

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE
NITRATOS EN EL ESTRATO DE 0-20 cm y 20-40 cm, PARA
DISTINTOS SUELOS Y CONDICIONES CLIMÁTICAS**

por

**Andrés SASTRE ALBERTI
Gabriel TERRA LOPEZ**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2014**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Esteban Hoffman

Fecha: 28 de enero de 2014

Autores: -----

Andrés Sastre Alberti

Gabriel Terra López

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, que nos han apoyado desde el principio y que con su esfuerzo nos ayudaron a que realizáramos esta carrera.

A los amigos, que nos acompañaron durante la carrera.

A Sebastián Mazzilli y Oswaldo Ernst, por su buena disposición durante la realización de este trabajo.

A FUCREA, en especial las empresas Kilafen y Tierra Greda S.A, por habernos cedido la información, sin la cual no sería posible la realización del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 <u>INTRODUCCIÓN</u>	2
2.2 <u>VARIABLES QUE AFECTAN EL APORTE DE NITRATOS Y SU DISTRIBUCIÓN EN EL PERFIL DEL SUELO</u>	4
2.2.1 <u>Suelo</u>	5
2.2.1.1 <u>Características físicas</u>	5
2.2.1.2 <u>Capacidad potencial de aporte de N y materia orgánica (MOS)</u>	7
2.2.2 <u>Manejo</u>	8
2.2.2.1 <u>Siembra directa</u>	8
2.2.2.2 <u>Tiempo de barbecho y cultivo antecesor</u>	10
2.2.2.3 <u>Sistema agrícola actual</u>	11
2.2.3 <u>Clima</u>	12
2.3 <u>MODELOS QUE HAN ESTUDIADO LA DINÁMICA DE NUTRIENTES EN PROFUNDIDAD</u>	14
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	17
3.1 <u>ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN</u>	17
3.1.1 <u>Información utilizada para conformar la base de datos</u>	17
3.2 <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICOS</u>	19
3.2.1 <u>Árbol de regresión y clasificación</u>	19
3.2.2 <u>Regresión lineal: N-NO₃⁻ 0-20 cm y N-NO₃⁻ 20-40 cm</u>	19
3.2.3 <u>Regresión lineal: prec. 40 días previos al muestreo y N-NO₃⁻ 0-20 cm</u>	20
3.2.4 <u>Otros análisis llevados a cabo</u>	20
3.3 <u>ANÁLISIS POR RANGOS DE RESPUESTA</u>	20
3.4 <u>LIMITANTES IDENTIFICADAS</u>	21
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	22
4.1 <u>DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS</u>	22
4.1.1 <u>Descripción de variables cualitativas</u>	22

4.1.1.1 Localización.....	22
4.1.1.2 Ciclo de cultivos.....	23
4.1.1.3 Suelos.....	24
4.1.1.4 Antecedentes.....	30
4.1.2 <u>Descripción de variables cuantitativas</u>	31
4.1.2.1 Precipitaciones.....	32
4.1.2.2 Fecha de muestreo.....	33
4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	34
4.2.1 <u>Árbol de regresión de N-NO₃ de 0-20 cm</u>	34
4.2.2 <u>Árbol de regresión de N-NO₃ de 20-40 cm</u>	37
4.2.3 <u>Regresión lineal: N-NO₃⁻ 0-20 cm y N-NO₃⁻ 20-40 cm</u>	39
4.2.4 <u>Regresión lineal: prec. 40 días previos al muestreo y N-NO₃⁻ 0-20 cm</u>	40
4.3 ANÁLISIS POR RANGOS DE RESPUESTA.....	41
5. <u>CONCLUSIONES</u>	44
6. <u>RESUMEN</u>	46
7. <u>SUMMARY</u>	48
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	50
9. <u>ANEXOS</u>	59

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Número de datos según cada variable utilizada en la base de datos.....	18
2. Número de muestras por ciclo de cultivo para cada año.....	23
3. “Zona tradicionalmente agrícola” Porcentaje de muestras según aptitud de uso, drenaje interno, textura, suelos dominantes, unidades de suelo y grupo CONEAT.....	27
4. “Nuevas zonas agrícola” Porcentaje de muestras según aptitud de uso, drenaje interno, textura, suelos dominantes, unidad de suelo y grupo CONEAT.....	29
5. Descripción de variables cuantitativas.....	31
6. Número de datos según rango N-NO ₃ ⁻ ppm (20-40 cm) para datos de muestreo, datos estimado por modelo de regresión lineal y % de aciertos.....	42
7. Número de datos según rango N-NO ₃ ⁻ ppm (20-40 cm) para datos de muestreo, datos estimado por modelo de regresión lineal y % de aciertos, acotando el rango medio....	42
Figura No.	
1. Número de datos según zona y años.....	22
2. Número de datos según zona agrícola y años.....	23
3. Número de datos según grupos CONEAT.....	24
4. Porcentaje de datos según antecesor.....	30
5. Frecuencia de precipitaciones acumuladas (mm) para	33

10,20,30,40 y 50 días previos al muestreo, para el total de datos.....	
6. Distribución del total de fecha de muestreo a lo largo de un año.....	34
7. Árbol de clasificación y regresión N-NO ₃ ⁻ 0-20 cm.....	36
8. Árbol de clasificación y regresión N-NO ₃ ⁻ 20-40 cm.....	38
9. Relación: N-NO ₃ ⁻ 0-20 cm y N-NO ₃ ⁻ 20-40 cm	40
10. Relación: precipitaciones 40 días previos al muestreo y N-NO ₃ ⁻ 0-20 cm	41

1. INTRODUCCIÓN

Poder estimar la cantidad de nitrógeno en forma de nitratos por debajo de la capa de los primeros 20 cm de profundidad del suelo, a partir del contenido de nitratos en los 0-20 cm, sería de gran utilidad. Esto permitiría reducir el tiempo y esfuerzo al momento de realizar muestreos para algunos modelos de fertilización nitrogenada, y además, utilizar información de muestreos anteriores en los primeros 20 cm para estudios de dinámica del nutriente. A nivel regional existen algunos intentos aislados de hacer estimaciones, pero no existe ningún intento que considere las características de suelo en conjunto con las condiciones climáticas.

El objetivo del trabajo es estimar el contenido de nitratos por debajo de los 20 cm del perfil del suelo. Como hipótesis principal se plantea que es posible desarrollar una ecuación que permita estimar la cantidad de nitratos por debajo de 20 cm, a partir de la cantidad en superficie (0-20 cm), información del tipo de suelo, condiciones climáticas previas y de manejo.

El estudio se realizó a partir de bases de datos de productores CREA del Grupo La Cuchilla, con datos obtenidos en muestreos previos a la siembra de cultivos, entre el invierno 2009 y el verano 2013 incluidos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante para la concreción de altos rendimientos en los cultivos, y que con mayor frecuencia limita la producción vegetal, debido a las grandes cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observan sus deficiencias en los suelos (García y Fabrizzi 2001, Reussi Calvo y Echeverría 2006). Por lo tanto es imprescindible y sólo a excepción de unos pocos cultivos realizar fertilizaciones nitrogenadas en cada uno de los ciclos productivos para concretar buenos rendimientos.

En nuestro país, las características climáticas, las variaciones en suelo, historia de chacra y el antecesor hacen que las variaciones en la capacidad de aporte de nitrógeno (N) entre chacras y años sean muy importantes. Esta realidad ha sido reconocida desde hace muchos años, por lo que se han desarrollado modelos con el fin de racionalizar el agregado de N (Hoffman et al., 2010).

Según Hoffman y Perdomo (2011), esta variación en la capacidad de aporte de N por los suelos se acentúa más en los últimos años, ya que como consecuencia de la expansión agrícola impulsada por la soja y como necesidad del sistema, el área cultivada con trigo y cebada también se expande hacia nuevas zonas: Centro (Durazno, Flores y Florida) y Noreste-Este (Cerro Largo, Treinta y Tres y Rocha) (Arbeleche et al., 2010). Estas nuevas zonas agrícolas, en relación a la tradicional (Litoral Oeste), además de las diferencias en cuanto a régimen térmico e hídrico combinan suelos con escasa historia agrícola, y grandes contrastes en textura, fertilidad, capacidad de almacenaje de agua y drenaje interno (Molfino y Califra 2001, Molfino y Califra 2004). Estas variables y factores de producción, no sólo determinan zonas agroecológicas distintas, sino que establecen grandes diferencias en la dinámica del nitrógeno de los suelos dentro y entre años. Dentro del área tradicionalmente agrícola (Litoral Oeste) también se dio una expansión hacia suelos de menor aptitud dentro de cada

predio, estos suelos de menor aptitud son clase II limitados por riesgo de erosión y clase III limitados por erosión y drenaje (Ernst, 2011).

Los nitratos (N-NO_3^-) son la forma de nitrógeno (N) más importante que absorben las plantas. Se han desarrollado muchos métodos de diagnóstico y recomendación para distintos cultivos, donde la principal variable predictiva es el nivel de nitratos del suelo (Bono y Álvarez, 2007). La concentración de N-NO_3^- en el suelo en determinado momento y para diferentes cultivos es el indicador más empleado para estimar la probabilidad de respuesta al agregado de N. Su mayor utilidad es que refleja el balance de los procesos de mineralización - inmovilización que está ocurriendo en el campo. Una limitante de este indicador es su variabilidad en el corto plazo debido a condiciones ambientales, y el agregado reciente de residuos, entre otros factores (Sawchik, 2001).

En Uruguay se han desarrollado modelos de ajuste de nitrógeno en los cuales se utiliza la concentración (ppm) de N-NO_3^- (0-20 cm) como el mejor indicador de disponibilidad de nitrógeno en el suelo y de respuesta para distintos cultivos. Investigadores como Perdomo y Bordoli (1999), Perdomo et al. (2001), Hoffman et al. (2010), han desarrollado a lo largo de los años una propuesta de manejo de nitrógeno para cultivos de invierno, en la cual se utiliza la disponibilidad de N-NO_3^- en los primeros 20 cm de suelo, en conjunto con otros factores a la siembra y a Z22.

Otro ejemplo de esto son los ajustes propuestos para maíz por rangos de suficiencia crítica, utilizando los niveles de N-NO_3^- en suelo de (0-20 cm) a la siembra, y además se ha encontrado que existe relación entre la concentración de N-NO_3^- en el suelo (0-20 cm) en el estadio de seis hojas (V6) (Perdomo et al. 1998, Sainz Rozas et al. 2000, Perdomo y Cardellino 2006). En esta misma línea, Borghi y Wornikov (1998) concluyeron en ensayos que el contenido de N-NO_3^- en los primeros 20 cm fue el indicador que mejor se relacionó con la variación en el rendimiento. Evaluando además la concentración de N-NO_3^- en el suelo a una profundidad de 20-40 cm, encontraron que no existió una buena relación entre este indicador y el rendimiento relativo. A su vez determinaron la

relación entre el contenido de N-NO_3^- en el total del perfil (0-40cm). Concluyendo que la alta correlación ($r^2=0,93$) entre ambos indicadores expresa que el análisis de los primeros 20 cm es un buen estimador del contenido de N-NO_3^- en los primeros 40 cm del suelo.

Perdomo y Bordoli (1999) afirman que muchas veces se plantean dudas al respecto de la profundidad de muestreo, ya que se especula que muestreos a profundidades mayores pueden aumentar la precisión de este indicador. Las evaluaciones realizadas al respecto indican, sin embargo, que el contenido de N-NO_3^- de los primeros 20 cm del suelo es un buen estimador del N-NO_3^- disponible en los primeros 40 cm del mismo. Este resultado se debe en parte a que existe en general una estrecha asociación entre las concentraciones de N-NO_3^- de la primera y la segunda capa de 20 cm del suelo y a que además, las cantidades de N-NO_3^- presentes en la primera y segunda capa del perfil son similares. Por lo tanto, este resultado implicaría que la mejora que se obtendrían con muestreos a profundidades mayores a 20 cm no sería suficiente para compensar el mayor esfuerzo físico y tiempo que esta práctica traería consigo. Además, inevitablemente este mayor esfuerzo llevaría con el tiempo a una disminución del número de tomas que se colectan de un sitio, lo que aumenta la incertidumbre acerca de la representatividad del resultado de análisis. Haciendo un balance de todos estos factores, parece claro que sería preferible sacar más muestras de la primera capa de 0-20 cm del suelo en lugar de gastar tiempo y esfuerzo en muestrear los horizontes inferiores. Además, la mayor parte de la información de niveles críticos disponibles actualmente, está referida a muestreos de suelo de los primeros 0-20 cm.

2.2. VARIABLES QUE AFECTAN EL APORTE DE NITRATOS Y SU DISTRIBUCIÓN EN EL PERFIL DEL SUELO

La capacidad de un suelo de suministrar N a los cultivos a través de la mineralización de la materia orgánica, dependerá fundamentalmente de complejas relaciones entre los siguientes factores: el tipo de suelo (nivel y calidad de MOS, textura, estructura/aireación, etc), en conjunto con prácticas de manejo (sistema de laboreo, rotación de cultivos, tiempos de barbecho) y

condiciones ambientales (temperatura y humedad). Todos estos factores que determinan el potencial de mineralización e inciden en la actividad biológica que controla el proceso de mineralización e inmovilización de N, además de su relación directa con los procesos de pérdidas ambientales de N; desnitrificación y lavado (Baethgen 1992a, Studdert y Echeverría 2006, Zebrath, citado por St. Luce 2011). Siendo estos factores los responsables de la concentración y distribución de N-NO_3^- en el perfil del suelo a la hora de decidir hacer un muestreo previo a la siembra. En los siguientes puntos se tratará de analizar cada uno de los factores considerados previamente.

2.2.1. Suelo

2.2.1.1. Características físicas

Las características físicas del suelo tal como la textura ejercen un considerable influencia en el contenido de humedad del suelo, porosidad y el hábitat presente para los microorganismos responsables de la mineralización y nitrificación, impactando en el aporte de N del suelo (Griffin, Subbarao et al., citados por St. Luce, 2011).

St. Luce (2011), revisando estudios realizados por Griffin y Sahrawat afirma que la tasa de mineralización es generalmente mayor en suelos arenosos comparado con suelos limosos o arcillosos debido a la mejor aireación y menor protección física de la materia orgánica (MO) lábil. Perdomo y Barbazán (1998) si bien coinciden en que en un suelo arenoso la MOS tiene menos mecanismos de estabilidad que en un suelo arcilloso, además afirman que el aporte de N en estos suelos arenosos por parte de la fracción orgánica experimentará con el tiempo un descenso mucho mayor que en suelos arcillosos.

En general, la cantidad neta de N mineralizado a partir de un residuo dado es mayor en suelos arenosos que en suelos arcillosos. Diferencias en la liberación de N pueden ser atribuidas a la adsorción del N orgánico por las arcillas, incrementos en la aireación en suelos arenosos, diferencias en las

relaciones C:N de los microorganismos y la microfauna, y diferencias en las poblaciones de protozoos y nematodos presentes (Van Veen et al., Thomsen et al., Kuikman et al., Griffiths et al., citados por Cabrera, 2007).

En Uruguay trabajos realizados en suelos del litoral oeste bajo laboreo convencional y en rotación con pasturas sugieren que los aportes de N a través de la mineralización de la MOS durante el ciclo de crecimiento de un cultivo de invierno podrían variar entre 30 y 70 kg de N ha⁻¹ para suelos de textura livianas, y entre 50 y 110 kg de N ha⁻¹ para suelos de texturas medias a pesadas (Baethgen, 1992b). García Lamothe (2004), afirma que el N aportado por el suelo es muy variable aún para un mismo tipo de suelo y con similar contenido de materia orgánica. Depende del manejo anterior que incluye al cultivo previo, el tipo de laboreo, el manejo de residuos, entre otras prácticas agronómicas, pero también está controlado por las condiciones ambientales del año.

