeología en la zona de estudio está básicamente formada por dos unidades hidrogeológicas: la Formación Arapey de comportamiento fisurado y el SAG que conforma un acuífero poroso. Ambas unidades son muy utilizadas en la zona, aunque los mayores caudales suelen extraerse de los pozos que captan agua del SAG.

Una particularidad encontrada, es que el espesor máximo de las areniscas de *intertrapps* ronda los 35 m, lo cual es similar a los espesores máximos de la Formación Rivera. Sin embargo, el comportamiento hidrogeológico de estas unidades es muy diferente, ya que en el caso de los *intertrapps* estos se encuentran generalmente silicificados, lo que le otorga un comportamiento similar a un acuífero fracturado.

A partir de la base de datos recolectada durante este trabajo y otros datos recabados en campo se pudo establecer que el flujo del agua subterránea del SAG descarga hacia el río Cuareim. Esto ya se indicaba en estudios anteriores, aunque generalmente se utilizaban datos indiferenciados de los pozos que captan del Arapey o del SAG para hacer la piezometría local. Respecto a los niveles piezométricos, en el estudio realizado por Silverio

da Silva et al. (2006) los niveles máximos y mínimos se ubican entre los 116 y 92 m respectivamente, mientras que, en el trabajo realizado por Ramos et al. (2014), los valores rondan entre los 117 y 89 m (Figura 60). En las isopiezas del SAG estimadas en esta tesis, los valores se encuentran entre los 120 y los 90 m, lo cual demuestra que los valores se han mantenido estables durante el tiempo pese al crecimiento en la demanda de agua.

En el área de Artigas – Quaraí también existe un modelo numérico de flujo (Saprizza et al., 2011) en el que también se concluye que el flujo del agua subterránea tanto desde el territorio uruguayo, como desde el territorio brasilero, se dirige hacia el río Cuareim, descargando en este curso de agua.

Sobre la demanda y uso actual de agua, es importante remarcar que los datos son estimativos, ya que al tener un bajo número de pozos registrados en DINAGUA, no se puede conocer con exactitud la cantidad de agua que se extrae.

Los únicos datos sobre extracción de agua con los que se cuenta en la zona y se pueden comparar con el obtenido en este trabajo, son, en primera instancia, el presentado por DINAMIGE (2009), quienes estiman a partir del análisis de 193 perforaciones (reuniendo datos de la propia institución, de PRENADER y de empresas perforadoras), que la extracción anual en la ventana de Artigas sería de 14.000.000 m³. Saprizza et al. (2011), estiman a partir del análisis de 27 pozos ubicados en la zona de Artigas-Quaraí que la extracción sería de 9691 m³/día, lo cual resulta en poco más de 3.000.000 m³ anuales.

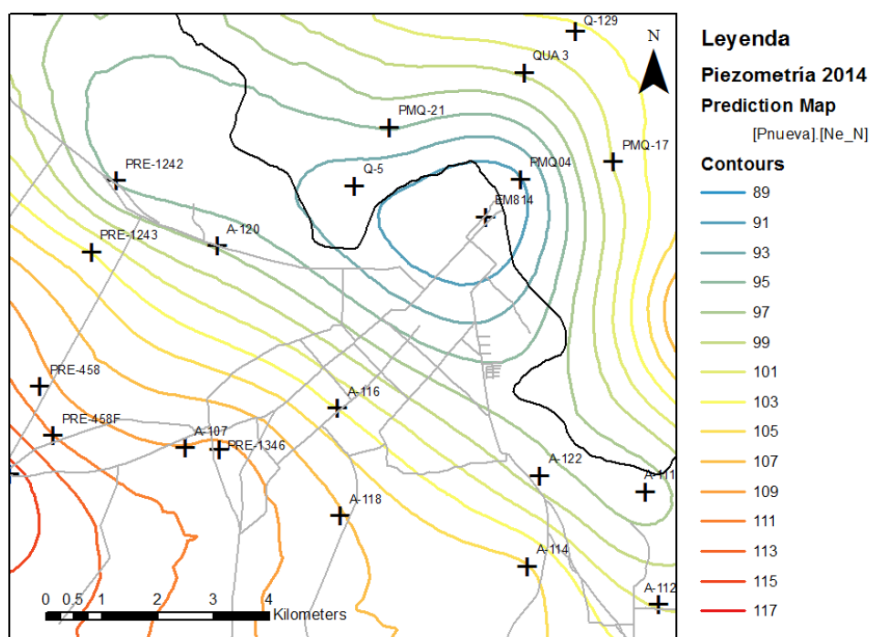


Figura 60: piezometría de la zona de Artigas – Quaraí (Ramos et al., 2014).

7.3. Hidrogeoquímica

Sobre la hidroquímica, los valores obtenidos coinciden con los obtenidos en estudios antecedentes e incluso con los análisis que realiza el laboratorio de OSE de los pozos que administra y que se pudo acceder a los resultados. Si bien hay información antecedente

variada, no toda la existente cuenta con los análisis de parámetros suficientes como para clasificar el agua utilizando el diagrama Piper. Los que cuentan con análisis de detalle se presentan en el siguiente diagrama (Figura 61).

Se puede observar en el diagrama que los antecedentes coinciden aproximadamente con los datos de este trabajo. El pozo 410 que como ya se mencionó no solo recibe aportes del SAG, sino que también de unidades anteriores, es el que en todos los diagramas realizados queda separado del grupo.

