

#### **4.4. FASE 4. Modelación del destino de largo plazo del nitrógeno en el suelo, para distintos escenarios hidrológicos, de tasas de aplicación y cultivos y, en general, para las condiciones ambientales del área de influencia del estudio.**

El diagnóstico previo a la ejecución del proyecto, indicaba que gran parte de los efluentes provenientes de los planteles porcinos estaban siendo aplicados al suelo en forma de riego como fertilizante orgánico, sin mayores antecedentes respecto de sus efectos sobre el medio ambiente en el mediano y largo plazo. Específicamente, no se tenía conocimiento de cual era el impacto probable derivado del proceso de lixiviación del nitrógeno sobre las aguas subterráneas. Por consiguiente, resultaba indispensable obtener una relación entre los volúmenes de purín producidos en los planteles porcinos y la superficie de terreno en la cual éstos son aplicados como fertilizante, tomando en consideración variables tales como clima, tipo de suelo y sistemas de cultivos. Esta relación busca establecer el límite entre una aplicación segura, es decir que bajo ciertos criterios, se estima que no daña el medio ambiente en el mediano y largo plazo, y otra que es potencialmente contaminante. Los resultados de este análisis están orientados a la determinación de estándares, que sirvan de información base para la formulación de planes de manejo ambiental, que eventualmente consideren la aplicación de medidas de mitigación, y la formulación de planes de seguimiento ambiental.

Existen básicamente dos métodos, complementarios entre sí, que permiten cuantificar el potencial de lixiviación de nitrógeno en sistemas agrícolas, a saber, la experimentación de campo y el uso de modelos de simulación. El proyecto postuló la utilización de ambos métodos en forma simultánea, utilizando ensayos de campo con dosis establecidas y rotaciones de cultivo específicas y, la utilización de modelos de simulación que permitieran generar una multiplicidad de combinaciones, imposibles de replicar en terreno. Resultados obtenidos de los ensayos de campo y los balances de agua y nitrógeno resultado de 3 años de experimentación, se pueden encontrar en este informe, en la sección correspondiente a la fase 3.

En términos genéricos un modelo es un sistema matemático o físico, el cual obedece a cierto grupo de condiciones específicas, cuyo comportamiento es usado para comprender sistemas

físicos, biológicos o sociales. La simulación ha sido definida como una imitación operacional de un proceso real del mundo o un sistema sobre el tiempo (Bequette, 1998). Tradicionalmente, los ensayos de campo han sido conducidos para obtener información de la dinámica del nitrógeno del suelo, agua y cultivos. Sin embargo, estos estudios generalmente no han sido suficientemente detallados para incluir interacciones entre los factores involucrados y los efectos a largo plazo. Cuando se trata de relacionar en forma inmediata diferentes variables tales como suelo, clima y sistemas de cultivos, la generación de combinaciones es de difícil evaluación, tanto por los costos involucrados, como por el no poder replicar dichas combinaciones múltiples. En tal sentido la utilización de modelos de simulación hace posible evaluar los efectos de diferentes escenarios que combinan los suelos, climas y cultivos, permitiendo evaluar los efectos de esta integración a largo plazo y relacionarlos a diferentes condiciones locales. La información proveniente de los ensayos de campo puede ser usada en conjunto con simulaciones computacionales para obtener un más completo entendimiento del problema en estudio.

Los estudios de modelación de la dinámica del nitrógeno en sistemas suelo-agua-planta ponen énfasis en estimar las entradas de nitrógeno al sistema desde las siguientes fuentes: fertilizantes orgánicos y minerales, fijación biológica, aporte de N por excretas, aporte atmosférico y aporte por residuos vegetales. Las pérdidas consideradas son lixiviación y volatilización a la atmósfera. Esto permite hacer balances que describen la eficiencia de utilización y movimiento de nitrógeno en el sistema.

### **Metodología utilizada**

#### **Modelo de simulación CropSyst.**

El estudio se llevó a cabo mediante la utilización de un modelo de simulación de productividad de cultivos, denominado CropSyst (Stöckle y Nelson, 1994), el que utiliza, entre otros, información de clima, suelo, características del cultivo y manejo agrícola. CropSyst es un modelo continuo, plurianual, con intervalo de ejecución diario y multicultivo. Simula los balances de

agua y nitrógeno en el suelo, la fenología del cultivo, la absorción de agua y nitrógeno, la interceptación de radiación por la cubierta vegetal, el crecimiento y desarrollo del área foliar, la producción de biomasa, el rendimiento final, así como la producción y descomposición de residuos de cultivos y la erosión del suelo. El modelo incorpora los efectos sobre estos procesos según las condiciones climáticas, tipos de suelo y características del cultivo, incluyendo la posibilidad de realizar análisis de impacto ambiental (erosión, lixiviación y cambio climático).