Por otra parte, Perdomo y Barbazán (1998) sostienen que a igualdad de condiciones, el tipo de suelo afecta la magnitud de las pérdidas de N-NO₃⁻ por lixiviación, siendo ésta mayor en suelos livianos, y además la presencia de un horizonte Bt saturado reduce la velocidad de pasaje de agua a través del perfil a casi cero, reduciéndose la posibilidad de lavado. Rimski-Korsakov et al. (2002), concuerdan que en suelos con contenidos importantes de arenas finas o limos y sin horizontes que limiten el movimiento del agua del suelo, se generarían condiciones favorables para la migración de nitratos en profundidad.

Según Hoffman y Perdomo (2011) las nuevas áreas agrícolas, como las que se desarrollan en la zona Centro (Durazno, Flores y Florida) y Noreste - Este (Cerro Largo, Treinta y Tres y Rocha), por el drenaje interno pobre, dado por el tipo de suelo, el menor drenaje superficial asociado a topografías planas (Molfino y Califra 2001, Molfino y Califra 2004) y por el régimen de precipitaciones en invierno además de las probables mayores restricciones al potencial asociado al estrés hídrico, la dinámica del N en suelo en estos nuevos ambientes sería más extrema, con mayor presión de los factores de pérdida.

2.2.1.2. Capacidad potencial de aporte de N y materia orgánica (MOS)

Los suelos presentan distinta capacidad potencial de proveer N a los cultivos a partir de la mineralización de su MO y esta puede ser caracterizada por el N potencialmente mineralizable (No) (Echeverría et al., 1994). El No de un suelo expresa la mineralización neta potencial (Walley et al., citados por Studdert y Echeverría, 2006) y refleja el efecto de las prácticas de manejo sobre su capacidad relativa para suministrar N y puede ser utilizado para predecir el N que será mineralizado para los cultivos a través de modelos sencillos (Echeverría et al., 1994).

Teniendo en cuenta que el No constituye una fracción definida y medible que representa la fracción del nitrógeno orgánico susceptible de ser mineralizado se han desarrollado métodos de laboratorio biológicos y rápidos, denominados PMN o Nan (mediante incubación aneróbica durante 7 días) que permiten hacer una estimación del potencial de mineralización de N del suelo. (Echeverría et al. 2000, García Lamothe 2011).

El contenido de MOS, y en particular, sus fracciones más lábiles, tienen una importante participación en la dinámica de N del suelo (Fabrizzi et al., Gregorich et al., citados por Cozzoli, 2010), y está estrechamente relacionado con la capacidad potencial que este tendrá de aportar N (No) a los cultivos. Echeverría et al. (1994) reportaron que las diferencias en el contenido de MOS se traducen en diferencias en No, y Studdert et al. (2000) demostraron para distintas secuencias de cultivos que el No estaba relacionado con el contenido de carbono orgánico y por lo tanto con la MOS. Zielke y Christenson, citados por Studdert et al. (2000) encontraron una relación lineal entre el contenido de carbono orgánico de suelos bajo diferentes rotaciones y su potencial de mineralización.

Morón y Sawchik (1998), consideran que un valor de potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) en el suelo menor a 30 ppm indica un bajo poder de suministro de N, y mayor que 60 ppm, indica un alto suministro potencial, pero tiene la limitante de expresar un potencial que puede o no darse

según las condiciones del año. La importancia de la humedad y la temperatura en los procesos de mineralización pueden, no obstante, hacer que un suelo de alto PMN aporte igual cantidad de N que otro de menor PMN si las condiciones ambientales favorecen a este último más que al primero. Studdert et al. (2000), además demostraron la importancia de las características de los residuos de los cultivos antecesores al trigo, el cual causó que el potencial de mineralización resultante de distintas rotaciones no se reflejara en el N aportado al cultivo.

Por su parte, Hoffman y Perdomo (2011), en la red de ensayos de respuesta a la fertilización nitrogenada en cebada, llevados a cabo en el año 2009, encontraron que no existió una relación clara entre el PMN, ni con la respuesta al agregado de N, ni con el N necesario para alcanzar el máximo potencial, o el rendimiento de los testigos sin N. García Lamothe (2004), además afirma que no existe una estrecha correlación entre el contenido de N-NO_3^- en un momento dado en el suelo y el PMN.

2.2.2. Manejo

2.2.2.1. Siembra directa

La introducción de la siembra directa (SD), genera cambios en el ambiente edáfico que afectan las transformaciones de N en el suelo. La presencia de residuos en superficie y la falta de remoción alteran algunas propiedades físicas que influyen directa e indirectamente en la dinámica del N (García y Fabrizzi, 2001).

Bajo SD la cobertura del suelo con residuos aumenta la infiltración de agua de lluvia y cumple además la función de barrera aislante que reduce la tasa de evaporación y las variaciones de temperatura, originándose un ambiente más húmedo, más frío, menos aireado y más denso que bajo laboreo convencional (LC) (Ferreras et al. 1999, Bordoli 2001, García y Fabrizzi 2001, Morón y Quincke 2010). Los cambios en cantidad y distribución MOS y propiedades físicas y químicas del suelo resultan en efectos directos e indirectos sobre la dinámica de las poblaciones microbianas. En definitiva, los

efectos sobre los microorganismos del suelo se reflejan en la dinámica del N que es gobernada por la actividad microbiana del suelo (García y Fabrizzi, 2001).

En sistemas de SD la mineralización de la MO del suelo se ve reducida, y la no incorporación de los residuos enlentece la mineralización de los mismos. La magnitud del enlentecimiento en la mineralización de residuos dependerá de la cantidad, calidad (relación C/N, contenido de lignina, etc.), su forma física (tamaño, densidad y diámetro), y de las condiciones climáticas (Bordoli, 2001). En consecuencia la SD resulta en un incremento de la materia orgánica en la zona superficial. Sin embargo la magnitud de este cambio es dependiente del manejo anterior del suelo, secuencia de cultivos utilizada y de la cantidad y tipo de fertilizante aplicado que interaccionan fuertemente (Sawchik, 2001).

A su vez, la desnitrificación, que es la reducción biológica de NO_3^- a formas gaseosas, principalmente óxido nitroso (N_2O) y N_2 , que se pierden a la atmósfera. Es un proceso que ocurre en anaerobiosis, por lo tanto la mayor humedad y menor aereación en SD beneficia el desarrollo de desnitrificadores (Linn y Doran, citados por Bordoli 2001, García y Fabrizzi 2001).

Morón (2001) concuerda que la menor descomposición de los residuos en SD influye sobre el nivel de N total del suelo, su disponibilidad y la de otros nutrientes. En los primeros años de instrumentación de un sistema de SD, las condiciones de menor mineralización neta y mayor desnitrificación resultan en una menor disponibilidad de N para los cultivos.

Esto queda en evidencia en menores acumulaciones de N mineral (NO_3^- y NH_4^+) a la siembra y/o una menor oferta de N durante el ciclo del cultivo (Morón, 2001). Además, la mayor infiltración de lluvias, el mayor almacenaje de agua en el perfil, junto a la menor evaporación resultan en un aumento en el potencial de lixiviación de NO_3^- (Bordoli, 2001).

Por otro lado, la SD conduce al largo plazo a una mayor cantidad y continuidad de macroporos (poros realizados por mesofauna y canales dejados

por raíces) lo que unido a la mayor infiltración aumenta el riesgo de pérdidas por lixiviación a través de flujo preferencial de fertilizantes aplicados sobre la superficie del suelo (Shapley y Smith, citados por Bordoli, 2001). García y Fabrizzi (2001) concuerdan que el agua infiltra principalmente por flujo preferencial a través de los macroporos especialmente cuando el suelo está seco y la intensidad de la lluvia es alta (Edwards, 1992). Si el NO_3^- está concentrado en las capas superficiales y aún no ha difundido a la matriz del suelo, el flujo preferencial aumentará las pérdidas por lavado (Tillman y Scotter, 1991). Si la mayor parte del NO_3^- está distribuido en la solución de la matriz del suelo, el flujo preferencial disminuirá las pérdidas por lavado (Kanwar et al., 1985)

2.2.2.2. Tiempo de barbecho y cultivo antecesor

La información generada para siembra sin laboreo indica, que para cada condición climática y de suelo, el tiempo de barbecho es la variable determinante de la disponibilidad de N-NO_3^- al momento de la siembra. La muerte del cultivo o maleza que está creciendo permite que se inicie la descomposición de los residuos orgánicos subterráneos y cesa la absorción de N-NO_3^- y agua Ernst (2000). En términos generales, con residuos de baja calidad (alta relación C/N) los tiempos de barbecho necesarios para lograr una disponibilidad de N mineral aceptable deberían ser más largos que con residuos de baja relación C/N. Por otra parte, si tenemos un cultivo de invierno como cabeza de rotación, los períodos de barbecho deberían ser más largos porque las bajas temperaturas y el bajo contenido de N mineral en el suelo van a ser limitantes para la descomposición (Sawchik, 2001).

La calidad del residuo del cultivo, relacionada con el contenido de lignina y la relación C/N, determinan que los microorganismos inmovilicen o liberen N mineral dentro de la solución del suelo, así como concentraciones bajas de N en la solución del suelo limitan el crecimiento microbiológico (Henriksen y Breland, citados por St. Luce et al., 2011). El aporte de N del suelo es reducido durante las etapas tempranas de la descomposición de los residuos con alta relación C/N por una gran demanda de N por la biomasa microbiana en

respuesta al mayor C disponible. De ahí que, la inmovilización ocurre cuando los microorganismos asimilan el N recientemente mineralizado y N inorgánico de la solución del suelo (St. Luce et al., 2011). Esta rápida inmovilización del N mineral ocurre durante el inicio de la descomposición del rastrojo de maíz. Mientras, esa descomposición procede, la relación C/N del residuo se vuelve más baja y la actividad y población de los microorganismos es reducida al igual que la disponibilidad de C, resultado en la liberación de N mineral desde los residuos en descomposición y microorganismos muertos (Green et al., citados por St. Luce et al., 2011).

Por otra parte, el crecimiento vegetal previo a la siembra (enmalezamiento del barbecho) consume el nitrógeno que aporta el suelo por lo que “el período de barbecho” es determinante del aporte inicial para el cultivo (Ernst, 1999). En contraparte, la presencia de un cultivo creciendo activamente es un factor que reduce las pérdidas por desnitrificación debido, por un lado, a que el cultivo absorbe N-NO_3^- , disminuyendo así la concentración del soluto, y debido también a que absorbe agua, lo que provoca que menos agua pase a través del suelo (Perdomo y Barbazán, 1998).

A su vez el tiempo de muerte de una cobertura vegetal es una de las variables determinantes de la calidad del rastrojo que deja el verdeo invernal y de su calidad. Cuanto más temprano se realiza la aplicación de herbicida mayor la calidad del rastrojo, lo que permite una rápida acumulación de N-NO_3^- en el suelo a la siembra del cultivo siguiente. Cuando el tiempo de barbecho se acorta, la disponibilidad del nutriente a la siembra es baja, lo que debe ser corregido por fertilización nitrogenada. Por el contrario, si el período de barbecho es excesivo podrían favorecerse pérdidas del nutriente por lavado. En estos casos, los rastrojos con mayor relación C/N resultan una mejor opción, ya que aportan el N más tardíamente (Ernst, 2004).

2.2.2.3. Sistema agrícola actual

El sistema agrícola actual se caracteriza por ser un sistema de agricultura continua sin pasturas (Siri y Ernst, 2009), en donde el 90% se realiza

sin laboreo (URUGUAY.MGAP.DIEA, 2010), con una intensidad de cultivos por hectárea y por año de 1,52 para el período 2002-2012, una elevada frecuencia de soja y además dos tercios del área en agricultura tiene cinco años o más en agricultura continua (Hoffman et al.,2013).

En base a lo expuesto anteriormente, Siri y Ernst (2009) han demostrado en experimentos de largo plazo de agricultura continua sin laboreo, que bajo este sistema se estaría incurriendo año tras año en una suma de balances negativos de N. Hoffman et al. (2013) afirma que bajo estas condiciones, inexorablemente se estaría frente a una caída en la capacidad de aporte de N de los suelos, lo que ha sido demostrado en trabajos nacionales, Morón y Quincke (2010) cuantificaron una disminución del 45% del potencial de mineralización (PMN), para chacras del litoral oeste uruguayo. Hoffman y Perdomo (2011), señalan caídas del PMN de casi un 70%, para la misma región.

Trabajos llevados a cabo en la región también son consistentes, que bajo este sistema de agricultura continua sin pasturas y con alta frecuencia de soja, se estaría incurriendo en una disminución en la capacidad de aporte de los suelos (Salvagliotti 2008, Sainz Rozas et al. 2011).

2.2.2. Clima

El clima impacta en la dinámica del N al menos tanto como en la performance de los cultivos; y posiblemente más aún, ya que influye en los procesos de ganancia y pérdida de N del suelo (Bruulsema, 2006). El efecto de los factores climáticos tiene un peso importante tanto en la dinámica del nitrógeno en los suelos como en la respuesta de los cultivos a la fertilización nitrogenada. Tanto es así que se han desarrollado modelos que toman en cuenta este factor. Un ejemplo de esto es el modelo HERMES utilizado en Alemania para predecir dosis de N a aplicar en trigo. El enfoque de este fue basado en el trigo recibiendo una pequeña dosis basal a la siembra, seguida por hasta tres aplicaciones durante el ciclo de crecimiento. El modelo utiliza datos actuales climáticos hasta la fecha de aplicación, seguido de tres

escenarios proyectados para el fin del ciclo del cultivo. Los tres escenarios fueron seleccionados en base a datos climáticos durante 30 años, para resumir en condiciones húmedas, moderadas y secas. En base a la estimación del N disponible en el suelo y el potencial del cultivo, el modelo pronostica la cantidad de N requerida para asegurar que no existan deficiencias hasta la nueva aplicación. El uso del modelo resultó en menores cantidades de fertilizante aplicadas cuando el rendimiento del trigo fue limitado por el clima (Kersebaum et al., 2006).

Por su parte, Dinnes et al., citados por van Es et al. (2006) concluyen que la dinámica del N en regiones húmedas es afectada por una multitud de factores incluyendo tipo de laboreo, drenaje, cultivo, contenido de materia orgánica y factores climáticos. Otros autores afirman que los efectos del clima pueden ser más importantes que otros atributos (Lamb et al., Eghball y Varvel, Sogbedji et al., citados por van Es et al., 2006), por su influencia en las tasas de mineralización y pérdidas por lavado y denitrificación. En la mayoría de los suelos, el contenido de agua y la temperatura son los factores ambientales más importantes que controlan la mineralización neta de N a partir de la MO (Cabrera, 2007).

En términos promedios la disponibilidad de nitrógeno en forma de N-NO_3^- en el suelo para nuestras condiciones puede representarse de la siguiente forma: baja disponibilidad invernal e incremento hacia la primavera-verano con un descenso desde otoño hacia el invierno. La forma de la curva varía con los años en función de las condiciones climáticas y los valores absolutos con éstas y el aporte potencial del suelo. En condiciones como las de Uruguay, durante la primavera tardía la temperatura aumenta y con ella la actividad de los microorganismos del suelo. Por lo tanto es una época del año en que el contenido de N-NO_3^- tiende a aumentar. Al mismo tiempo ésta es una época del año en la que la evapotranspiración también aumenta, por lo que la existencia de suelos saturados con agua es poco frecuente (Ernst, 1999).