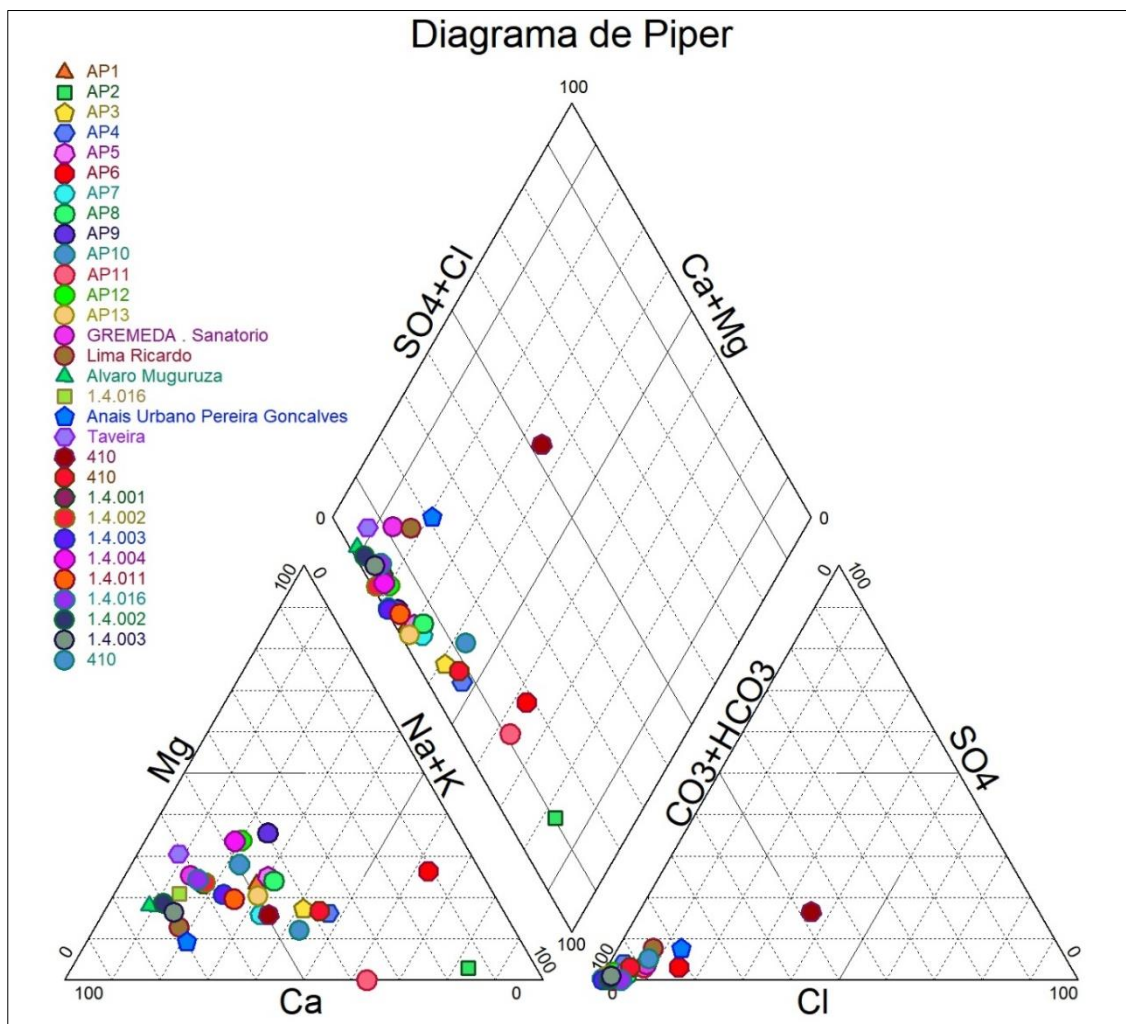


Figura 61: diagrama Piper donde se colocaron los valores químicos antecedentes y los obtenidos en este trabajo. La terminología AP significa que son análisis de pozos realizados durante este trabajo, el resto de los análisis que figuran son antecedentes.

7.4. Vulnerabilidad e índice de susceptibilidad

Con respecto a la vulnerabilidad, se utilizaron dos métodos para su cuantificación: GOD y DRASTIC. El primero tiene en cuenta únicamente tres parámetros, mientras que el segundo, toma en cuenta siete parámetros. Los resultados muestran que el método GOD es más restrictivo ya que más de la mitad del área de trabajo presenta una valoración

moderada, mientras que en el método DRASTIC, más de la mitad del área posee valoración baja, lo cual es más permisivo.

Cabe aclarar, que los mapas de vulnerabilidad son una herramienta que debe utilizarse a efectos no prohibitivos, sino que sirven para prevenir y controlar, por ejemplo, emprendimientos que se quieran establecer en zonas más susceptibles.

Uno de los usos de los mapas de vulnerabilidad, y de su clasificación asociada, es poder determinar si determinadas actividades son recomendables de realizarse en un determinado lugar, si no lo son o si sí lo son, pero con ciertos estudios extra. Una guía respecto a las actividades puede tomarse de Foster et al. (2002) en la que según el tipo de actividad y la vulnerabilidad de la zona donde quiera emplazarse se podrá definir si es recomendado su emplazamiento allí (Tabla 27).

Lo mismo sucede con el mapa que refleja el índice de susceptibilidad, el mismo está estrechamente ligado con el uso del suelo y procura que en zonas más susceptibles las actividades que se realicen sean las menos contaminantes o que se tomen todas las acciones ambientales posibles por parte de los emprendimientos para que no existan impactos en el agua subterránea.

Sobre los instrumentos de ordenamiento territorial de Artigas, tanto el Plan Local de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible como las Directrices Departamentales tienen en cuenta acciones de protección de los recursos hídricos subterráneos. Sin embargo, según se pudo saber, esa disposición no está activa y al día de hoy no hay ninguna medida que proteja a las perforaciones que son utilizadas para abastecimiento humano.

Tabla 27: Matriz de aceptabilidad de las actividades potencialmente contaminantes de acuerdo a la vulnerabilidad de los acuíferos (Foster et al., 2022).

ACTIVIDAD POTENCIALMENTE CONTAMINANTE QUE REQUIERE MEDIDAS DE CONTROL	SEGÚN VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO		
	Alta	Media	Baja
Tanques Sépticos, Pozos Negros Letrinas Propiedades individuales Propiedades comunales, públicas Gasolineras	A A PA	A A A	A A A
Instalaciones de Disposición de Residuos Sólidos Municipal doméstico Construcción/ inerte Peligros industriales Industrial (clase I) Industrial (clase II y III) Cementerio	PN A N PN N PA	PA A N PA N A	A A PA A PA A
Extracción de Petróleo y Minerales	PA	PA	A

Material de construcción (inerte)	N	PA	A
Otros, incluyendo petróleo y gas	N	PA	A
Tuberías de combustibles			
Predios Industriales			
Tipo I	PA	PA	A
Tipo II y III	PN/N	PA/N	PA/PN
Instalaciones Militares	PN	PA	PA
Lagunas de Infiltración			
Agua municipal/de enfriamiento	A	A	A
Efluente industrial	PN	PA	PA
Drenaje por Sumideros			
Techo de edificios o casas	A	A	A
Camino principal	PN	PA	A
Camino menor	PA	A	A
Áreas de recreación	A	A	A
Estacionamientos de vehículos	PA	A	A
Áreas industriales	PN*	PA	A
Aeropuertos/ estaciones de trenes	PN	PA	A
Aplicación de Efluentes en el Suelo			
Industria alimenticia	PA	A	A
Todas las otras industrias	PN	PA	A
Efluentes de agua residual doméstica	PA	A	A
Lodo proveniente de agua residual doméstica	PA	A	A
Lodo de agua residual de corrales	A	A	A
Cría Intensiva de Ganado			
Laguna de efluentes	PA	A	A
Drenaje de corrales y áreas de	PA	A	A
Alimentación de animales			
Áreas Agrícolas			
Con pesticidas	PN	A	A
Sin control del uso de fertilizantes	PN	A	A
Almacenamiento de pesticidas	PN	PA	A

N= No aceptable en prácticamente todos los casos; PN= probablemente inaceptable, excepto en algunos casos sujetos a investigación detallada y diseño especial; PA= probablemente aceptable sujeto a diseño e investigación específicos; A=aceptable sujeto a diseño estándar

8. RECOMENDACIONES

Considerando la importancia que esta investigación tiene para el conocimiento y preservación de los recursos hídricos subterráneos de la ciudad de Artigas y su microrregión y en función de los resultados obtenidos, se formulan algunas sugerencias tanto para futuras investigaciones en la zona como para las instituciones gestoras de los recursos hídricos y el medio ambiente.

- Realizar un censo de pozos de la zona de trabajo, en el cual se realicen medidas de niveles de agua de los pozos, de manera de crear una nueva y actualizada piezometría del área con valores actuales. Este censo también permitirá conocer el estado constructivo externo de los pozos y si estos se encuentran en uso o inactivos.
- Realizar estudios que permitan obtener un balance hídrico en la zona, permitiendo cuantificar la recarga y descarga. Este trabajo demandaría una campaña de mediciones de niveles en pozo para actualizar los datos existentes y para mejorar el conocimiento del flujo del agua subterránea.
- También, se recomienda realizar estudios químicos en el agua que permitan conocer si existe algún tipo de contaminante antrópico en la zona, ya sea plaguicidas, fertilizantes, hidrocarburos, grasas y aceites, etc., que pongan en riesgo la calidad del agua.
- Un estudio interesante sería realizar análisis de nicotina en agua subterránea en la zona de cultivos de tabaco para conocer si existe o no afectación de los mismos a la calidad del agua.
- Creación de un programa de regularización de perforaciones ante DINAGUA e iniciativas de difusión sobre la legislación en materia de aguas subterráneas en Uruguay con foco en la importancia del registro de perforaciones.
- Talleres de concientización sobre el uso de agua subterránea para la población en general, aumentando el sentido de pertenencia de este recurso, promoviendo su cuidado y protección.
- Acciones para erradicar el vandalismo en las perforaciones.
- Generar intercambio de información y acciones en conjunto con Brasil.
- Una recomendación a futuro sería crear una red de monitoreo en la zona que permita conocer algunos parámetros de calidad y variaciones en el nivel del agua.
- Se recomienda que en futuros planes territoriales se tengan en cuenta los productos generados en este trabajo a modo de generar un uso responsable del agua subterránea.