Cabrera (2007) resumiendo distintos estudios realizados para cuantificar los efectos de la temperatura y el contenido de agua en la

mineralización neta de N a partir de la MO. Concluye que la temperatura y el contenido hídrico del suelo presentan una fuerte interacción sobre la tasa de mineralización neta de N (Quemada y Cabrera 1997, Zak et al. 1999). A causa de esta interacción, la cantidad a partir de la cual se incrementa la mineralización neta con incrementos de la temperatura, depende del contenido hídrico del suelo. Generalmente, el incremento observado en la mineralización neta con una temperatura dada, es superior con contenidos elevados con respecto a bajos niveles de agua de suelo.

2.3. MODELOS QUE HAN ESTUDIADO LA DINÁMICA DE NUTRIENTES EN PROFUNDIDAD

En la bibliografía estudiada existen algunos antecedentes nacionales y regionales que han estudiado la relación entre el contenido N-NO_3^- en las distintas capas, intentado además, en algunos casos estimar la concentración N-NO_3^- en profundidad a partir de la concentración superficial.

Los antecedentes nacionales relevados, producto de ensayos de respuesta a la fertilización nitrogenada en distintos cultivos fueron: Borghi y Wornikov (1998) en maíz con muestreos a V6, Perdomo et al. (1999) en la red nacional de cebada a la siembra y durante los años 1996 y 1997, Perdomo y Bordoli (1999) en trigo a Z22 en 1997 y 1998. Todos estos investigadores han reportado una alta relación entre el contenido de N-NO_3^- entre los 0-20 y 20-40 cm del suelo, encontrando coeficientes de determinación (r^2) que lograron explicar entre el 89 al 93% de la variabilidad del contenido de N-NO_3^- en los 0-40 cm a partir del contenido en los 0-20 cm. Además, concluyendo los mismos que con el muestreo de la primera capa de 20 cm de suelo, ya sería suficiente para estimar el contenido de N-NO_3^- en los 0-40 cm.

Por su parte, Álvarez et al. (2001) en la zona norte de la Pcia. de Buenos Aires y sur de Santa Fé, en suelos franco-arcillo-limosos, encontraron para todas las situaciones estudiadas que el contenido de nitrato presenta un claro patrón en profundidad. El N-NO_3^- disminuye desde los primeros 20 cm a la segunda capa de 20 cm 45%, en términos medios y un 44% entre la segunda a

tercera capa de 40 a 60 cm. Estos autores encontraron una alta relación lineal entre el nitrato presente en diferentes profundidades del suelo, cuando los cultivos antecesores fueron maíz, girasol y sorgo para la regresión de todas las capas. En el caso de la soja, los coeficientes de determinación eran pobres. La predicción del contenido de nitratos en la capa de los 40-60 cm utilizando los datos de N-NO_3^- de los estratos superiores fueron menores ($r^2=0,06$ a $0,57$) que el obtenido utilizando el nitrógeno disponible de la capa 20-40 cm ($r^2=0,34$ a $0,90$). Para los diferentes cultivos antecesores y texturas de suelos, obtuvieron una relación lineal estrecha cuando el contenido de N-NO_3^- de 0-20 cm fue correlacionado con el contenido N-NO_3^- de 0-60 cm. Los mismos obtuvieron dos modelos lineales simples que permiten estimar con gran precisión el contenido de N-NO_3^- o el nivel de N-mineral total en la capa de 0-60 cm a diferentes momentos del ciclo del trigo mediante el contenido de N-NO_3^- en la capa superior.

Bono y Álvarez (2007) en ensayos de fertilización en la región semiárida y subhúmeda Pampeana, realizados desde al año 1996 hasta el 2005 en cultivos de trigo y girasol, con distintos antecesores, longitud de barbecho, sistemas de laboreo (SD y LC), y diferentes momentos de muestreo (a la siembra y diferido), obtuvieron modelos lineales que lograron explicar entre el 66-79% de la variabilidad en los niveles de nitratos 0-60 cm usando como variable predictiva el nivel en la capa 0-20 cm e integrando toda la información en un único modelo de estimación lograron explicar el 73% de la variabilidad para todas las condiciones muestreadas.

Estos mismos autores concluyeron que el contenido N-NO_3^- es en promedio 2.35 veces mayor de 0-60 cm que el del estrato 0-20 cm. Y además comparando las pendientes de esos ajustes entre antecesores, sistemas de labranza y momentos de muestreo no se detectaron diferencias entre las pendientes de las poblaciones trigo vs girasol, laboreados vs siembra directa o muestreo a la siembra vs muestreo diferido. Por otro lado, no hubo diferencias en la pendiente entre suelos franco y franco arenosos.

En el Sudeste Bonaerense, donde es altamente probable que ocurran excesos hídricos al comienzo de la estación de crecimiento de cultivos de invierno, Reussi Calvo y Echeverría (2006), Barbieri et al. (2009) determinaron en tratamientos sin la aplicación de N una estrecha asociación entre el contenido de N-NO_3^- hasta los 60 y 40 cm de profundidad, para los muestreos al momento de la siembra y al macollaje de trigo. Las pendientes ajustadas difieren entre momentos de muestreo ($p < 0,05$), por lo tanto, no es posible usar un sólo modelo para estimar el contenido de N-NO_3^- hasta los 60 cm en función del contenido de N-NO_3^- hasta los 40 cm de profundidad. El contenido de N-NO_3^- hasta los 40 cm representa el 76 y 62% del contenido de N-NO_3^- hasta los 60 cm para la siembra y macollaje, respectivamente.

Para el muestreo realizado a la siembra, el contenido de N-NO_3^- decrece en promedio 45% desde los 0-20 a los 20-40 cm y 46% desde los 20-40 a los 40-60 cm de suelo. Estos valores son similares (45 y 44%, respectivamente) a los reportados por Álvarez et al. (2001). Para el muestreo al momento del macollaje, el contenido de N-NO_3^- decrece en promedio 27% desde los 0-20 cm a los 20-40 cm y 12% desde los 20-40 cm a los 40-60 cm de suelo, estos valores son muy inferiores a los reportados por Bono y Álvarez (2007) para suelos de la región semiárida y subhúmeda Pampeana.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ESTRATEGIA DE INVESTIGACIÓN

El trabajo se realizó a partir de registros de concentración de N-NO_3^- (ppm) previo a la siembra en el estrato de 0-20 cm con el estrato 20-40 cm, registros de precipitaciones e información de manejo de cultivos desde el invierno 2009 al verano 2013, todo lo cual fue aportado por las empresas Kilafen y Tierra Greda SA (Grupo CREA La Cuchilla).

3.1.1. Información utilizada para conformar la base de datos

Para construir la base de datos se tomaron en cuenta sólo los datos que se consideran relacionados con la concentración de N-NO_3^- en profundidad. Por lo tanto, cada observación tiene la correspondiente información: empresa, nombre del predio, identificación de la unidad de manejo de la cual proceden las muestras de suelo y zona en donde se encuentra localizado.

Para completar los datos del factor suelo se dispuso de la información de la unidad de suelo (carta 1:1.000.000), a partir de esta y en base al URUGUAY. MGAP. DSA (2001) y descripción de grupos de suelos CONEAT (URUGUAY. MAP. DS, 1988a) se le asigna un grupo CONEAT a cada unidad, verificándose que el grupo CONEAT asignado corresponda con la zona de donde proviene la muestra, y dentro de los grupos disponibles se opta por el de mayor aptitud de uso. A partir del dato de grupo CONEAT, la Carta de aptitud general de uso de la tierra y evaluación del drenaje natural de las tierras del Uruguay (Molfino y Califra, 2004), se caracterizó cada sitio en cuanto a clase textural, tipo de drenaje interno y aptitud de uso.

En cuanto al manejo se cuenta con el cultivo para el cual se realizó el muestreo, el cultivo antecesor inmediato, fecha de inicio de barbecho. El tiempo de barbecho surge de la diferencia en días entre el inicio de barbecho y la fecha de muestreo para la siembra del cultivo correspondiente. Además se tiene información de los años bajo agricultura para cada unidad de manejo. Cabe destacar, que todas las observaciones provienen de situaciones bajo siembra directa.

Para caracterizar el régimen de precipitaciones se dispuso de registros de precipitaciones correspondientes de zonas aledañas al lugar de muestreo, y en el menor de los casos, del propio predio del cual proviene la muestra. A partir de esta información se construyó el registro acumulado de precipitaciones (mm) para 50, 40, 30, 20 y 10 días previos a la fecha de muestreo de suelo.

En cuanto a datos del análisis se cuenta con la fecha del muestreo, la que se convirtió en su equivalente para día juliano, el contenido de N como Nitratos (N-NO_3^-) (ppm) disponible en 0-20 cm previo a la siembra, N como Nitratos (N-NO_3^-) (ppm) disponible en 20-40 cm previo a la siembra, materia orgánica M.O (%) (0-20 cm) previo a la siembra. En el cuadro No.1 se muestran las variables relevadas y la cantidad de datos disponibles para cada variable.

Cuadro No. 1. No. de datos según cada variable utilizada en la base de datos.

Variable	No. de datos
N-NO₃⁻ (ppm) 0-20 cm	725
N-NO₃⁻ (ppm) 20-40 cm	725
Prec. Previas 10 días	725
Prec. Previas 20 días	725
Prec. Previas 30 días	725
Prec. Previas 40 días	725
Prec. Previas 50 días	725
Fecha de muestreo	725
Juliano día de muestreo	725
Cultivo	718
Unidad de suelo	671
Grupo CONEAT	671
Clase textural	671
Tipo de drenaje natural	671
Aptitud de uso	671
Antecesor inmediato	639
M.O (%)	580
Fecha de inicio de barbecho	523
Años de agricultura	506
Tiempo de barbecho	498

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

3.2.1. Árbol de clasificación y regresión

Con el fin de conocer qué factores y variables pudieron estar asociados con los niveles de N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm y 20-40 cm del suelo, se procedió a la realización de dos “árboles de clasificación y regresión”, estos consideraron 498 observaciones completas con todas las variables que constituyen la base de datos. El método resulta de un conjunto de reglas determinadas por un procedimiento de ajuste por particiones binarias recursivas, donde un conjunto de datos es sucesivamente particionado. Al principio todos los objetos son considerados como pertenecientes al mismo grupo. Este grupo se separa en dos sub-grupos a partir de una de las variables regresoras de tal manera que la heterogeneidad a nivel de la variable dependiente sea mínima de acuerdo a la medida de heterogeneidad seleccionada, los dos subgrupos se separan nuevamente si: hay suficiente heterogeneidad para producir una partición de observaciones y/o el tamaño del nodo es superior al mínimo establecido para continuar el algoritmo. El proceso se detiene cuando no se cumple una de estas condiciones. En cada separación el algoritmo analiza todas las variables regresoras y selecciona la que permite formar grupos más homogéneos pero más heterogéneos entre ellos.

En este análisis se seleccionó la variable dependiente; N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm para el primer árbol y N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm para el segundo árbol, y al resto como variables regresoras disponibles. Estos análisis fueron realizados mediante la rutina JMP, de 8 pasos del programa estadístico SAS.

3.2.2. Regresión lineal: N-NO_3^- 0-20 cm y N-NO_3^- 20-40 cm

El análisis de regresión lineal permite estudiar la relación funcional entre una variable de respuesta Y (variable dependiente), en este caso N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm y una variable independiente X (variable regresora) N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm, para los 725 datos de muestreo. Para el estudio de la significancia de la regresión se utilizó un análisis de varianza de la regresión. Este análisis fue realizado mediante el software estadístico Infostat 2012/p.

3.2.3. Regresión lineal: precipitaciones 40 días previos al muestreo y N-NO₃⁻ 0-20 cm

Se realizó una segunda regresión lineal para estudiar la relación funcional entre la variable de respuesta Y, N-NO₃⁻ (ppm) 0-20 cm y la variable independiente X; N-NO₃⁻ precipitaciones acumuladas los 40 días previos al muestreo, para 725 datos de muestreo. Al igual que en la regresión lineal anterior, se realizó el estudio de la significancia de la regresión mediante un análisis de varianza de la regresión y el análisis fue realizado mediante el software estadístico Infostat 2012/p.

3.2.4. Otros análisis llevados a cabo

Al momento del análisis estadístico de la base de datos se intentaron diferentes métodos, los que serán enumerados a continuación: regresión lineal múltiple (considerando todas las variables incluidas en la base de datos), regresión lineal múltiple con la variable dummy precipitaciones los 40 días previos al muestreo, y árbol de clasificación y regresión para la variable de respuesta; relación en % (N-NO₃⁻ 20-40 cm / N-NO₃⁻ 0-20 cm). Estos análisis no fueron incluidos en el trabajo ya que no lograron mejorar el coeficiente de determinación, y por lo tanto no se lograron una mejor explicación de la variación en el contenido de N-NO₃⁻ (ppm) 20-40 cm, para el caso de las regresiones lineales múltiples. Mientras que, el árbol de clasificación y regresión clasificó las mismas variables que el método incluido en el trabajo.

3.3. ANÁLISIS POR RANGOS DE RESPUESTA

Mediante el modelo de la regresión lineal, y utilizando rangos de concentración de N-NO₃⁻ 20-40 cm preestablecidos, se determinó el porcentaje de aciertos de este para dichos rangos. Para calcular el porcentaje de aciertos se contrastaron casos estimados por el modelo de la regresión lineal versus observaciones de muestreo para cada rango utilizado. Para conformar los rangos de respuesta se tomó como referencia los rangos utilizados por

Hoffman et al. (2010) en la propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno para Uruguay, en el ajuste de (N) a la siembra y para ambientes calificados como de baja respuesta, determinando de esta forma los niveles de suficiencia (≥ 16 ppm N-NO₃⁻), no suficiencia (6-16 ppm N-NO₃⁻) y respuesta (≤ 6 ppm N-NO₃⁻). Además de estos rangos considerados se utilizaron otros en donde se disminuye el nivel de suficiencia (≥ 12 ppm N-NO₃⁻), quedando los demás rangos incambiados.

3.4. LIMITANTES IDENTIFICADAS

Los resultados obtenidos tienen como supuesto que la información de lluvia recabada de puntos cercanos a cada sitio de muestreo es representativa de lo ocurrido en la realidad. En cuanto al muestreo en sí, fue realizado por diferentes técnicos con distintos criterios en cuanto al momento de la toma de la decisión y con distintos tipos de taladros y caladores.

La información disponible para calificar el suelo en la unidad de manejo fue escasa, sólo se dispuso de la información de grupo CONEAT para el 6% de los datos, por lo que surge mayoritariamente a partir de inferencia de fuentes secundarias.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA BASE DE DATOS

4.1.1. Descripción de variables cualitativas

4.1.1.1. Localización

La base de datos quedó conformada por 725 registros de concentración N-NO_3^- en el estrato de 0-20 cm y 20-40 cm. Los mismos agrupados según la clasificación de zonas utilizada por FUCREA y para el total de años se distribuyen de la siguiente forma: 39% Zona Centro (Durazno, Florida, La Paloma- Durazno), 38% Litoral-norte (Young, Guichón) y 23% Litoral-Sur (Soriano).

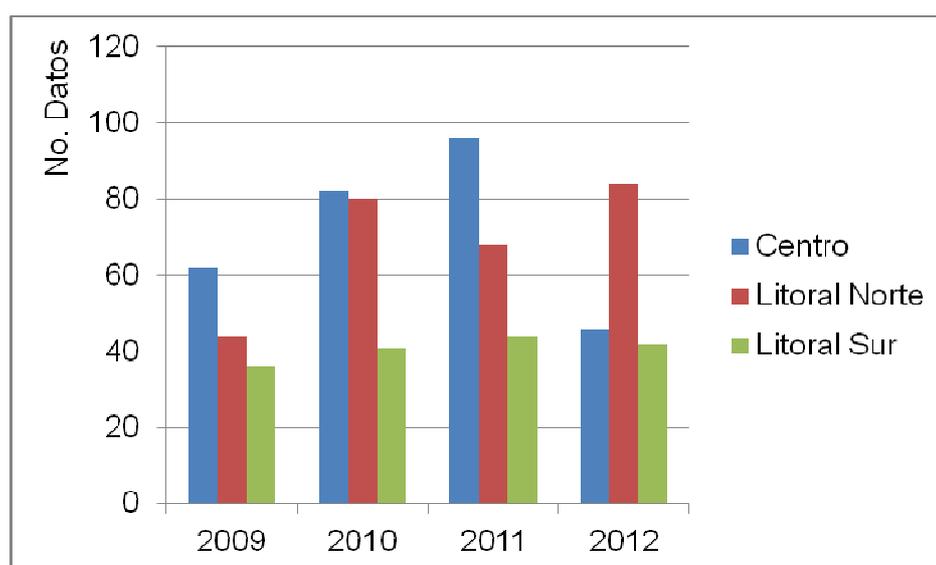


Figura No.1: No. de datos según zona y año.

Agrupando los datos según la clasificación manejada en la revisión (zona tradicional y nuevas zonas) (Arbeleche et al., 2010), aproximadamente el 60% de los datos proviene de la zona tradicionalmente agrícola (litoral-norte y litoral-sur) y el restante 40% de las consideradas nuevas zonas agrícolas (centro).

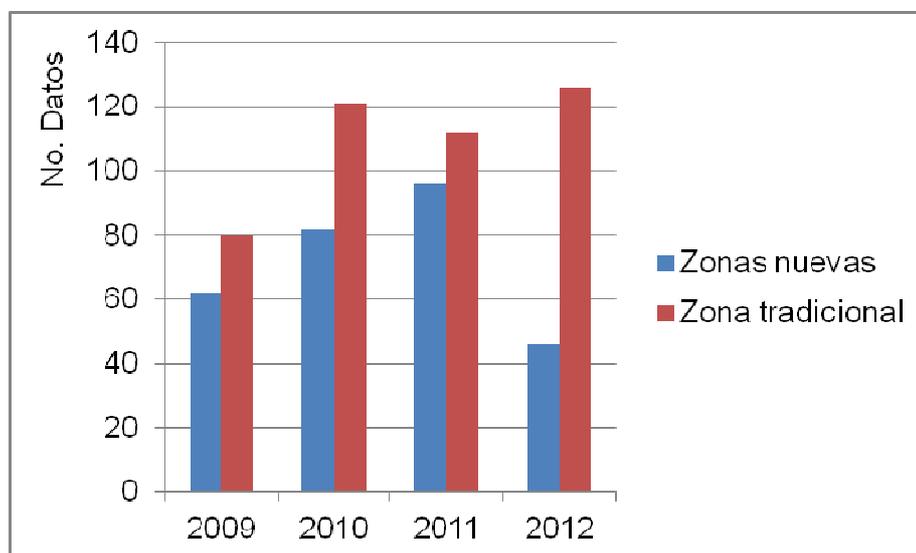


Figura No. 2: No. de datos según zona agrícola y año.

4.1.1.2. Ciclo de cultivos

En cuanto al ciclo de cultivos se cuenta con un mayor número de datos para cultivos de invierno, de los cuales 344 corresponden a trigo y 107 a cebada, constituyendo aproximadamente el 63% del total de muestras. El restante 37% corresponde casi en su totalidad a maíz, con 234 muestras.

Cuadro No. 2. No. de muestras por ciclo de cultivo para cada año.

Año	Invierno	Verano
2009	68	0
2010	110	74
2011	154	93
2012	123	54
2013	0	49
Total No. muestra	455	270

4.1.1.3. Suelos

La base de datos está construida con información de muestreos sobre 18 unidades de suelo, teniendo cada una de éstas distinto peso en cuanto al número de observaciones, información que se presenta en el cuadro No. 1 de anexos.

A cada unidad de suelo se le asigna un grupo CONEAT según el URUGUAY. MGAP. DSA (2001) y la descripción de grupos de suelos CONEAT (URUGUAY. MAP. DS, 1988a), lo que permite caracterizar a las unidades según su aptitud de uso. Con la información del grupo CONEAT asignado a cada unidad de suelo, se conoce el tipo de suelo dominante, textura y tipo de drenaje, esta información en su conjunto se presenta en los cuadros No. 3 y 4.

La figura No. 3 muestra los grupos CONEAT y el número de muestras tomadas sobre los mismos.

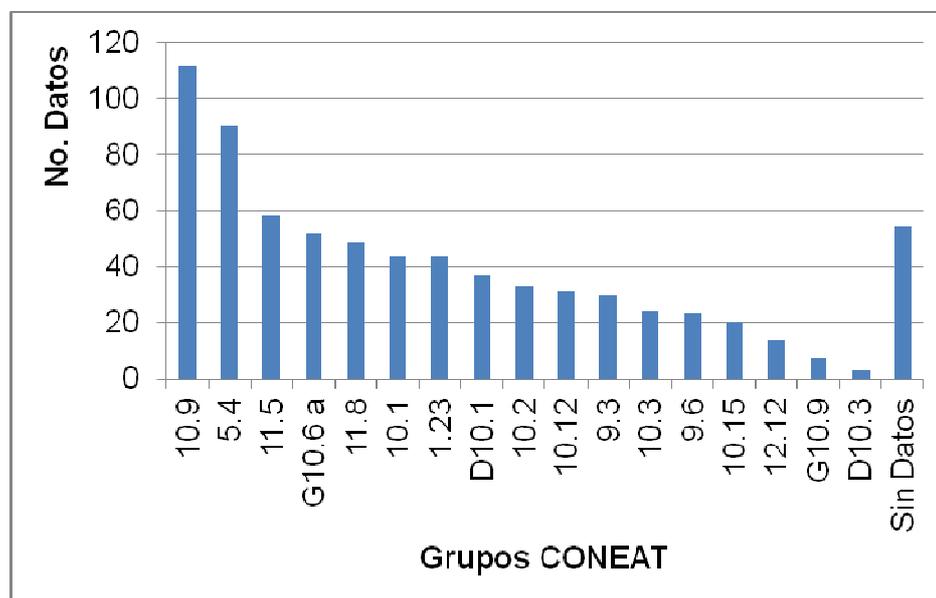


Figura No. 3: No. de datos según grupos CONEAT.

Como muestra la figura No. 3, se cuenta con información que proviene de 17 grupos CONEAT diferentes. Los suelos de mejor aptitud agrícola están

comprendidos en los grupos 10 y 11, reuniendo el 51% de los datos. Siendo el grupo 10 en su conjunto el más importante, representando en el 36% del total de los datos. Este grupo 10 está comprendido en su gran mayoría por suelos de aptitud agrícola con algunas limitantes, con suelos dominantes Brunosoles Eútricos Típicos y Lúvicos, Brunosoles Subeútricos Típicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos de textura pesadas a medias, con un drenaje interno moderado. Los grupos 11.5 y 11.8 representando el 15% de los datos, comprendidos por suelos de buena aptitud agrícola con algunas limitantes, con suelos dominantes Brunosoles Subeútricos Típicos y Brunosoles Eútricos Típicos y Lúvicos de texturas medias, y drenaje moderado a algo pobre.

Para caracterizar la información según clase textural, se agrupó la información proveniente de la textura de los suelos dominantes en tres clases; medias a finas, medias y medias a gruesas. La clase textural que tiene mayor peso son texturas medias a finas, comprendiendo el 50% de los datos; las texturas medias representan el 38%; y por último las clase texturales medias a gruesas con un 4%.

A partir de la información de Evaluación del Drenaje Natural de las Tierras del Uruguay (Molfino y Califra, 2004), se extrae la información en cuanto al drenaje natural de los grupos CONEAT. Siendo el tipo de drenaje moderado a algo pobre el que tiene mayor importancia con el 63% de los datos, le sigue el tipo de drenaje moderado, con un 32%, y con mucho menor peso los drenajes algo pobre, con un 5% de los datos.

En cuanto a aptitud de uso de los suelos según información de la Aptitud General de Uso de la Tierra (URUGUAY. MAP. DS, 1988b), a partir de los grupos CONEAT, el 44% de los datos proviene de suelos con moderadas limitaciones para la agricultura (A2), 31% de suelos con muy severas limitaciones para la agricultura (AP) y 25% suelos agrícolas con severas limitaciones (A3) .

A continuación se presenta la información tomando como referencia la clasificación en zona “tradicionalmente agrícola” (litoral-norte y litoral-sur) y “nuevas zonas agrícolas” (centro) (Arbeleche et al., 2010).

De los 438 datos provenientes de la zona tradicionalmente agrícola (en los que se obtuvo información de la unidad de suelo), según la información teórica relevada, el 62% de la información proviene de suelos con moderadas limitantes (A2) para la agricultura, dentro de los que se encuentran los grupos CONEAT 10.9, 11.5, 11.8, 10.1 y 10.2. Dentro de las limitantes identificadas para todos los suelos fue el riesgo de erosión y en el grupo 11.8 problemas de drenaje por subsuelo pesado. Los suelos dominantes en los suelos con la citada aptitud de uso son Brunosoles Eútricos Típicos y Lúvicos, Brunosoles Subeútricos Típicos y Vertisoles Rúpticos Típicos y Lúvicos. Estos son en su mayoría suelos de textura franco arcillo limosa, con drenaje moderado a algo pobre y de muy alta fertilidad natural.

Los suelos con severas limitantes (A3) representan el 20% de la información procedente de esta zona, comprendidos por los grupos CONEAT 10.12, 10.15, 9.3 y 9.6 que incluyen suelos Vertisoles Rúpticos Lúvicos, Brunosoles Eútricos Típicos, Brunosoles Subeútricos Típicos y Lúvicos y Planosoles y Argisoles Dístricos Ócricos, estos últimos de la unidad Algorta. Son en su mayoría suelos de texturas medias a livianas del tipo franco arenosa a arcillo franco arenosa, de drenaje moderado y de fertilidad media a baja. La limitante es principalmente el riesgo de erosión.

Dentro de esta zona los datos que provienen de suelos con muy severas limitantes (AP) corresponden al 18% y está comprendida solo por el grupo CONEAT 5.4 (unidad San Gabriel-Guaycurú), con suelo dominante Brunosoles Subeútricos Háplico de textura franco a franco arcillosa, drenaje moderado y fertilidad natural media. Con limitantes como riesgo de erosión y moderada disponibilidad de agua, para cultivos en secano, en años secos.

Cuadro No. 3. “Zona tradicionalmente agrícola”. Porcentaje de muestras según aptitud de uso, drenaje interno, textura, suelos dominantes, unidad y grupo CONEAT.

Aptitud	Drenaje	Textura	Suelos dominantes	Unidad	CONEAT	% Muestras
A2	M-AP	FrAcL-FrAc	BrET - VRT y L	SM, Yg, CN, PP	10.1, 10.9, 11.5, 11.8	60
A2	AP	FrAcL	BrET - VRT y L	Be	10.2	2
A3	M	ArFr-FrAr-FrAcAr	PIDO y M-ADOM-BrST y L	Al, Ch, CC	9.6, 9.3, 10.15	17
A3	M-AP	Fr-FrAc	VRL Y BrET y L	LC	10.12	3
AP	M	Fr-FrAc	BrSH	SG-G	5.4	18

Aptitud. A2: suelos con algunas limitaciones para agricultura, A3: suelos con severas limitaciones, AP: suelos con muy severas limitaciones.

Drenaje. M: moderado, M-AP: moderado a algo pobre, AP: algo pobre

Texturas. ArFr: arenoso-franco, FrAcL: franco-arcillo-limoso, FrAc: franco-arcilloso, FrAr: franco-arenoso, FrAcAr: francoarcilloarenoso, Fr: franco.

Suelos dominantes 1ra letra- Grupo; Br: Brunosol, V:Vertisol, Pl: Planosol, A: Argisol. 2da letra- Clase y/o Subgrupo; E: Eutrico, S: Subeutrico, R: Ruptico, D: Dístico. 3ra letra- Tipo y/o Subclase; T: Tipico, L: Luvico, O: Ocrico, M: Melánico, H: Háplico.

Unidad: Al: Algorta, Be: Bellaco, CC: Cuchilla Corralito, CN: Cañada Nieto, Ch: Chapicuy, LC: La Carolina, PP: Paso Palmar, SM: San Manuel, SG-G: San Gabriel-Guaycurú, Yg: Young.

Las nuevas zonas agrícola, comprendida por 233 datos, a diferencia de la zona “tradicionalmente agrícola” aproximadamente el 56% corresponde a suelos con muy severas limitantes para la producción agrícola (AP) correspondientes a los grupos CONEAT G 10.6 a, 1.23, 12.12, 5.4, G10.9 y D10.3. Dentro de las estas limitantes se encuentran fundamentalmente alto riesgo de erosión, baja capacidad de almacenaje de agua por tratarse de suelos poco profundos en algunos casos y condiciones de drenaje algo pobre. Dentro de este grupo de suelos con muy severas limitantes se encuentra una gran diversidad en cuanto a grupo de suelos dominantes que van desde Brunosoles Subéutricos Típicos y Lúvicos, Argisoles Subéutricos Ócricos Abrúpticos, Litosoles Eútricos Melánicos, Brunosoles Eútricos Típicos, Vertisoles Hápticos, Brunosoles Subeútricos Hápticos. La clase de texturas que predominan son medias a finas. Todos estos suelos presentan grandes contrastes en fertilidad, en cuanto al tipo de drenaje interno, son en su mayoría de tipo moderado a algo pobre asociado en muchos de los casos a topografías planas. Además de los ya mencionados, dentro de suelos con muy severas limitantes también se encuentran Luvisoles Úmbricos Típicos de textura franca, baja fertilidad, bien drenados, de muy poca importancia en cuanto al número de muestras.

El 33% de las muestras provienen de suelos con severas limitantes para la agricultura (A3) comprendidos por los grupos CONEAT D10.1, 10.3 y 10.12. Se encuentran Brunosoles Eutricos Típicos y Lúvicos y Vertisoles Rúpticos Lúvicos de textura principalmente franco arcillosa, drenaje moderado a algo pobre y alta fertilidad natural. Como limitantes presentan riesgo de erosión y moderada disponibilidad de agua para cultivos exigentes, en secano, en años secos.

Los suelos con moderadas limitantes (A2) corresponden a sólo el 11% de los datos, incluyendo solo al grupo CONEAT 10.2 (unidad Carpintería) con suelos dominantes Vertisoles Rúpticos Lúvicos y Brunosoles Eútricos y Subeútricos Típicos a veces Lúvicos, de textura franco arcillosa, drenaje algo pobre y fertilidad alta . Presentando como única limitante la menor resistencia a la erosión.

Cuadro No. 4. "Nuevas zonas agrícola". Porcentaje de muestras según aptitud de uso, drenaje interno, textura, suelos dominantes, unidades de suelo y grupo CONEAT.

Aptitud	Drenaje	Textura	Suelos dominantes	Unidad	CONEAT	% Muestras
AP	M	Fr-FrAcL-FrAc	LiEM - BrET- BrSH- LUT- BrST y L	Cu, SG-G, Ap, PH	1.23, 5.4, G10.9, D10.3	28
AP	M-AP	Fr-AcL	VH- BrET	Bl, I-TA	G 10.6 a, 12.12	28
A3	M-AP	Fr-FrAc	BrET y L – VRL	LC, SdiT, Mc	D10.1, 10.3, 10.12	33
A2	AP	FrAc	VRL -BrEyS LyT	Cr	10.2	11

Aptitud. A2: suelos con algunas limitaciones para agricultura, A3: suelos con severas limitaciones, AP: suelos con muy severas limitaciones.

Drenaje. M: moderado, M-AP: moderado a algo pobre, AP: algo pobre.

Texturas. AcL: arcillo-limoso, FrAcL: franco-arcillo-limoso, FrAc: franco-arcilloso, FrAr: franco-arenoso, FrAcAr: franco-arcillo-arenoso, Fr: franco.