9. CONCLUSIONES

A partir de datos geológicos, hidrogeológicos, de vulnerabilidad y de peligro de contaminación, se lograron cumplir los objetivos propuestos y realizar productos que en primer lugar serán de ayuda a los tomadores de decisión, así como a usuarios y a otros actores relacionados al agua subterránea en la ciudad de Artigas y su microrregión.

A partir de este trabajo se pudo crear una base de datos de casi 330 pozos, los cuales provienen de varias fuentes como DINAGUA, DINAMIGE, OSE y PRENADER. Estos datos fueron colocados en QGIS, lo que permitió analizarlos y crear productos como los promedios de caudal por acuífero o la estimación del flujo del agua del SAG en el área.

Se obtuvo como producto un mapa geológico, en el que se identificó que en el área de estudio afloran las formaciones Rivera (areniscas - Cretácico Inferior) y Arapey (areniscas y basaltos - Cretácico Inferior) así como sedimentos de naturaleza aluvial y coluvial (arenas, gravas, arcillas), asociados la mayoría de estos sedimentos a la dinámica de los principales cursos de agua. La distinción entre areniscas de la Formación Rivera y las areniscas de intertrapps de la Formación Arapey se pudo realizar gracias al estudio estructural realizado en este trabajo, y es relevante no solo para la geología de la zona, sino también para entender el comportamiento hidrogeológico en algunos sectores del área de estudio.

Respecto a la hidrogeología, se pudieron identificar dos unidades principales: Arapey y el Sistema Acuífero Guaraní. El flujo del agua subterránea permite inferir que la zona de descarga del SAG es principalmente hacia el río Cuareim, lo cual no quita que se produzcan algunas descargas locales en los arroyos y cañadas de la zona.

El tipo de agua en la mayoría de las perforaciones del área de estudio, tanto confinada por basaltos como aflorantes, se clasifican mayormente como bicarbonatadas cálcicas y magnesianas. Se recomienda que en futuras investigaciones se puedan realizar un mayor número de análisis químicos e incluso analizar posibles contaminantes como fertilizantes y plaguicidas (especialmente en la zona de la ventana).

Respecto al agua subterránea extraída en el área de trabajo, se estimó sumando los volúmenes extraídos por los pozos registrados ante DINAGUA y los volúmenes extraídos por los pozos pertenecientes a OSE, dando un total mínimo de 4.774.668 m³ anuales de agua subterránea extraída.

La vulnerabilidad intrínseca del acuífero aplicando los métodos GOD y DRASTIC, resultó en que la mayoría del área de estudio posee una valoración Moderada (según GOD) o baja (según DRASTIC). Eso no quita que existan zonas de alta vulnerabilidad, especialmente en las zonas de la ventana, donde afloran las areniscas. Es necesario que en esas zonas donde la vulnerabilidad es alta se creen medidas de protección para los recursos hídricos subterráneos para evitar la contaminación de los mismos.

Las posibles fuentes de contaminación del agua subterránea que se pudieron identificar son principalmente cementerios, estaciones de servicio, vertederos tanto activos como abandonados y algunas industrias como los frigoríficos. La actividad agrícola y ganadera también puede ser una fuente de contaminación difusa mediante el uso de fertilizantes y pesticidas.

El índice de susceptibilidad que refleja el peligro de contaminación de los acuíferos es principalmente moderado, aunque en la ciudad de Artigas llega a ser muy alto, por lo tanto, habría que establecer medidas de protección y control de las actividades antrópicas que allí se realizan.

BIBLIOGRAFÍA

- Aller, L., Lehr, J.H., Petty, R. 1987. DRASTIC: A standardized system to evaluate groundwater pollution potencial using hydrogeologic settings. Nacional Water Well Association, Ohio, 38-57
- Antón, D. 1975. Evolución geomorfológica del norte del Uruguay. Dirección de Suelos y Fertilizantes, Ministerio de Agricultura y Pesca. Montevideo, 1-22.
- Aubet, N., Manganelli, A., Veroslavsky, G. 2018. Estudio territorial integrado del área de recarga del Sistema Acuífero Guaraní (SAG) en la localidad transfronteriza de Artigas (Uruguay). XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Campinas, Brasil.
- Barbulescu, A. 2020. Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. Water 12, no. 5: 1356. <https://doi.org/10.3390/w12051356>
- Bossi, J. 1966. Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, Montevideo, 469 p.
- Bossi, J., Navarro, R. 1991. Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 2: 463-9
- Bossi, J., Ferrando, L.A., Montaña, J., Morales, H., Campal, N., Gancio, F., Piñeiro, D., Schipilov, A., Sprechmann, P. 1998. Carta Geológica del Uruguay, escala 1:500.000. Geoeditores. Montevideo, Uruguay.
- Cámara de Industrias del Uruguay (CIU). 2019. El Interior Industrial: Artigas. Disponible en: <https://www.ciu.com.uy/monitoreo-industrial/artigas/>
- Comisión para el Mapa Geológico del Mundo (CGMW); Asociación de Servicios Geológicos y Mineiros Iberoamericanos (ASGMI); Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino; Brasil. Servicio Geológico de Brasil. Compañía de Pesquisa de Recursos Minerales; Uruguay. Dirección Nacional de Minería y Geología. 2009. Mapa Geológico y de Recursos Minerales de América del Sur (SIG - América del Sur, 1:1 M), Hoja SH21 Concordia (Ar); Uruguayana (Br); Arapey (Ur)
- Camponogara, I. 2006. Vulnerabilidade natural no Sistema Aquífero Guaraní e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY. Dissertação de Mestrado em Geografia e Geociências UFSM, CCNE, Departamento Geociências. 108p.
- Camponogara, I., Silvério da Silva, J.L., Frantz, L., Bessouat, C., Guimaraens, M., Gamazo, P. 2007. Avaliação da vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Guaraní em Quaraí-Artigas usando SIG. Atas do XV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, I Simpósio de Hidrogeologia do Sul-Sudeste, Gramado, RS.
- Collazo, P. 2006. Investigación hidrogeológica del Acuífero Guaraní en el área aflorante de los Departamentos de Rivera y Tacuarembó, Uruguay. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y naturales, Universidad de Buenos Aires.
- CPRM. 1997. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Coord. Feitosa, F. A. C. y Manoel Filho, J. Fortaleza. CPRMLABHID-UFPE. 412 p.
- CPRM – DINAGUA, 2015. Carta Hidrogeológica de la Cuenca de Cuareim, escala 1: 250.000. Programa Marco para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata, en relación con los efectos de la variabilidad y el cambio climático.
- CPRM. 2020. Guia de procedimentos técnicos: volume 1 – cartografia geológica. Organizadores Vladimir Cruz de Medeiros [e] Lúcia Travassos da Rosa-Costa. – Brasília, 170 p. ISBN: 978-65-5664-023-5