Suelos dominantes 1ra letra- Grupo; Br: Brunosol, V:Vertisol, Li: Litosol, A: Argisol, L: Luvisol. 2da letra- Clase y/o Subgrupo; E: Eutrítico, S: Subeutrítico, R: Ruptico, H: Háptico, U: Úmbrico. 3ra letra- Tipo y/o Subclase; T: Típico, L: Lúvico, O: Ócrico, M: Melánico.

Unidad. Ap: Aparicio Saravia, Bl: Blanquillo, Cr: Carpintería, Cu: Curtina, I-TA: Itapebí -Tres Arboles, LC: La Carolina, Mc: Montecoral, PH: Puntas de Herrera, SdiT: Sarandí de Tejera, SG-G: San Gabriel-Guaycurú.

4.1.1.4. Antecesoros

Como la mayor parte de la información es generada por muestreos para cultivos de invierno, el antecesor inmediato al muestreo con mayor peso en la base de datos es la soja de primera, reflejando su importancia en el sistema agrícola actual. Le sigue en importancia como antecesor barbecho químico, el cual posteriormente fue mayormente sembrado con maíz, lo que determina que el suelo permanezca en barbecho durante todo el invierno. En menor porcentaje hubieron muestreos provenientes de soja de segunda, y otros antecesoros, como trigo, cebada, sorgo y maíz. Estos fueron agrupados como “otros” a causa de su bajo porcentaje.

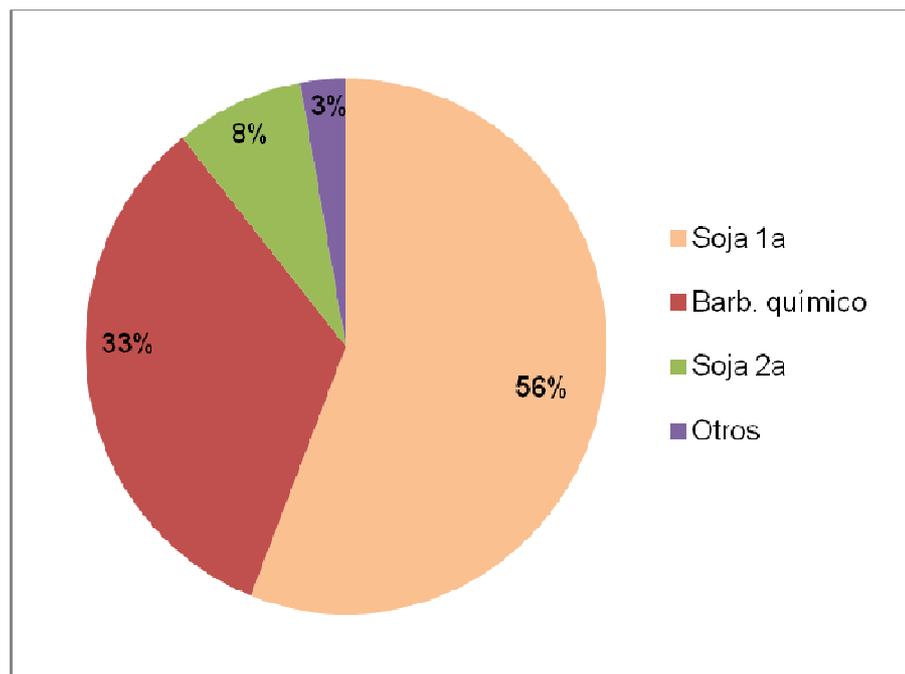


Figura No. 4: % de datos según antecesor.

4.1.2. Descripción de variables cuantitativas

En el siguiente cuadro se muestran los valores de percentil 25, 50, 70 y 90, promedios y coeficientes de variación de las principales variables cuantitativas en estudio.

Cuadro No. 5. Descripción de variables cuantitativas.

Variable	Perc. 25	Perc. 50	Perc. 75	Perc. 90	Media	CV(%)
Tiempo de barbecho (días)	13	32	56	78	39	94,6
Años de agricultura	2	3	6	8	4	67,6
prec 10 días previos muestreo (mm)	0	0	35	55	20	151,0
prec 20 días previos muestreo (mm)	12	50	83	113	55	90,0
prec 30 días previos muestreo (mm)	38	83	112	141	81	64,9
prec 40 días previos muestreo (mm)	67	102	136	166	105	55,6
prec 50 días previos muestreo (mm)	86	130	165	211	131	48,7
MO (%)	3,0	3,7	4,3	4,9	3,8	57,3
N-NO ₃ ⁻ (ppm) 0-20cm	6	8	10	13	8,4	46,9
N-NO ₃ ⁻ (ppm) 20- 40cm	5	6	9	11	7	48,4

Las precipitaciones previas son las que presentan la mayor variabilidad, en particular las registradas en los 10 y 20 días previos al muestreo. Esto debido a lluvias intensas ocurridas en el año 2011 y 2012, como lo demuestra la figura No. 5, para dichos años se da una mayor probabilidad de lluvias de más de 100 mm en períodos menores a 20 días.

Con respecto al tiempo de barbecho, el 50 % de los datos no supera los 32 días, e inclusive el 75% de las observaciones corresponden a situaciones con menos de 60 días de barbecho, reflejando la cantidad de muestreos realizados en sitios donde el cultivo a sembrar fue un cereal de invierno y su

antecesor inmediato soja de primera o segunda. Esta gran proporción de ambientes con períodos de barbecho menores a los considerados como apropiados para lograr una buena disponibilidad de N-NO_3^- a la siembra, según la bibliografía consultada, podrían entre otros factores ser causantes de una baja concentración de dicho nutriente al momento del muestreo.

La concentración de N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm y de N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm fueron las variables que presentaron el menor coeficiente de variación. Con respecto a la concentración de N-NO_3^- (ppm), tanto para el estrato de 0-20 cm como 20-40 cm, el 75 % de los datos no supera las 10 ppm de N-NO_3^- . Encontrándose dichas concentraciones muy por debajo de los niveles críticos, tanto para cultivos de invierno como verano, representando situaciones en donde es esperable una gran respuesta a la fertilización nitrogenada. Otro aspecto a considerar es que el contenido de N-NO_3^- (ppm) en los primeros 20 cm es muy similar al de la segunda capa de 20 cm, reduciéndose en promedio un 15% desde la primera a segunda capa de 20 cm.

En cuanto a la variable años de agricultura, la mitad de los datos provienen de chacras que no superan los 3 años de agricultura, y la otra mitad queda comprendida entre 3 y 8 años de agricultura.

4.1.2.1. Precipitaciones

En la figura No. 5, se presenta la frecuencia de precipitaciones acumuladas (mm) para 10, 20, 30, 40 y 50 días previos al muestreo de suelo para cada año. Como es esperable, a lo largo de los años se mantiene una tendencia a que los mayores registros acumulados ocurran al considerarse un mayor período de tiempo. Esto marca que la mayor probabilidad de que ocurran precipitaciones entre 0-20 mm se dé los 10 días previos al muestreo, y que aquellas situaciones de más de 100 mm ocurran principalmente entre los 40 y 50 días previos a este. Siendo casi nula la probabilidad que en los 10 días previos al muestreo se registren más de 100 mm, excepto para el año 2012. Para el año 2011, resulta destacable la mayor probabilidad de lluvias de más de 100 mm en los 20, 30 y 40 días previos al muestreo.

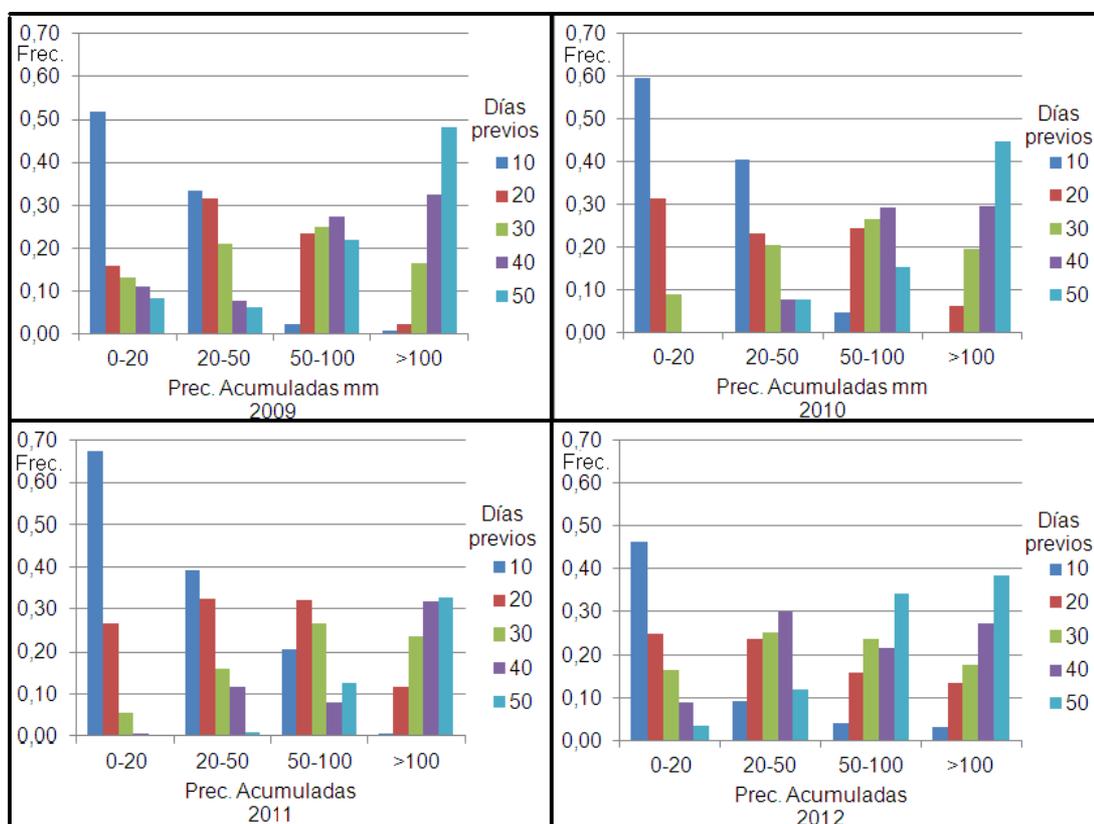


Figura No. 5: Frecuencia de precipitaciones acumuladas (mm) para 10, 20, 30, 40, 50 días previos al muestreo, según año para el total de datos.

4.1.2.2. Fecha de muestreo

En la figura No. 6, se presenta la frecuencia del total de observaciones para fecha de muestreo, a lo largo de un año. Observándose un claro patrón en el cual se concentra aproximadamente el 90% de los mismos entre principios de mayo y mediados de agosto. Con una tendencia a concentrar el 60% de los muestreos hasta mediados de junio, muestreos que coinciden con la fecha de siembra de los cultivos de invierno. Esta ubicación temporal de la fecha de muestreos durante los meses de invierno, con menor temperatura del suelo y mayor probabilidad de suelo saturado, condiciones que disminuyen la tasa de mineralización y favorece procesos de pérdidas de nitratos.

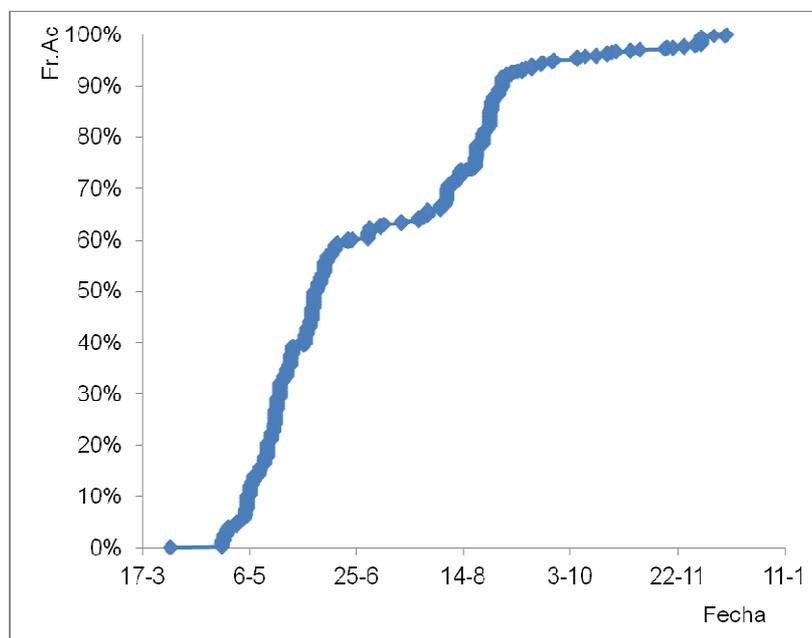


Figura No. 6: Distribución del total de fecha de muestreo llevadas a lo largo de un año.

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.2.1. Árbol de clasificación y regresión de $N-NO_3^-$ de 0-20 cm

Para los 498 datos analizados, la concentración $N-NO_3^-$ (ppm) en 0-20 cm promedio fue de 8 ppm. Las precipitaciones acumuladas en los 40 días previos al muestreo fue la primera variable en clasificar el nivel de $N-NO_3^-$ ppm (0-20 cm), particionado en dos grupos de chacras que promediaron 7 y 9 ppm $N-NO_3^-$ (ppm) en 0-20 cm, en función de un registro menor o mayor a los 130 mm. El grupo de chacras que presentó mayor concentración de $N-NO_3^-$ (0-20 cm), como causa de menores precipitaciones acumuladas durante los 40 días previos al muestreo, fueron clasificadas por las lluvias acumuladas durante los 10 días previos al muestreo. Los nodos fueron separados según un registro de precipitaciones igual o mayor y menor a 2 mm. Las chacras que registraron entre 2 y 130 mm acumulados en los 40 días previos al muestreo obtuvieron un promedio de 10 ppm $N-NO_3^-$ (0-20 cm), correspondiendo este valor a la mayor concentración dentro del total de datos analizados. Esto podría estar explicado

por condiciones de humedad no excesiva que favorecieron la mineralización. Por otra parte, el grupo de chacras en las que se registró menos de 2 mm los 10 días previos al muestreo obtuvo un promedio de 8 ppm N-NO₃⁻ (0-20 cm).

El grupo de chacras clasificado en el primer nodo como de menor concentración, es diferenciado en base a las precipitaciones acumuladas los 20 días previos al muestreo. Quedando diferenciada situaciones con registro menor a 50 mm, con una concentración promedio de N-NO₃⁻ (0-20 cm) de 9 ppm y situaciones que registraron 50 mm o más, obteniendo una concentración N-NO₃⁻ (0-20 cm) de 6 ppm, estas situaciones fueron las de menor concentración en el total de datos analizados y las que a su vez registraron los mayores acumulados los días previos al muestreo, condiciones que favorecen la pérdida de nitratos en el perfil del suelo.

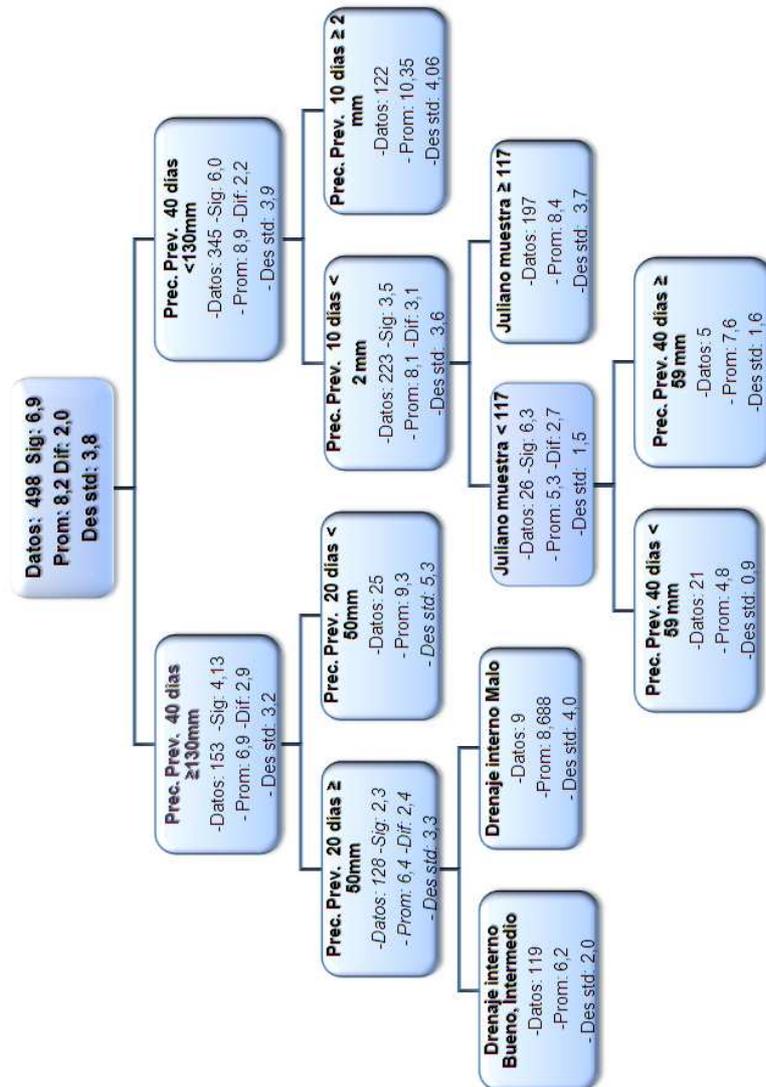


Figura No. 7: Árbol de clasificación y regresión N-NO_3^- 0-20 cm.

Si bien existió una diferencia que va desde 6 ppm a 10 ppm en el contenido de N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm promedio, entre los grupos clasificados según las variables como de menor y mayor concentración, ésta en términos agronómicos no es relevante, ya que representa en todos los casos situaciones en donde es esperable una alta respuesta a la fertilización nitrogenada, tanto para cultivos de invierno como verano.

4.2.2. Árbol de clasificación y regresión de N-NO₃⁻ de 20-40 cm

Para identificar las variables que determinan la concentración N-NO₃⁻ ppm en el estrato de 20-40 cm, se construyó un segundo árbol de clasificación y regresión teniendo en cuenta las mismas variables regresoras que en el árbol anterior, además del contenido de N-NO₃⁻ 0-20 cm. En el análisis del total de datos se obtuvo un promedio de 7 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm, siendo la concentración en ppm N-NO₃⁻ en superficie (0-20 cm), la única variable relevante en clasificar grupos de chacras de mayor y menor contenido N-NO₃⁻ (ppm) 20-40 cm. Dicha variable clasifica a un grupo de chacras con un promedio de 6 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm, cuando la concentración en el estrato superior fue menor a 9,2 ppm N-NO₃⁻, y a otro grupo con un promedio de 10 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm, cuando la concentración en el estrato superior fue igual o mayor a 9,2 ppm N-NO₃⁻.

El nodo de menor concentración, es clasificado nuevamente según el contenido en ppm N-NO₃⁻ en el estrato superior, pero esta vez separa los grupos cuando las concentraciones de N-NO₃ en el estrato superior se encuentran por encima o por debajo de 6,3 ppm. Quedando de esta forma un grupo de menor concentración para las situaciones menores a 6,3 ppm N-NO₃⁻ 0-20 cm, con un promedio de 4 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm, y otro de mayor concentración para situaciones de 6,3 ppm o más N-NO₃⁻ 0-20 cm, con 7 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm en promedio.

El grupo de chacras clasificado primeramente como de mayor concentración, es diferenciado nuevamente por el contenido en ppm N-NO₃⁻ en el estrato superior, remarcando la importancia de esta variable en el contenido de N-NO₃⁻ (ppm) en el estrato inferior (20-40 cm). Se diferencian situaciones de concentración igual o mayor a 14 ppm N-NO₃⁻ 0-20 cm, con un promedio de 13 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm, de aquellas que tienen menos de 14 ppm N-NO₃⁻ 0-20 cm, y que obtuvieron un promedio de 9 ppm N-NO₃⁻ 20-40 cm.

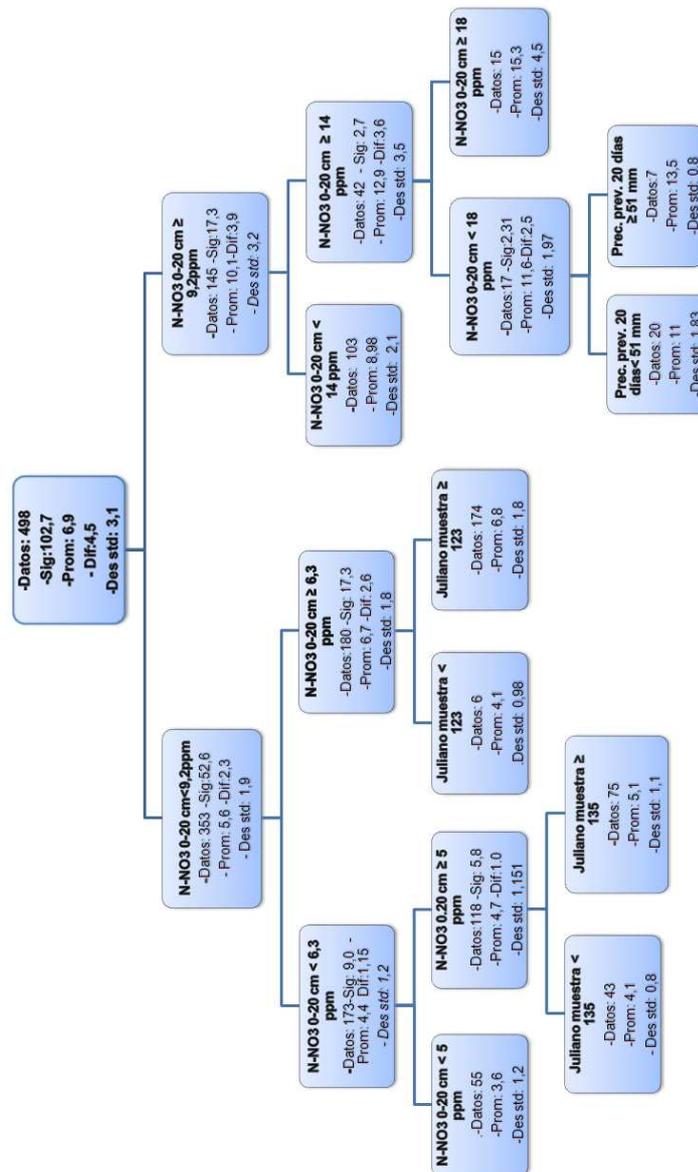


Figura No. 8: Árbol de clasificación y regresión N-NO_3^- 20-40cm.

Una vez concluido el análisis, se puede afirmar que independientemente de todas las variables estudiadas, el contenido de N-NO_3^- en el estrato superior sería la variable más relevante en marcar el contenido N-NO_3^- estrato de 20-40 cm. Por lo tanto, si se registra un alto contenido de N-NO_3^-

NO_3^- en el estrato superior, será muy probable de tener mayor contenido de N-NO_3^- en el estrato inferior. Esta variable resultó de mayor importancia que a las precipitaciones previas al muestreo, las que a priori se pensaba que pudiesen estar incidiendo en el lavado de nitratos en el perfil del suelo.

4.2.3. Regresión lineal: N-NO_3^- 0-20 cm y N-NO_3^- 20-40 cm

Se estudió la relación existente entre la variable dependiente N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm y N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm, variable regresora, para los 725 datos. Verificándose según dicho análisis, que si bien la concentración de nitratos (ppm) de 20-40 cm se relacionó lineal y positivamente con el incremento en la concentración de N-NO_3^- (ppm) de 0-20 cm, se obtuvo un r^2 ajustado de 0,64. Este ajuste obtenido en términos medios fue mucho menor al obtenido en otros trabajos; ejemplo de esto fue el ajuste obtenido por Perdomo et al. (1999) $r=0.78$ y $r^2=0.89$, en ensayos de respuesta N en trigo a Z22. Bono y Álvarez (2007) en ensayos de fertilización N en trigo y girasol, estudiando la relación N-NO_3^- (kg/ha) 0-20 cm y N-NO_3^- (kg/ha) 0-60 cm obtuvieron un $r^2=0,73$. Si bien estos estudios presentaron un objetivo similar al presente trabajo, se realizaron en ensayos parcelarios, en donde el control de los factores y variables que inciden en el contenido de nitratos en el perfil del suelo, así como el error propio del muestreo, son más rigurosos, aumentando la precisión del mismo.

Si bien se obtuvo un $r^2=0.64$ ajustado para ambas variables, por lo que el modelo logró explicar el 64% de la variabilidad en el contenido N-NO_3^- ppm en el estrato de 20-40 cm, este no sería una buena herramienta para estimar la concentración de N-NO_3^- ppm 20-40 cm, ya que como se observa en la figura No. 9, existe una gran dispersión de valores N-NO_3^- ppm (20-40 cm) para una misma concentración de N-NO_3^- ppm (0-20 cm). Siendo además ésta dispersión mayor en situaciones de N-NO_3^- ppm (0-20 cm) entre 8 y 13 ppm, en las que sería más importante conocer con mejor precisión el contenido de N-NO_3^- ppm (20-40 cm), por ser rangos en donde existe una mayor variación en la respuesta al agregado de N. Un ejemplo de dicha variación queda demostrado si se obtuviera un valor del entorno a las 8 ppm N-NO_3^- ppm (0-20 cm), se obtendría valores de N-NO_3^- ppm (20-40 cm) en un rango que va desde 2 hasta 13 ppm. Esta misma situación aunque en mucho menor magnitud

coincide con otros antecedentes que estudiaron la misma relación en ensayos de fertilización donde se tiene mayor control de los factores (Bono y Álvarez, 2007).

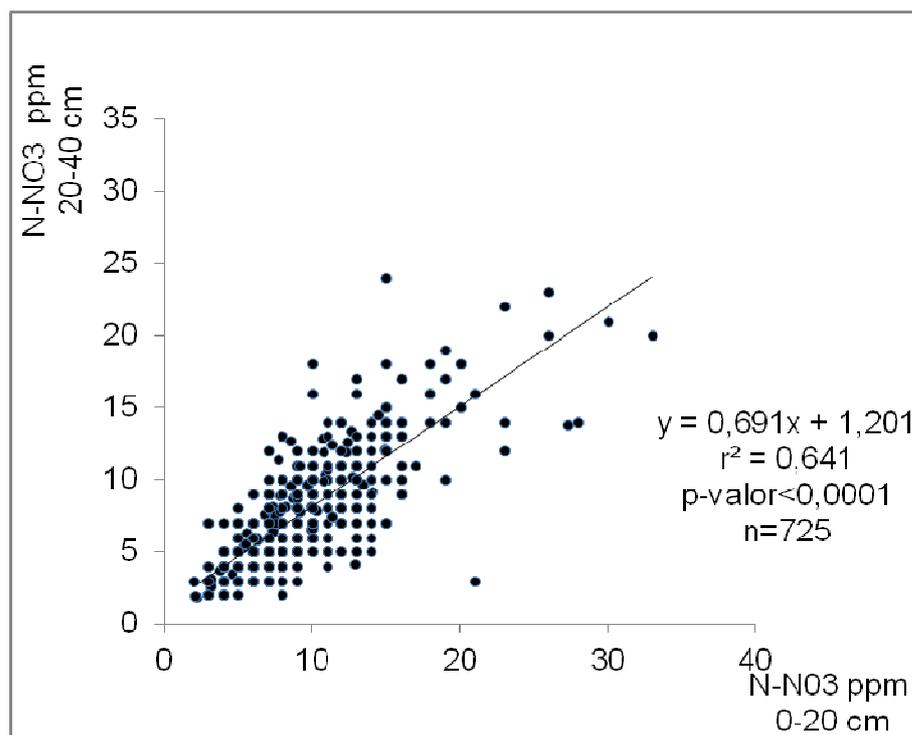


Figura No. 9: Relación N-NO₃⁻ 0-20 cm y N-NO₃⁻ 20-40 cm.

4.2.4. Regresión lineal: precipitaciones 40 días previos al muestreo y N-NO₃⁻ 0-20 cm

Al comprobarse mediante el análisis de árbol de clasificación y regresión, que las precipitaciones los 40 días previos al muestreo fue la variable más importante en clasificar situaciones de mayor y menor contenido de N-NO₃⁻ 0-20 cm, se realizó el estudio de la relación entre dichas variables.

Esta relación presenta un ajuste lineal negativo $r^2 = 0,34$. Interpretándose mediante el análisis, que el contenido N-NO₃⁻ 0-20 cm presenta

una gran variación para situaciones en donde las precipitaciones en los 40 días previos al muestreo no superan los 150 mm, verificándose tanto situaciones de bajo como alto contenido N-NO_3^- 0-20 cm. Mientras que en situaciones en donde las precipitaciones superan los 150 mm la concentración de nitratos en la capa superficial es baja. Este menor contenido de N-NO_3^- 0-20 cm, para condiciones de elevadas precipitaciones en los 40 días previos al muestreo, sería resultado de pérdidas por lixiviación y desnitrificación, debido a condiciones de anaerobiosis por saturación de agua del perfil del suelo.

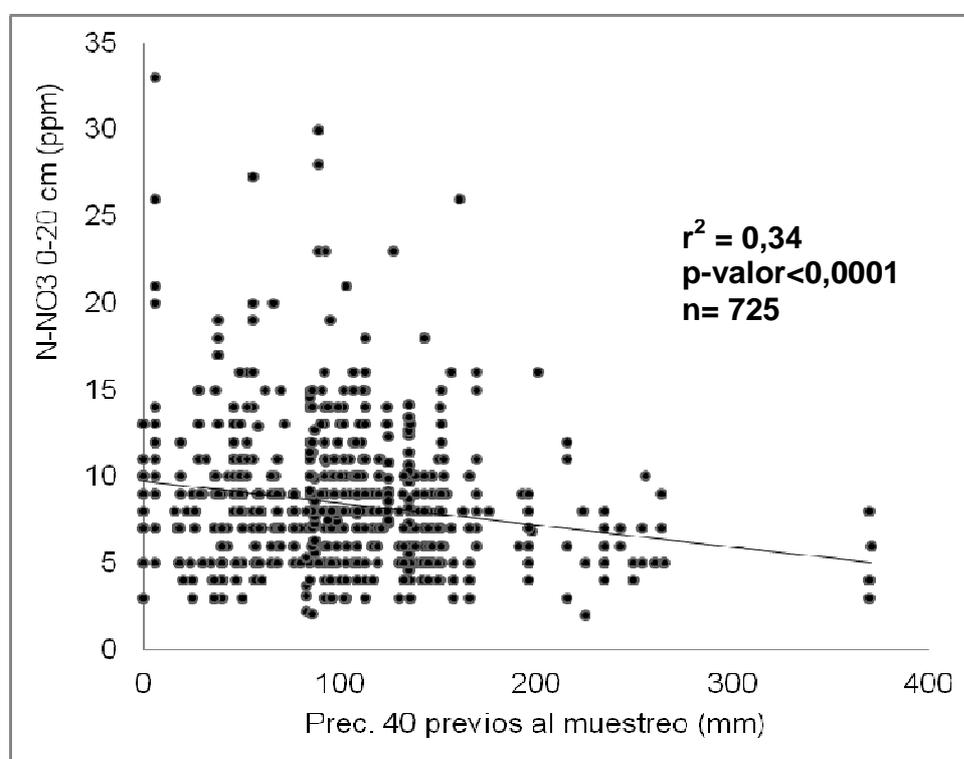


Figura No. 10: Relación precipitaciones 40 días previos al muestreo y N-NO_3^- 0-20 cm.