- Custodio, E. 1983. Hidrología Subterránea (2 tomos). Omega, 2350 pp.
- De Santa Ana H., Veroslavsky G., 2004. La tectosecuencia volcanosedimentaria de la Cuenca Norte de Uruguay. Edad Jurásico-Cretácico Temprano, pp. 51-74 de Veroslavsky G., Ubilla M. y Martínez S. (eds.): Cuencas Sedimentarias de Uruguay: Geología, Paleontología y recursos naturales – Mesozoico. DIRAC, Montevideo.
- DINAMIGE. 2009. Estimación de la extracción de agua subterránea: principales acuíferos de Uruguay. Informe de Hidrogeología MIEM - DINAMIGE. Fuente: www.dinamige.gub.uy
- do Amarante, F. 2017. Arquitetura de facies e evolução estratigráfica da Formação Tacuarembó, Bacia Norte-UY. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 40 p.
- ENGEORPS. 2014. Estudo de Vulnerabilidade Natural à Contaminação e Estratégias de Proteção do Sistema Aquífero Guaraní nas Áreas de Afloramento. Relatório Final, Agência Nacional de Águas - Brasília: ANA/SIP, Engecorps Engenharia S.A., Tomo I, 337 p.
- El Observador. 2016a. Nota Fumo para sobrevivir. Disponible en: <https://www.elobservador.com.uy/nota/-fumo-para-sobrevivir-2016222500>
- El Observador. 2016b. Nota El tabaco verde: la enfermedad del cigarrillo que no se fuma. Disponible en: <https://www.elobservador.com.uy/nota/el-tabaco-verde-la-enfermedad-del-cigarrillo-que-no-se-fuma-2016222500>
- Ferrando, L., Andreis, R.R., Montaña, J.R., 1987. Estratigrafía del Triásico – Jurásico uruguayo en la Cuenca de Paraná. Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, v1: 373-378, Curitiba.
- Foster, S. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. TNO Comm. Hydrol. Research Proc. & Info 38: 69-86.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. 2002. Protección de la calidad del agua subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. GW. MATE, Banco Mundial. Washington D.C.
- Gagliardi, S. 2008. Caracterización geológica e hidrogeológica de la ciudad de Artigas y sus alrededores. Trabajo Final de Licenciatura en Geología, Facultad de Ciencias, Inédito, Biblioteca de Facultad de Ciencias, 126pp.
- García Delgado, B. 2022. Trabajadores rurales del fumo del Departamento de Artigas: análisis de su realidad. Tesis de grado. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ciencias Sociales.
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Chang, H.K., Caetano-Chang, M. R., Nogueira Pressinotti, M. M., 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 249-265.
- Gómez, A.A. 2007. Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las formaciones Tacuarembó - Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. Tesis de Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 149p
- Guasselli, L., Suertegaray, M., Oliveira, M., Evers, H., Sirangelo, F. 2010. Relação entre a ocorrência de areais e os arenitos da formação Botucatu e Guará, no Sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil. VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia, Recife - PE.
- Güler, C., Thyne, G., Mccray, J., Turner, A. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal. 10. 455-474. 10.1007/s10040-002-0196-6.
- Hausman, A., Fernández, A. 1967. Hidrogeología de los basaltos del NW. Universidad de la República, Comisión de investigación científica, Facultad de Agronomía, Uruguay.

- Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) – MDT – Disponible en: <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/ide-ortoimagen-mdt-de-cobertura-nacional/resource/e33f0906-3b82-4a98-ad83-c9862eb5e86e>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2011. Censo Nacional. Disponible en: <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/datos-y-estadisticas/estadisticas/censo-2011>
- INUMET - Instituto Uruguayo de Meteorología. 2021. Estadísticas climatológicas. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Intendencia de Artigas. 2011. Plan de Desarrollo departamental 2012-2025. Disponible en: <http://www.artigas.gub.uy/wordpress/wp-content/uploads/2013/05/Artigas-PDD-DOCUMENTO-FINAL.pdf>
- Intendencia de Artigas. 2014. Plan Local de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible de la Ciudad de Artigas y su Microrregión.
- Intendencia de Artigas. 2019. Proyecto de Decreto Normativo de las Directrices Departamentales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible – Informe Ambiental Estratégico. Disponible en: <http://ncproyectos.website/images/DIRECTRICES/InformeAmbiental.pdf>
- Lastoria, G., Sinelli, O., Chang Hung, K., Hutcheon, I., Paranhos, A., Gastmans, D. 2006. Hidrogeología da formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. Revista de Águas Subterrâneas, ABAS, v.20, n.1, p.139-150.
- Malagutti, V. 2018. Estudo hidrogeológico e modelo conceitual de fluxo de água subterrânea e superficial na bacia transfronteiriça do Quaraí, Brasil/Uruguai. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Geologia) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- Martínez, S., Ubilla, M. 2004. El Cuaternario de Uruguay. En Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S. (Eds.), Cuencas Sedimentarias de Uruguay. Geología, paleontología y recursos minerales. Cenozoico. DIRAC-FCIEN, 195-228, Montevideo.
- Martínez Valdés, Y., Villalejo García, V. 2018. La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(1), 58-72.
- Molfino, J.H., Morelli, C., Califra, A., Clérico, C., y Petraglia, C. 2000. Zonificación de tierras de la cuenca del río Cuareim, Evaluación de dos sistemas de producción bajo riego. Aportes a su regulación hídrica. Proyecto regional "Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible". (Proyecto GCP/RLA/126/JPN) FAO, Santiago de Chile.
- Montaño, J., Carrión, R., 1990. Optimización de la explotación del Sistema Acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó – Buena Vista. Revista ABAS SUPLEMENTO - Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas 1990.
- Montaño, J., Tujchneider, O., Auge, M., Fili, M., Paris, M., D'Elía, M., Pérez, A., Nagy, M., Collazo, P. y Decoud, P. 1998. Acuíferos regionales en América Latina. SAG. Capítulo argentino – uruguayo. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, 217 p
- Montaño, J. 2003. Recursos hídricos subterráneos. En: Veroslavsky, G., Ubilla, M. y Martínez, S (eds.), Cuencas Sedimentarias de Uruguay: geología, paleontología y recursos naturales - Paleozoico. DIRAC - Facultad de Ciencias, Montevideo, p. 191- 212.
- Muzio, R. 2004. El magmatismo mesozoico en Uruguay y sus recursos minerales. En: Veroslavsky, G; Ubilla, M; Martínez, S. Eds, Cuencas Sedimentarias del Uruguay. Mesozoico. DIRAC. 77-102.
- Oleaga, A.B. 2002. Contribución a la hidrogeología del acuífero Guaraní en el sector Uruguay. Un enfoque integral. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 119 p.
- OSE. Obras Sanitarias del Estado. 2022. Agua Subterránea. Sitio web: <http://www.ose.com.uy/agua/agua-subterranea>