4.3. ANÁLISIS POR RANGOS DE RESPUESTA

La dispersión verificada en el modelo del análisis de la regresión lineal, determinó que este no resulte en una herramienta confiable para predecir el

contenido de N-NO_3^- ppm (20-40 cm) mediante el dato puntual de N-NO_3^- ppm (0-20 cm). Debido a esto, se intenta comprobar la utilidad de dicho modelo para predecir valores de N-NO_3^- ppm (20-40 cm) dentro de rangos preestablecidos. Para ello se calculó el porcentaje de acierto de dicho modelo; **N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm = 1,201 + 0,641 * N-NO_3^- ppm (0-20 cm)**, para los rangos considerados, información que se presenta en los cuadros No. 6 y No. 7.

Cuadro No. 6. No. de datos según rango N-NO_3^- ppm (20-40 cm) para datos de muestreo, datos estimados por el modelo de regresión lineal y % acierto.

N-NO_3^- 20-40 cm (ppm)	Muestreo 20-40 cm	Modelo	Acierto (%)
bajo ≤ 6	258	199	77
medio 6- 16	230	182	79
alto ≥ 16	10	2	20

Cuadro No. 7. No. de datos según rango N-NO_3^- ppm (20-40 cm) para datos de muestreo, datos estimados por el modelo de regresión lineal y % aciertos, acotando el rango medio.

N-NO_3^- 20-40cm (ppm)	Muestreo 20-40 cm	Modelo	Acierto (%)
bajo ≤ 6	258	199	77
medio 6- 12	213	157	74
alto ≥ 12	27	17	63

Al comprobar el porcentaje de acierto del modelo para los rangos establecidos, se observó que el mismo resultó bueno en predecir situaciones consideradas de bajo y medio contenido de N-NO_3^- (ppm) en el estrato de 20-40 cm, aproximándose a un 80% de aciertos. Mientras que, para situaciones de alto contenido el modelo disminuye su porcentaje de aciertos, dependiendo del rango considerado, siendo este más bajo cuando los rangos consideran

contenidos altos de N-NO_3^- 20-40 cm. Es de destacar, que el número de situaciones de muestreo dentro de estos rangos de mayor concentración de N-NO_3^- es mucho menor, por lo que el porcentaje de aciertos presentado será menos exacto que aquellos rangos en donde se contó con un mayor número de situaciones de muestreo.

5. CONCLUSIONES

Se rechaza la hipótesis planteada en el trabajo inicialmente, no fue posible desarrollar un modelo con buen ajuste, que permita estimar con precisión la cantidad de nitratos en los 20-40 cm de suelo, a partir de la cantidad en superficie (0-20 cm), características del suelo, e información de las condiciones climáticas previas y de manejo para el set de datos disponibles.

Como resultado de análisis estadísticos de árboles de clasificación y regresión, se identificó a las precipitaciones los días previos al muestreo como la variable en estudio de mayor importancia en marcar la variación en el contenido N-NO_3^- ppm en el estrato superior (0-20 cm), y en especial aquellas precipitaciones acumuladas que superan los 100 mm, las cuales presentan mayor probabilidad de ocurrir en los 40 a 50 días previos al muestreo. Las situaciones clasificadas como estadísticamente diferentes para el contenido de N-NO_3^- 0-20 cm, estuvieron en todos los casos dentro de rangos calificados como de alta respuesta a la fertilización nitrogenada. En cuanto al contenido N-NO_3^- ppm en el estrato inferior (20-40 cm) estuvo principalmente asociado al contenido N-NO_3^- ppm en el estrato superior (0-20 cm).

Al estudiar la relación entre el contenido de N-NO_3^- ppm en el estrato superior 0-20 cm y el estrato de 20-40 cm para el total de datos, se comprobó un ajuste estadístico lineal positivo ($r^2=0.64$), menor al obtenido por distintos autores en los antecedentes estudiados. Este menor ajuste pudo ser consecuencia de que el presente estudio fue realizado en base a datos que provienen de condiciones de producción, a diferencia de los antecedentes, que se desarrollaron en ensayos parcelarios donde se tiene mejor información y control de las variables y factores que explican la variación en el contenido de N-NO_3^- (ppm). De modo que, si se deseara utilizar el modelo para inferir el contenido de N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm, este conduciría a errores al observarse una gran variación en el contenido N-NO_3^- (ppm) en profundidad para un mismo valor de N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm.

Al estudiar la relación entre las precipitaciones los 40 días previos al muestreo y el contenido de N-NO_3^- 0-20 cm, se verificó un ajuste lineal negativo. La relación indica, que en aquellos casos, en los que se registran precipitaciones mayores a los 150 mm, el contenido de N-NO_3^- 0-20 cm es bajo. Sin embargo, cuando las precipitaciones fueron menores a los 150 mm se constatan casos de alto como de bajo contenido de N-NO_3^- 0-20 cm.

Al analizar el modelo de la regresión lineal utilizando rangos de respuesta, este resultó bueno prediciendo situaciones calificadas como de alta y media respuesta al agregado de N, constatándose menores aciertos en situaciones en donde se espera que la respuesta sea baja. Si bien el porcentaje de aciertos fue bueno, no sería aconsejable sustituir el muestreo en profundidad (20-40 cm), en especial para el rango medio (6 a 12 ppm N-NO_3^- y 6 a 16 ppm N-NO_3^-), ya que en este rango existe una considerable diferencia entre el valor mínimo y máximo de concentración la que cambiaría la dosis a agregar al momento de fertilizar.

6. RESUMEN

En la práctica agrícola el conocimiento del contenido de N-NO_3^- en el estrato superior del suelo como indicador de respuesta, es de gran importancia al momento de tomar decisiones de fertilización nitrogenada. El método más utilizado para obtener el dato de N-NO_3^- es el muestreo de los primeros 20 cm de suelo, donde se encuentra el mayor contenido de materia orgánica y por ende se estima que es donde habrá mayor concentración de nitrógeno bajo la forma de N-NO_3^- . Sin embargo, es posible que se encuentre N-NO_3^- en cantidades considerables a profundidades mayores a los 20 cm de suelo, cuando se ven favorecidos los mecanismos que promueven la lixiviación. El objetivo de este trabajo fue estudiar la relación entre el contenido de N-NO_3^- (ppm) en los 0-20 cm y los 20-40 cm de suelo, con la finalidad de obtener un modelo ajustado estadísticamente que permita estimar la concentración de N-NO_3^- de 20-40 cm utilizando como variable el contenido de N-NO_3^- de los primeros 20 cm de suelo. Para dicho trabajo se construyó una base de datos en base a registros de concentración de N-NO_3^- (ppm) en el estrato de 0-20 cm con el estrato 20-40 cm, registros de precipitaciones e información de manejo de cultivos desde el invierno 2009 al verano 2013, información aportada por las empresas Kilafen y Tierra Greda SA (Grupo CREA La Cuchilla). Previo a hacer un estudio de la relación de la concentración de N-NO_3^- de 0-20 cm con la concentración de N-NO_3^- de 20-40 cm, se determinaron las principales variables que inciden en el contenido de N-NO_3^- en el estrato de 0-20 y 20-40 cm. Para esto se realizó un análisis estadístico utilizando árboles de clasificación y regresión, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados: las precipitaciones días previos al muestreo fue la variable en estudio de mayor asociación con el contenido N-NO_3^- ppm en el estrato superior (0-20 cm), y en especial aquellas precipitaciones acumuladas que superan los 100 mm las que tienen mayor probabilidad de ocurrir en los 40 a 50 días previos al muestreo. Mientras que el contenido N-NO_3^- ppm en el estrato inferior (20-40 cm) estuvo principalmente asociado al contenido N-NO_3^- ppm en el estrato superior (0-20 cm). Para el estudio de la relación de la concentración de N-NO_3^- del estrato de 0-20 cm y 20-40 cm, se utilizó el software estadístico Infostat 2012/p. El resultado indicó que la concentración de N-NO_3^- de 0-20 cm se relacionó

linealmente con la concentración de N-NO_3^- de 20-40 cm ($r^2 = 0,64$). Si bien se obtuvo una relación lineal, esta no sería una buena herramienta para estimar el contenido de N-NO_3^- ppm (20-40 cm) a partir del dato puntual del contenido en el estrato superior (0-20 cm), debido a la variación verificada en el contenido de 20-40 cm para un mismo dato de N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm. Por lo tanto, se intentó comprobar la utilidad del modelo de la regresión lineal para predecir niveles de N-NO_3^- ppm (20-40 cm) dentro de determinados rangos a partir del dato de N-NO_3^- de 0-20 cm. El resultado demostró que el modelo es bueno prediciendo situaciones en donde se espera que haya alta y media respuesta a la fertilización nitrogenada, disminuyendo su capacidad de predicción para situaciones donde se espera que no haya respuesta a la fertilización nitrogenada. En resumen, debido a lo complejo que resulta la dinámica del N y los diversos factores que inciden en el contenido de N-NO_3^- en el perfil del suelo, no fue posible obtener un modelo que prediga con exactitud el contenido de N-NO_3^- del estrato de 20-40 cm a partir del dato de los primeros 20 cm. Pero si se logró obtener un modelo que sirve como herramienta para predecir la concentración de N-NO_3^- 20-40 cm dentro de determinados rangos, utilizando el dato de análisis del contenido de N-NO_3^- de 0-20 cm.

Palabras clave: Nitratos; Concentración; Perfil; Relación; Modelo.

7. SUMMARY

In agricultural practices, the knowledge of the N-NO_3^- content in the upper soil layers as an indicator of crops response, is of great importance to take nitrogen fertilization decisions. The most used method to obtain N-NO_3^- concentration is sampling the 0-20 cm soil layer, where it is the higher content of organic matter and therefore where is estimated to be the greater nitrogen concentration under the N-NO_3^- form. However, it is possible to have N-NO_3^- in considerable quantities at depths greater than 20 cm of soil, specially when the mechanisms that promote leaching are favored. The work's objective was to study the relationship between the N-NO_3^- (ppm) content in the 0-20 cm and 20-40 cm of soil layers, in order to obtain an statistically adjusted model to estimate the N-NO_3^- (ppm) content in the 20-40 cm, using the N-NO_3^- (ppm) in the upper 0-20 cm layer. For the study, was constructed a database containing information that consist on crop management information from 2009's winter to 2013's summer, where as the main data of interest are the N-NO_3^- analysis values of the 0-20 and 20-40 cm layer from differents management units sampled. They also provided the rainfall data registration. With the reported information, together with some considered relevant factors for the variation of the N-NO_3^- concentration and distribution in the soil profile, was formed database. Previously to study the N-NO_3^- 0-20 cm and 20-40 cm concentration relationship, was identified the main variables that affect the N-NO_3^- content in the 0-20 and 20-40 cm layers. In order with that, was performed a statiscal analysis using regression trees, of which the following results were obtained: rainfall previous the sampling date was the most important variable in marking the variation in N-NO_3^- (ppm) concentration in the upper layer (0-20 cm), and especially those accumulated rainfall exceeding 100 mm, which are more likely to occur in the 40-50 days prior to the sampling. While N-NO_3^- (ppm) concentration in the lower layer (20-40 cm) is dependent upon the N-NO_3^- (ppm) concentration in the upper layer (0-20 cm). To study the N-NO_3^- (ppm) concentration relationship in boths considered layers (0-20 and 20-40 cm), was used Infostat 2012 / p statistical software. The result indicates that the N-NO_3^- 0-20 cm layer concentration was positively related to the 20-40 cm N-NO_3^- concentration ($R^2 = 0,64$). Although the statiscal software demonstrated a linear relationship, would be inappropriate to estimate the N-NO_3^- 20-40 cm

concentration with a punctual data of the N-NO_3^- 0-20 cm concentration, such as the wide variation verified in the N-NO_3^- 20-40 cm data, for a same N-NO_3^- 0-20 cm concentration data. It is for the above mentioned that was attempted to verify the percentage of success for the improved relationship model for different N-NO_3^- 20-40 (ppm) ranges (considering crops response) using as a variable N-NO_3^- 0-20 cm content. The result showed that the model is good at predicting low and middle N-NO_3^- (ppm) 20-40 ranges of concentrations. However, it is greatly diminishing the percentage of success in ranges to predict high N-NO_3^- (ppm) 20-40cm concentrations. Concluding, explained for the extremely nitrogen dynamics nitrogen and the different variables that affect the N-NO_3^- concentration and distribution in the soil profile, it was impossible to obtain a model that accurately predicts the N-NO_3^- (ppm) 20-40 cm layer content only with the punctual N-NO_3^- (ppm)0-20 cm soil sampling data. However, it was possible to obtain a model to predict the N-NO_3^- 20-40 cm within certain ranges, using the N-NO_3^- (ppm) 0-20 cm soil sampling data.

Key words: Nitrate; Concentration; Profile; Relationship; Model.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ALVAREZ, C.R.; ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. 2001. Predictions of available nitrogen content in soil profile depth using available nitrogen concentration in surface layer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32: 759-769.
2. ARBELECHE, P.; ERNST, O.; HOFFMAN, E. 2010. La agricultura en Uruguay y su evolución. *In*: García Préchac; F. ed. *Intensificación agrícola; oportunidades y amenazas para un país productivo y natural*. Montevideo, UdeLaR. FAGRO/CSIC. pp. 13-27.
3. BAETHGEN, W. E. 1992a. Dinámica del Nitrógeno en sistemas de rotación cultivo pasturas. *Revista INIA. Investigaciones Agronómicas*. 1 (1): 3-25.
4. _____. 1992b. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Montevideo, INIA. 59 p. (Serie Técnica no. 24).
5. BARBIERI, P.; ECHEVERRÍA, H.; SAINZ ROZAS, H. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el Sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 27 (1): 115-125.
6. BONO, A.; ALVAREZ, R. 2007. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. *IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 33: 25-26.
7. BORDOLI, J. M. 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. *In*: Díaz-Rosello, R. ed. *Siembra directa en el Cono Sur*. Montevideo, PROCISUR/IICA. pp. 289-294.
8. BORGHI, E.; WORNIKOV, C. 1998. Evaluación de la capacidad predictiva de distintos indicadores de suelo y planta para el ajuste de la

refertilización nitrogenada en el cultivo de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 50 p.

9. BRUULSEMA, T. 2006. The challenge; a research agenda for managing crop nitrogen for weather. (en línea). In: Symposium Integrating Weather Variability into Nitrogen Recommendations (1^{st.}, 2006, Indianapolis, USA). Managing crop nitrogen for weather. Indianapolis, USA, Soil Science Society of America. cap. 13, pp. 1-4. Consultado oct. 2013. Disponible en [http://nane.ipni.net/ipniweb/region/nane.nsf/0/D75212B39517BE6685257B0C0058BE47/\\$FILE/Managing%20N%20for%20Weather%20copy.pdf](http://nane.ipni.net/ipniweb/region/nane.nsf/0/D75212B39517BE6685257B0C0058BE47/$FILE/Managing%20N%20for%20Weather%20copy.pdf)
10. CABRERA, M. 2007. Mineralización y nitrificación; procesos claves en el ciclo del Nitrógeno. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 34: 1-9.
11. COZZOLI, M.; FIORITI, N.; STUDDERT, G.; DOMINGUEZ, G.; EIZA, M. 2010. Nitrógeno liberado por incubación anaeróbica y fracciones de carbono en macro y microagregados bajo distintos sistemas de cultivos. Ciencia del Suelo. 28 (2): 155-167.
12. ECHEVERRÍA, H.; BERGONZI, R.; FERRARI, J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Ciencia del Suelo. 12: 56-62.
13. _____; SAN MARTIN, N.; BERGONZI, R. 2000. Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. Ciencia del Suelo. 18 (1): 9-16.
14. ERNST, O. 1999. Siembra sin laboreo en cultivos de invierno. Cangüé. no. 15: 20– 23.

15. _____. 2000. Siembra sin laboreo; manejo del período de barbecho. *Cangüé*. no. 20: 19– 21.
16. _____.; BENTANCUR, O. 2004. Efecto del laboreo subsuperficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia* (Montevideo). 8 (1): 29-40.
17. _____. 2011. Cambios en la agricultura, situación actual y demandas de investigación. *In*: Castro, A.; Hoffman, E.; Viega, L. eds. Limitaciones para la productividad de trigo y cebada (CYTED). Montevideo, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo/Facultad de Agronomía. cap. 1, pp. 3-9.
18. FERRERAS, L. A.; COSTA, J.; GARCÍA, F.1999. Temperatura y contenido hídrico del suelo en superficie durante el cultivo de trigo bajo dos sistemas de labranzas. *Ciencia del Suelo*. 17 (2):39-45.
19. GARCIA, F; FABRIZZI, K. 2001. Dinámica del nitrógeno en ecosistemas agrícolas: efectos de la siembra directa. *In*: Díaz-Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, PROCISUR/IICA. pp. 299-322.
20. GARCIA LAMOTHE, A. 2004. Manejo de la fertilización con nitrógeno en trigo y su interacción con otras prácticas agronómicas. Montevideo, INIA. pp. 40-43 (Serie Técnica no. 144).
21. _____.; DIAZ, R.; MORON, A.; SAWCHIK, J.; QUINCKE, A. 2009. El balance de N y la sostenibilidad de los agro ecosistemas, INIA La Estanzuela. *In*: Simposio Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo; Impactos y Propuestas (1º., 2009, Montevideo). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 7-16 (Actividades de Difusión no. 587).

22. _____.; QUINCKE, A. 2011. El análisis del potencial de mineralización de Nitrógeno. Su significado y desarrollo de su aplicación agronómica. In: Jornada de Divulgación (2011, Durazno, Uruguay). Aportes a la zafra de cultivos de invierno. Montevideo, INIA. pp. 43-46 (Actividades de Difusión no. 646).
23. HOFFMAN, E.; ERNST, O.; PERDOMO, C. 1999. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo en función de indicadores objetivos y su efecto en rendimiento y calidad de grano. In: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1^a., 1999, Mercedes, Uruguay). Resúmenes. Mercedes, Mesa Nacional de Trigo. pp 19-27.
24. _____.; PERDOMO, C.; ERNST, O.; BORDOLI, M.; PASTORINI, M.; PONS, C.; BORGHI, E. 2010. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. IPNI. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. no. 46: 13-18.
25. _____.; _____. 2011. Manejo del nitrógeno en cereales de invierno, en un escenario de cambios del sistema agrícola uruguayo. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (2^o., 2011, Paysandú, UY). No se llega, si no se sabe a dónde ir; el abordaje necesario para que el proceso de expansión agrícola madure en Uruguay. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 45-60.
26. _____.; FASSANA, N.; PERDOMO, C. 2013. Manejo del nitrógeno en cereales de invierno, ¿agregando más nos estamos quedando cortos? In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (3^o., 2011, Paysandú, UY). No se llega, si no se sabe a dónde ir; pensar en las causas y no sólo medir las consecuencias. Paysandú, Hemisferio Sur. pp. 51-62.
27. KERSEBAUM, K.; REUTER, H.; LORENZ, K.; WENDROTH, O. 2006. Model- based nitrogen fertilization considering agro-meteorological

data. In: Symposium Integrating Weather Variability into Nitrogen Recommendations (1st., 2006, Indianapolis, USA). Managing crop nitrogen for weather. Indianapolis, USA, Soil Science Society of America. cap. 1, pp. 1-9. Consultado oct. 2013. Disponible en [http://nane.ipni.net/ipniweb/region/nane.nsf/0/D75212B39517BE6685257B0C0058BE47/\\$FILE/Managing%20N%20for%20Weather%20copy.pdf](http://nane.ipni.net/ipniweb/region/nane.nsf/0/D75212B39517BE6685257B0C0058BE47/$FILE/Managing%20N%20for%20Weather%20copy.pdf)

28. MOLFINO, J. H.; CALIFRA, A. 2001. Evaluación del almacenaje natural de las tierras del Uruguay; segunda aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. DSA. RENARE. s.p. Consultado oct. 2013. Disponible en http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files_mf/1376398534Agua_disponible.pdf
29. _____.; _____. 2004. Evaluación del drenaje natural de las tierras del Uruguay; primera aproximación. (en línea). Montevideo, MGAP. DSA. RENARE. s.p. Consultado oct. 2013. Disponible en http://www.cebra.com.uy/renare/wpcontent/files_mf/1376398259Dren_ajenaturaljulio04.pdf
30. MORON, A.; SAWCHIK, J. 1998. Fertilización nitrogenada y potencial de mineralización de nitrógeno. In: Jornada de Cultivos de Invierno (1998, Colonia, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1-3 (Actividades de Difusión no. 159).
31. _____. 2001. El rol de los rastrojos en la fertilidad del suelo. In: Díaz-Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, PROCISUR/IICA. pp. 387-405.
32. _____.; QUINCKE, A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. In: Jornada Técnica Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes, Uruguay).

- Memorias. Montevideo, INIA. pp. 5-9 (Actividades de Difusión no. 605).
33. PERDOMO, C.; CIGANDA, V.; BORGHI, G.; WORNICOV, E. 1998a. Evaluación del test de nitrato en suelo para las condiciones de maíz en Uruguay. *In*: Reunião Brasileira Fertilidade de Solo e Nutricao de Plantas (23^a., 1998, Caxambu, MG, Brasil). Resumos. Caxambu, MG, Brasil, FertBio 98. p. 337.
 34. _____.; BARBAZÁN, M.1998b. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 69 p.
 35. _____.; BORDOLI, J. 1999. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo y su relación con el contenido de proteína en grano- apéndice profundidad de muestreo y contenido de nitrato del suelo. *In*: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1^a., 1999, Mercedes, Uruguay). Resúmenes. Mercedes, Mesa Nacional de Trigo. pp. 41-48.
 36. _____.;HOFFMAN, E.; PONS, C.; BORGHI, E. 2001. Fertilización en cebada cervecera. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. 8 p. (Boletín de Divulgación). Consultado oct. 2013. Disponible en [http://www.fagro.edu.uy/talleres/cebada/Fert/Fert en cebada.html](http://www.fagro.edu.uy/talleres/cebada/Fert/Fert%20en%20cebada.html)
 37. _____.; CARDELLINO, G. 2006. Respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Agrociencia* (Montevideo). 10:63-79.
 38. QUINCKE, A.; SAWCHIK, J. 2011. Manejo y conservación de suelos: Elementos para mejorar el diseño de las rotaciones agrícolas. *In*: Jornadas de Divulgación (2011, Durazno, Uruguay). Aportes a la zafra de cultivos de invierno. Memorias. Montevideo, INIA. pp. 11-13 (Actividades de Difusión no. 646).

39. REUSSI CALVO, N.; ECHEVERRÍA, H. E. 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo; balance hídrico para el sur bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 24(2): 115-122.
40. RIMSKI-KORSAKOV, H.; ALVAREZ, C.; RODRÍGUEZ, M.; LAVADO, R. 2002. Predicción de los nitratos a cosecha de maíz en suelos de la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas*. no. 27: 14-17.
41. SAINZ ROZAS, H., ECHEVERRÍA, H.; STUDDERT, G.; DOMÍNGUEZ, G. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agronomy Journal*. 92:1176-1183.
42. _____,; ECHEVERRIA, H.; ANGELINI, H. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana Argentina. *Ciencia del Suelo*. 29 (1): 29-37.
43. SALVAGLIOTTI, F.; CASSMAN, K. G.; SPECHT, J. E.; WALTERS, D. T.; WEISS, A.; DOBERMANN, A. 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans; a review. (en línea). *Field Crops Research*. 108: 1-13. Consultado oct. 2013. Disponible en <http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1133&context=agronomyfacpub>
44. SAWCHIK, J. 2001. Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo-pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. *In*: Díaz-Rosello, R. ed. *Siembra directa en el Cono Sur*. Montevideo, PROCISUR/IICA. pp. 323-345.
45. SIRI, G.; ERNST, O. 2009. Cambios en el contenido de carbono y nitrógeno del suelo; ¿hacia dónde va el sistema? *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano en Uruguay (1º., 2009, Paysandú, UY). Libro de resúmenes. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 111-123.

46. ST. LUCE, M.; WHALEN, J.; ZIADI, N.; ZEBARTH, B. 2011. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. (en línea). *Advances in Agronomy*. 112 (2): 55-102. Consultado oct. 2013. Disponible en <http://nrsstaff.mcgill.ca/whalen/publications/Advances%20in%20Agronomy%202011%20v112%20pp55-102.pdf>.
47. STUDDERT, G.; CARABACA, L.; ECHEVERRÍA, H. 2000. Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivos. *Ciencia del Suelo*. 18: 17-27.
48. _____.; ECHEVERRÍA, H. 2006. Relación entre el cultivo antecesor y la disponibilidad de nitrógeno para el trigo en la rotación. *Ciencia del Suelo*. 24(1): 89-96.
49. URUGUAY. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000. Montevideo. s.p.
50. _____. _____. _____. 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Montevideo. Apéndice, t.3, 124 p.
51. _____. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE SUELOS. 1988a. Descripción de grupos de suelos CONEAT. Montevideo. 62 p.
52. _____. _____. _____. 1988b. Evaluación de tierras; clasificación de las tierras según su aptitud de uso. Montevideo. 9 p.
53. _____. MINISTERIO DE GANADERÍA AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS. 2010. Anuario estadístico agropecuario 2010. Montevideo. s.p.

54. _____. _____. DIVISIÓN DE SUELOS Y AGUA. 2001. Compendio actualizado de información de suelos del Uruguay. Montevideo, Uruguay. 1 disco compacto.
55. VAN ES, H; KAY, B; MELKONIAN, J; SOGBEDJI. 2006. Nitrogen management for maize in humid regions; case for a dynamic modeling approach. In: Symposium Integrating Weather Variability into Nitrogen Recommendations (1st., 2006, Indianapolis, USA). Managing crop nitrogen for weather. Indianapolis, USA, Soil Science Society of America. cap. 2, pp. 1-10. Consultado oct. 2013. Disponible en [http://nane.ipni.net/ipniweb/region/nane.nsf/0/D75212B39517BE6685257B0C0058BE47/\\$FILE/Managing%20N%20for%20Weather%20copy.pdf](http://nane.ipni.net/ipniweb/region/nane.nsf/0/D75212B39517BE6685257B0C0058BE47/$FILE/Managing%20N%20for%20Weather%20copy.pdf)

9. ANEXOS

Cuadro No. 1: No. de muestras y % según unidad de suelo.

Unidad de Suelo	No. de muestras	%
San Manuel	112	16
San Gabriel-Guaycurú	90	12
Young	58	8
Blanquillo	52	7,5
Cañada Nieto	49	7
Paso Palmar	44	6
Curtina	44	6
Sarandí de Tejera	37	5
La Carolina	31	4
Algorta	30	4
Carpintería	25	3,5
Montecoral	24	3,5
Chapicuy	23	3
Cuchilla Corralito	20	2,5
Itapebí- Tres Arboles	14	2
Bellaco	8	1
Aparicio Saravia	7	1
Puntas de Herrera	3	0,5
Sin datos	54	7,5

Cuadro No. 2: "Zona tradicionalmente agrícola". No. de muestras según unidad de suelo, grupo CONEAT, suelos dominantes, textura, drenaje interno y aptitud de uso.

Unidad de Suelo	CONEAT	Suelo dominante	Textura	Tipo de drenaje interno	Apt. Uso	No. de muestras
San Manuel	10.9	BrET y L	FrAcL	M-AP	A2	112
San Gabriel-Guaycurú	5.4	BrSH	Fr-FrAc	M	AP	78
Young	11.5	BrET	FrAc-FrAcL	M-AP	A2	58
Cañada Nieto	11.8	BrST	FrAcAr	M-AP	A2	49
Paso Palmar	10.1	BrET-VRT y L	FrAcL	M-AP	A2	44
Algorta	9.3	PIDO y M-ADO	ArFr	M	A3	30
Chapicuy	9.6	BrST y L	FrAr	M	A3	23
Cuchilla Corralito	10.15	BrST y L	FrAcAr-FrAr	M	A3	20
La Carolina	10.12	VRL-BrET y L	Fr-FrAc	M	A3	16
Bellaco	10.2	BrET-VRT y L	FrAcL	AP	A2	8

Suelos dominantes 1ra letra- Grupo; Br: Brunosol, V:Vertisol, Pl: Planosol, A: Argisol. 2da letra- Clase y/o Subgrupo; E: Eutrítico, S: Subeutrítico, R: Ruptico, D: Dístrico. 3ra letra- Tipo y/o Subclase; T: Típico, L: Luvico, O: Ocrico, M: Melánico, H: Háplico.

Texturas. ArFr: arenoso-franco, FrAcL: franco-arcillo-limoso, FrAc: franco-arcilloso, FrAr: franco-arenoso, FrAcAr: francoarcilloarenoso, Fr: franco.

Drenaje. M: moderado, M-AP: moderado a algo pobre, AP: algo pobre.

Aptitud. A2: suelos con algunas limitaciones para agricultura, A3: suelos con severas limitaciones, AP: suelos con muy severas limitaciones.

Cuadro No. 3: "Nuevas zonas agrícolas". No. de muestras según unidad de suelo, grupo CONEAT, suelos dominantes, textura, drenaje interno y aptitud de uso.

Unidad de Suelo	CONEAT	Suelo dominante	Textura	Tipo de drenaje interno	Apt. Uso	No. de muestras
Blanquillo	G 10.6 a	BrST y L-ArSO	Fr	M-AP	AP	52
Curtina	1.23	LiEM-BrET	FrAcL	M	AP	44
Sarandí de Tejera	D 10.1	BrET	FrAc	M-AP	A3	37
Carpintería	10.2	VRL-BrE y S LyT	FrAc	AP	A2	25
Montecoral	10.3	BrEL	Fr-FrAc	M-AP	A3	24
La Carolina	10.12	VRL-BrET y L	FrAcL	M-AP	A3	15
Itapebí-Tres Arboles	12.12	VH-BrET	AcL-FrAcL	M-AP	AP	14
San Gabriel-Guaycurú	5.4	BrSH	Fr-FrAc	M	AP	12
Aparicio Saravia	G 10.9	LUT	Fr	M	AP	7
Puntas de Herrera	D 10.3	BrS y L	FrAc	M	AP	3

Suelos dominantes 1ra letra- Grupo; Br: Brunosol, V:Vertisol, Li: Litosol, A: Argisol, L: Luvisol. 2da letra- Clase y/o Subgrupo; E: Eutricto, S: Subeutrico, R: Ruptico, H: Háplico, U: Úmbrico. 3ra letra- Tipo y/o Subclase; T: Típico, L: Lúvico, O: Ócrico, M: Melánico.

Texturas. AcL: arcillo-limoso, FrAcL: franco-arcillo-limoso, FrAc: franco-arcilloso, FrAr: franco-arenoso, FrAcAr: francoarcilloarenoso, Fr: franco.

Drenaje. M: moderado, M-AP: moderado a algo pobre, AP: algo pobre.

Aptitud. A2: suelos con algunas limitaciones para agricultura, A3: suelos con severas limitaciones, AP: suelos con muy severas limitaciones.