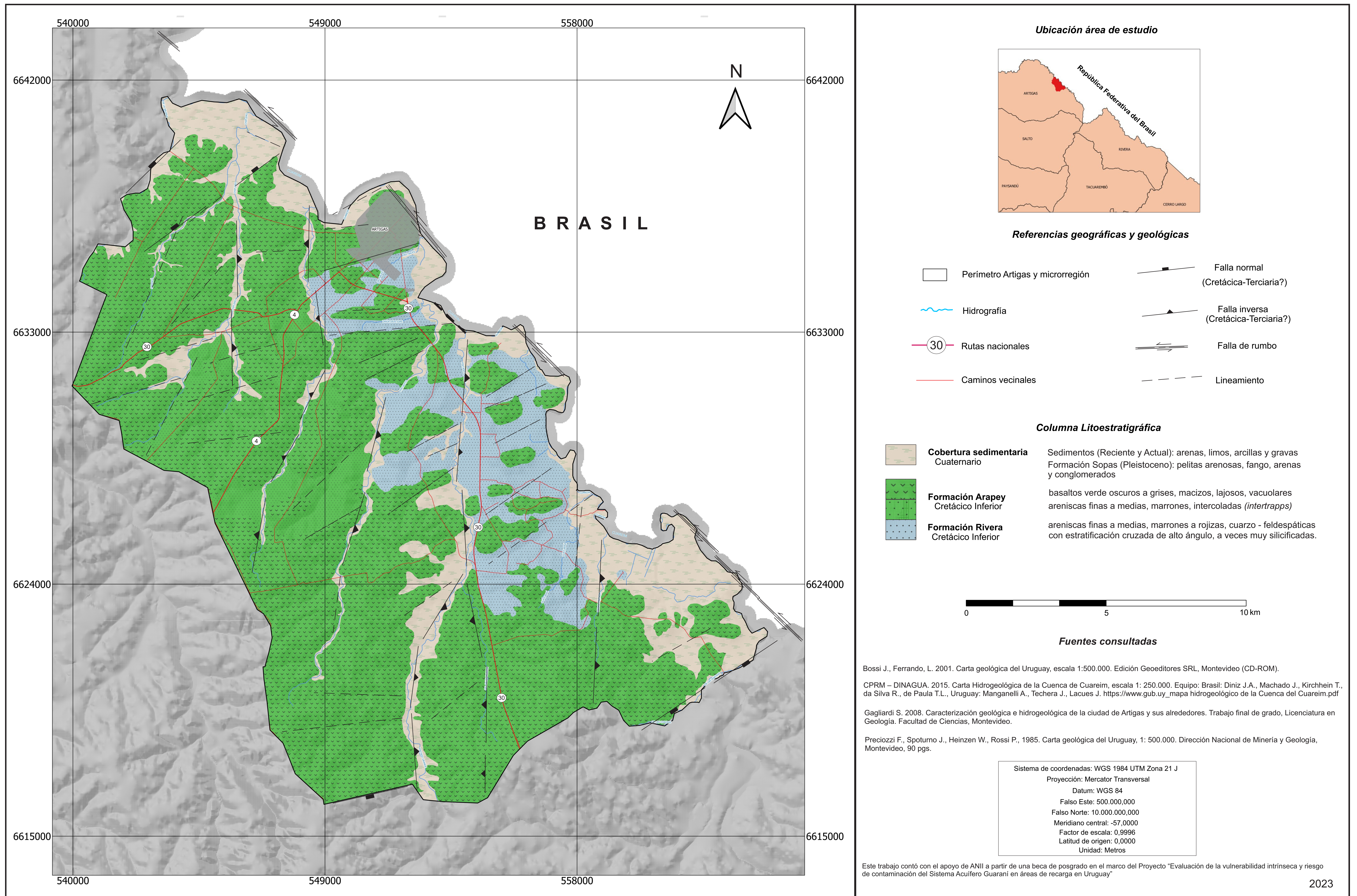
- OTU – OPP Observatorio Territorio Uruguay – Oficina de Planeamiento y Presupuesto. Sitio web <https://otu.opp.gub.uy/perfiles/artigas>
- PEA. 2009. Acuífero Guaraní: Programa Estratégico de Ações / Acuífero Guaraní: Plan Estratégico de Acción - Edición español / portugués. Organización de Estados Americanos - OEA, Brasil, Argentina, Paraguay, Uruguay, 424 p.
- Perea, D., Soto, M., Veroslavsky, G., Martínez, M., Ubilla, M. 2009. A Late Jurassic fossil assemblage in Gondwana: Biostratigraphy and correlations of the Tacuarembó Formation, Parana Basin, Uruguay. *Journal of South American Earth Sciences*, 28: 168-179.
- Pérez, A. 2015. Conferencia dictada en las Jornadas Académicas del Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Montevideo.
- Pérez, A., Rocha, L., Decoud, P., Carvajal, A. 2000. Comportamiento del Acuífero Guaraní en la Ciudad de Artigas, Uruguay. X Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. ALHSUD. Fortaleza, Brasil.
- Piper, A.M. 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Ramos, J., Gamazo, P., Saracho, A. 2015. Realización de sondeos audio-magnetotélúricos en la cuenca del río Cuareim y elaboración de mapa piezométrico en las ciudades de Artigas y Quaraí. Departamento del Agua del Centro Universitario Litoral Norte, Salto, Uruguay.
- Rebollo Ferreira, LF, Martín-Loeches Garrido, M. 2007. Diez preguntas elementales sobre aguas subterráneas. Enseñanza de las ciencias de la tierra. *Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* Vol. 15 Núm. 3 Pág. 240-249
- Reginato, R. 2007. Comportamento hidrodinâmico de poços tubulares associados a aquíferos fraturados condicionados por estruturas primárias das rochas vulcânicas. XVII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos- São Paulo.
- Ribeiro, L. 2000. IS: um novo índice de susceptibilidade de aquíferos à contaminação agrícola [SI: a new index of aquifer susceptibility to agricultural pollution]. Internal report, ER-SHA/CVRM, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, 12 p.
- Ribeiro, L. 2005. Um novo índice de vulnerabilidade específico de aquíferos à contaminação: Formulação e Aplicações- Actas do 7º SILUSBA, APRH, Évora, 15p
- Salles, C. 2023. Geodiversidad y patrimonio geológico en el norte de Uruguay: análisis prospectivo. Tesis Maestría en Geociencias. PEDECIBA. Montevideo, Uruguay
- Santarosa L., Gastmans D., Sitolini T., Kirchheim R., Bentacuer S., de Oliveira M.E., Campos J.C., Manzione R., 2021. Assessment of groundwater recharge along the Guaraní aquifer system outcrop zone in São Paulo State (Brazil): an important tool towards integrated management. *Environmental Earth Sciences*, 80 (95).
- Sapriza, G., Gastmans, D., De los Santos, J., Flaquer, A., Chang, H.K., Guimaraes, M., de Paula e Silva F. 2011. Modelo numérico de fluxo do Sistema Aquífero Guaraní (SAG) em área de afloramentos – Artigas (Uy)/Quarai (Br). *Revista Águas Subterráneas* 25 (1): 29-42.
- Silverio da Silva, J. L., Bessouat, C., Camponogara, I., Frantz, L., Guimaraens, M., Gamazo, P., Failache, L., de Moraes Flores, L., de Moraes Flores, M., Dressler, V. .2006. Caracterização de áreas de recarga e descarga do Sistema Aquífero Guaraní em Santana/Rivera e Quaraí/Artigas. Estudo da vulnerabilidade na área de influencia de Quaraí-Artigas. Acuífero Guaraní: avances en el conocimiento para su gestión. Fondo de Universidades.
- SIG OSE- Sistema de Información Territorial Obras Sanitarias del Estado. 2023. Sitio web: <https://gisdev.ose.com.uy/visor>
- Stiff, H.A. 1951. Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Pattern. *Journal of Petroleum Technology*, 3, 15-17.

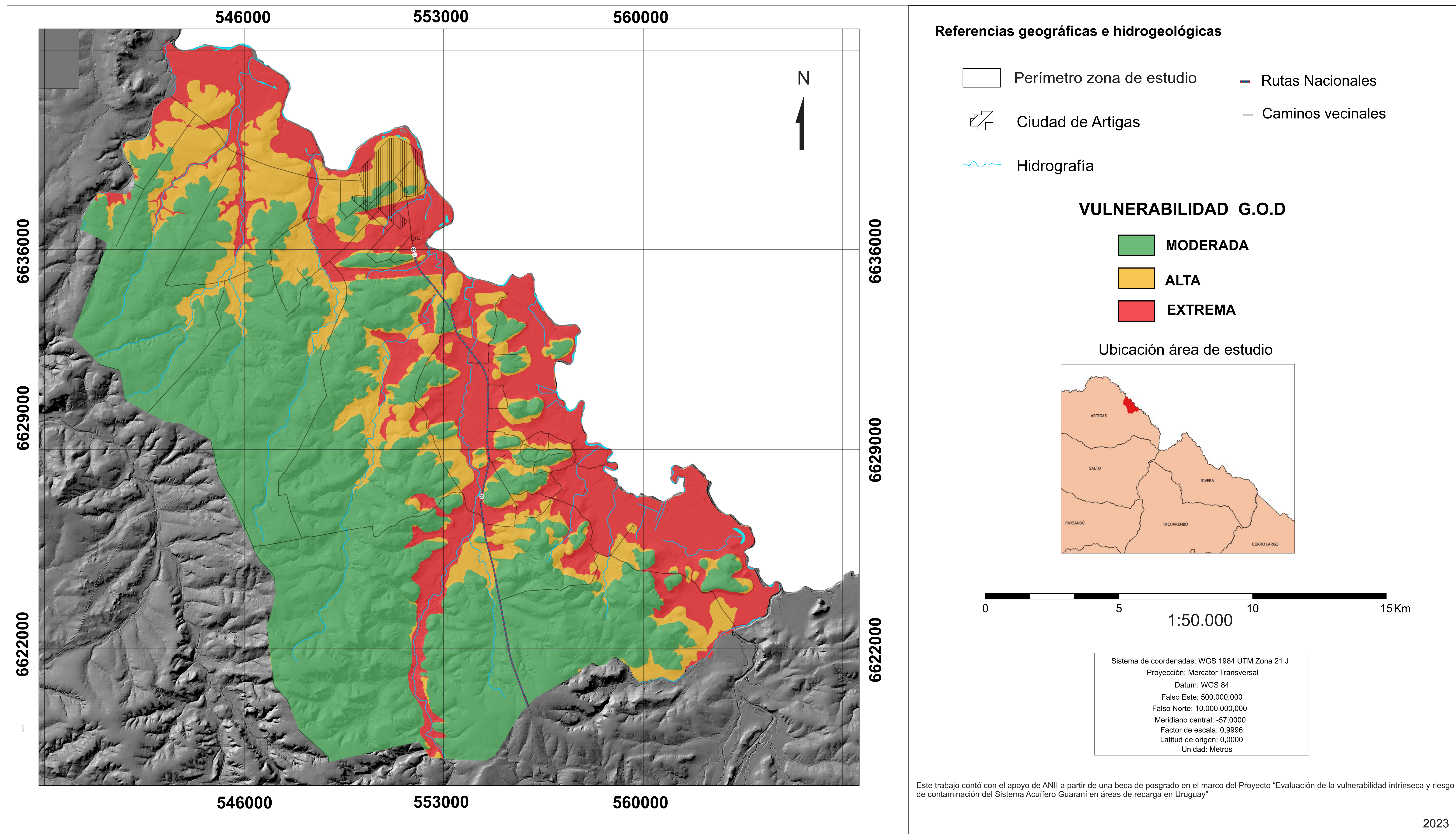
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L., Carvalho Dill, A.M.M., 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal* 14 (1–2), 79–99.
- Struckmeier, W. F., Margat, J. 1995. *Hydrogeological Maps - A Guide and a Standard Legend*. – International Association of Hydrogeologists (IAH), Int. Contrib. to Hydrogeol. 17: 177 p.; Heise (Hanover).
- Techera, J., Loureiro, J., Spoturno J. 2007. Proyecto ágatas y amatistas Fase I: Cartografía geológica y relevamiento minero en el distrito gemológico Los Catalanes. MIEM- DINAMIGE
- Techera, J., Massa, E., Izquierdo, D., Pérez, S. 2017. Mapa del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay. MIEM- DINAMIGE.
- Techera, J., Izquierdo, D., Heinzen, W. 2020. Acuífero Arapey Aspectos hidrogeológicos – modelo de flujo del acuífero volcánico Arapey. MIEM- DINAMIGE
- Veroslavsky, G., Manganelli, A. 2018. Zonificación del Sistema Acuífero Guaraní en Uruguay: una Guía Orientativa para su Gestión y Protección Ambiental. *Revista Aqua-LAC* - Vol. 10 - Nº 2 - Sept. 2018. pp. 61 – 80.
- Visualizador de Información Hídrica de DINAGUA - https://www.ambiente.gub.uy/informacion_hidrica
- Observatorio Ambiental Nacional – Ministerio de Ambiente del Uruguay. 2023. Sitio web: <https://www.ambiente.gub.uy/oan/geoportal/>

Anexo A - Abreviaturas

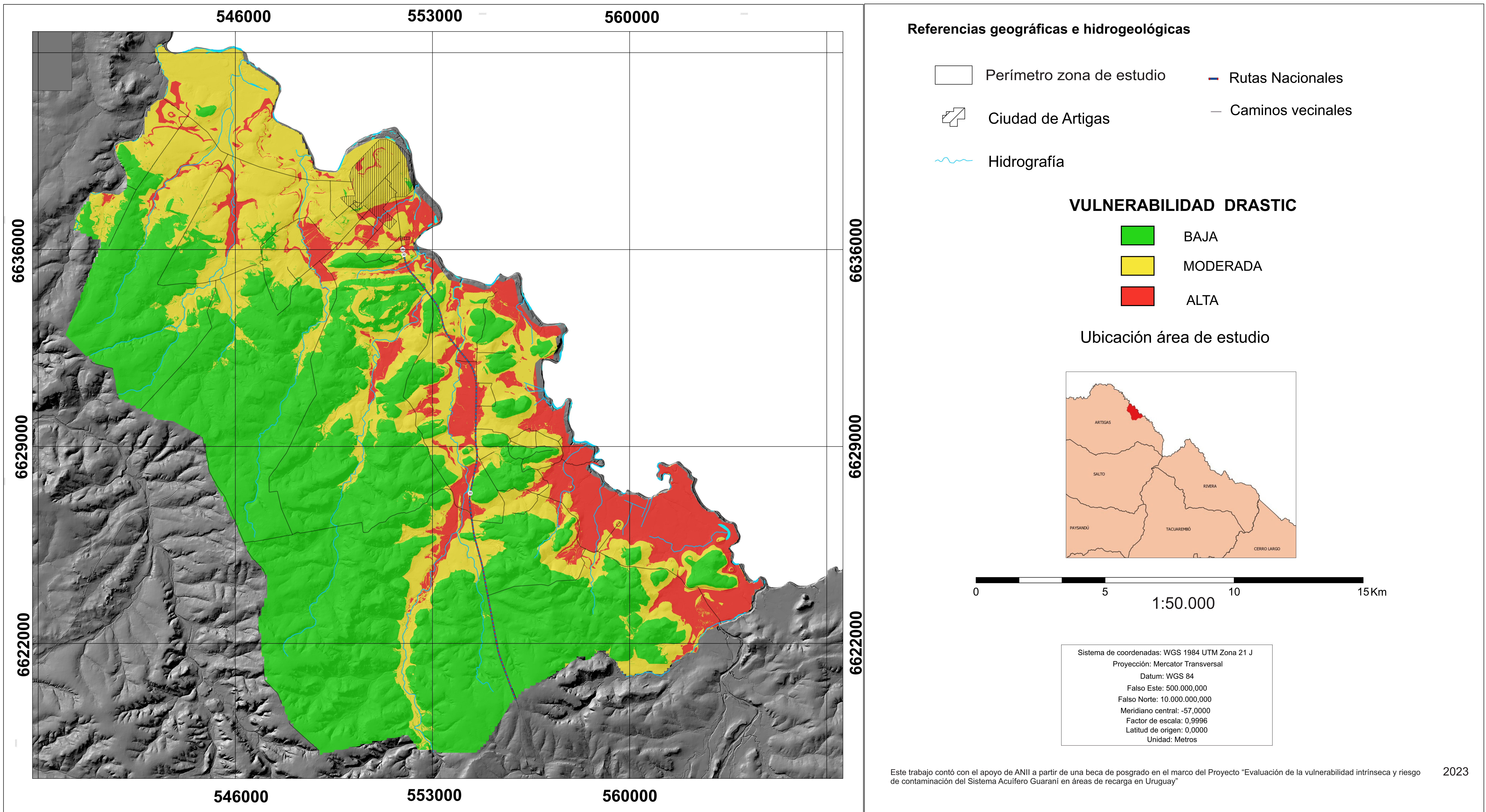
ANCAP:	Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland
CENUR:	Centro Universitario Regional Norte - Salto, Universidad de la República
CeReGAS:	Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas América Latina y el Caribe
CIU:	Cámara de Industrias del Uruguay
CPRM:	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DINAGUA:	Dirección Nacional de Aguas
DINAMA:	Dirección Nacional de Medio Ambiente
DINACEA:	Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental
DINAMIGE:	Dirección Nacional de Minería y Geología
ENGECORPS:	Engecorps Engenharia S.A., Brasil
IDE:	Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay
IGU:	Instituto Geológico del Uruguay
IMA:	Intendencia Municipal de Artigas
INE:	Instituto Nacional de Estadística
INUMET:	Instituto Uruguayo de Meteorología
MA:	Ministerio de Ambiente
MDT:	Modelo Digital del Terreno
MGAP:	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca
MIEM:	Ministerio de Industria, Energía y Minería
OMS:	Organización Mundial de la Salud
OPP:	Oficina de Planeamiento y Presupuesto
OSE:	Obras Sanitarias del Estado
PEA:	Plan Estratégico de Acción del Sistema Acuífero Guaraní
PRENADER:	Programa de Manejo de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego
PSAG:	Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní
UDELAR:	Universidad de la República

MAPA GEOLÓGICO

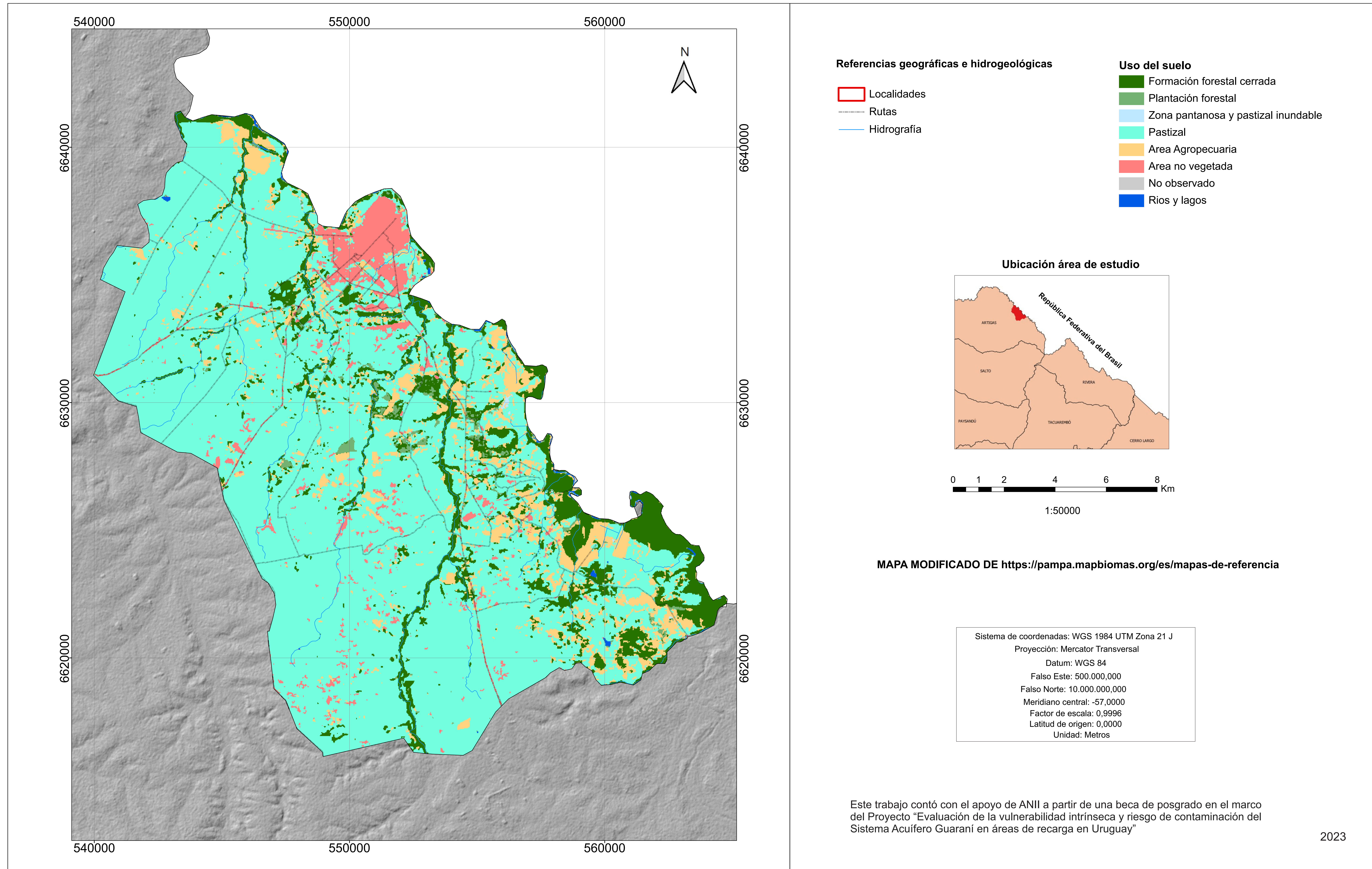




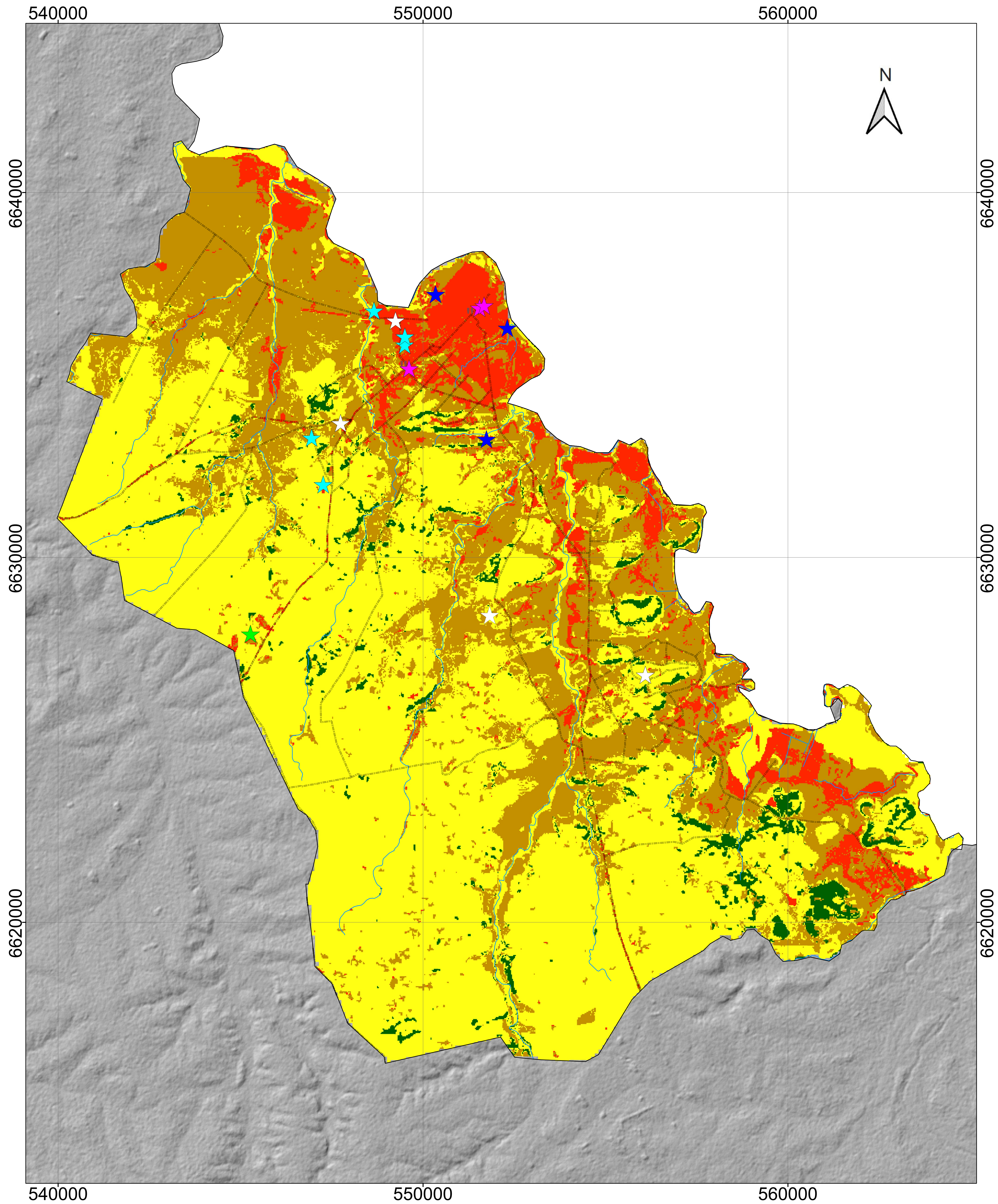
MAPA VULNERABILIDAD - MÉTODO DRASTIC



MAPA USO DEL SUELO



MAPA ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD



Referencias

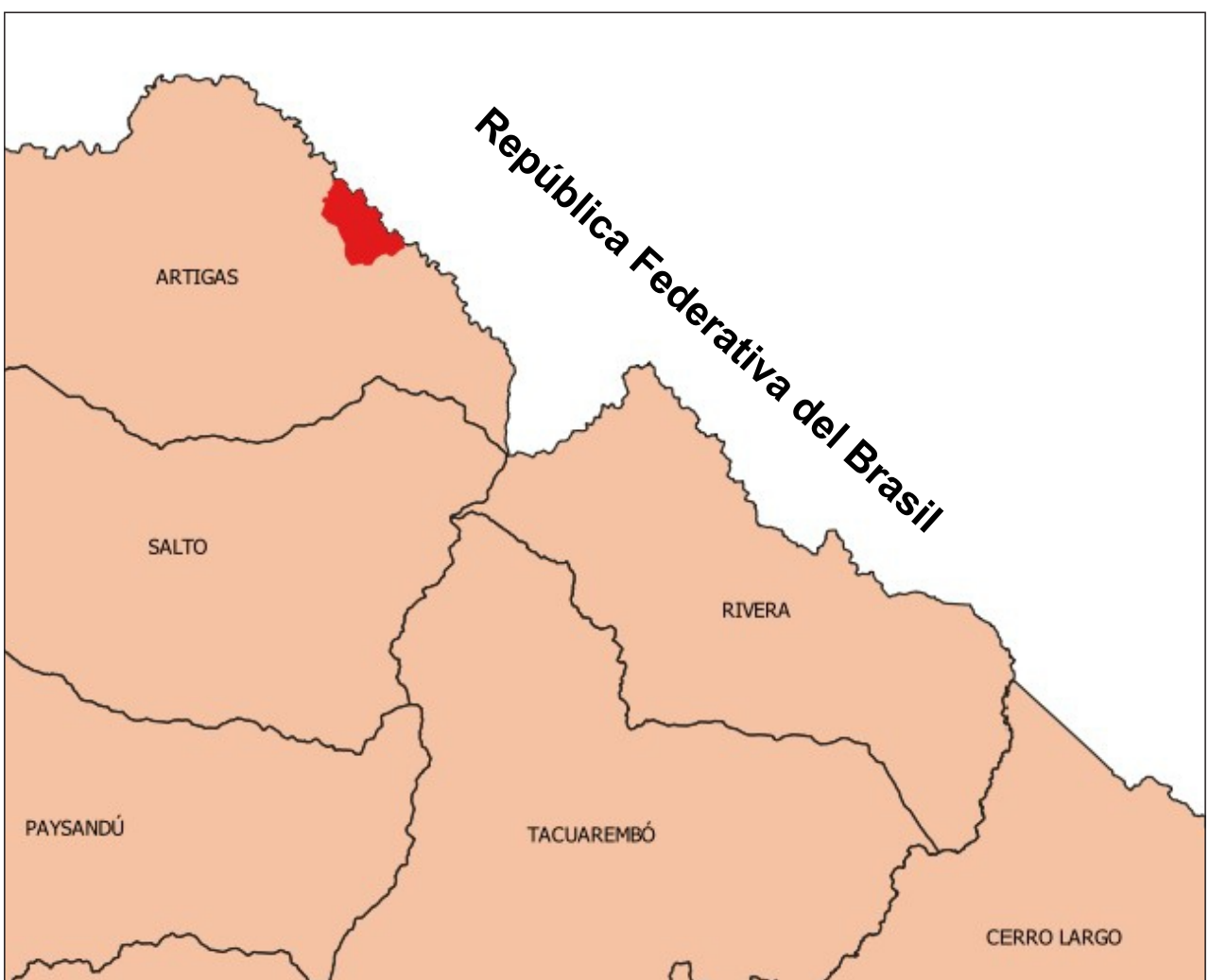
- Localidades
- Rutas
- Hidrografía

- Cementerio
- Vertedero
- Planta de tratamiento
- Estación de servicio
- Industria

Índice de susceptibilidad

- Bajo
- Moderado
- Alto
- Muy alto

Ubicación área de estudio



1:50000

Fuentes consultadas

Stigter, T. Y., Ribeiro, L., & Dill, A. M. M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology journal*, 14(1), 79-99.

Simas, L. S. B. (2014). Índices de vulnerabilidade à contaminação de massas de água subterrânea: aplicação à delimitação da Rede Ecológica Nacional no Concelho de Almada (Portugal) (Doctoral dissertation).

RIBEIRO, L. (2005). Um novo índice vulnerabilidade específico de aquíferos: formulação e aplicações. *SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (SILUSBA)*, 7, 16.

Lunardi, S., de Borja, W. F., Favaretto, J., Martins, M., & Facenda, H. B. (2021). Contamination susceptibility of Serra Geral Aquifer at municipal scale in Brazil.

SNC – Lavalin, 2008. Hidrogeología local del área piloto Rivera – Santana do Livramento. En: *Avances en el conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní, Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní*, tomo 3, 129pp. *Social Sciences & Humanities Open*, 4(1), 100144

*Las industrias consideradas en este mapa son a las que DINACEA le realiza control de vertidos según el Observatorio Ambiental

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zona 21 J
Proyección: Mercator Transversal
Datum: WGS 84
Falso Este: 500.000,000
Falso Norte: 10.000.000,000
Meridiano central: -57,0000
Factor de escala: 0,9996
Latitud de origen: 0,0000
Unidad: Metros

Este trabajo contó con el apoyo de ANII a partir de una beca de posgrado en el marco del Proyecto "Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca y riesgo de contaminación del Sistema Acuífero Guaraní en áreas de recarga en Uruguay"