El modelo CropSyst y sus componentes han sido probados y validados para trabajar con un amplio rango de condiciones alrededor del mundo y en Chile. Debido a su habilidad de integrar diferentes variables y condiciones de clima y suelo para producir simulaciones reales de crecimiento de cultivo, producción y lixiviación de nitrógeno. Es así, que el modelo fue encontrado apropiado para evaluar el efecto en el largo plazo, de las aplicaciones de purines de cerdo al suelo y sus equivalencias utilizando fertilización mineral.

La integración de diferentes usuarios en los procesos de evaluación y en el mejoramiento del modelo han sido importante en el desarrollo de CropSyst. Los autores del modelo han desarrollado una interfase estable y amigable, adecuada documentación, política de distribución libre, establecimiento de una página en Internet para la obtención y envío de información y un boletín electrónico para los usuarios. El modelo y sus referencias se encuentran en el Departamento de Ingeniería de Sistemas Biológicos de Washington State University, de los Estados Unidos ([www.bsyse.wsu.edu/cropsyst/](http://www.bsyse.wsu.edu/cropsyst/)).

El modelo de simulación, dado que su aplicación es de tipo sitio-específico, requiere para su funcionamiento, información de clima, suelos, cultivos, localidad, prácticas culturales y manejo. Esta información es provista a través de archivos de texto con extensiones definidas de acuerdo al tipo de variable.

## **Archivos de localidad, suelo y clima.**

### ***Localidad.***

Los archivos con antecedentes de la localidad contienen información específica del lugar en estudio. Los datos de latitud y su relación al ángulo de elevación solar y variables ambientales como viento y temperatura son determinantes para que el modelo desarrolle los balances de energía en el sistema suelo-planta-atmósfera. Con esta información el modelo puede estimar, entre otros, evapotranspiración, evaporación de agua desde el suelo y cultivos, fotosíntesis, producción de biomasa y uso del agua. La tabla 4.1, indica el orden de las variables climáticas y sus unidades.

**Tabla 4.1. Variables Climáticas utilizadas por el modelo CropSyst.**

<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>
Año	Días del año
Precipitación	mm
Temperatura Máxima	°C
Temperatura Mínima	°C
Radiación Solar	MJm <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
Humedad Relativa Máxima	%
Humedad Relativa Mínima	%
Velocidad del viento	ms <sup>-1</sup>

### ***Clima.***

El modelo utiliza registros diarios de temperatura máxima y mínima, radiación solar, precipitación, viento y humedad relativa.

Dado que el estudio fue desarrollado para estimar, en el largo plazo (50 años), el destino del N en el suelo, no fue posible utilizar registros históricos de tan larga data de las citadas variables climáticas, por lo tanto se utilizó un generador climático, CLIMGEN, para obtener registros nuevos de una secuencia más larga de registros que los históricos disponibles.

Los generadores de clima son programas computacionales, que mediante la utilización de registros climáticos diarios, generan nuevos registros con propiedades estadísticas similares a los datos reales. Para generar adecuadamente los registros climáticos, el generador requiere de registros históricos de buena calidad y de una extensión mínima. Por ejemplo, para generar precipitación, se requieren al menos 25 años de registros históricos; para radiación solar, entre 7 a 10 años. Debido a esta limitante de registros reales por localidad, el estudio se dividió sólo en tres macro regiones, representadas por tres localidades contrastantes en términos climáticos y que contaban con la calidad y extensión de los registros de clima requeridos por el generador. La tabla 4.2 muestra las localidades consideradas.

**Tabla 4.2. Área de aplicación estudio y origen de los registros climáticos históricos.**

<b>Localidad</b>	<b>Macro-región</b>
Santiago	Centro
Chillán	Centro-Sur
Temuco	Sur

CLIMGEN generó registros climáticos diarios para las variables indicadas por un período de 60 años para cada macro región. Esta actividad fue directamente realizada por el experto internacional Dr. Claudio Stockle, de la WSU, el cual apoyó el proyecto en esta fase. Para lo anterior, se localizaron datos de 25 años de INIA-La Platina perteneciente a la macro región Centro y registros de 10 y 20 años procedentes del Centro Regional de Investigación INIA-Quilamapu, la Universidad de Concepción e INIA Carillanca, que representaron la macro región Centro Sur y Sur.

#### ***Archivos de suelo.***

Las propiedades de los suelos asociados a cada macro región donde se encuentran emplazados los planteles porcinos, fueron obtenidas a partir de información bibliográfica (CIREN, 1999). La información recopilada correspondió a las características físico-hídricas y químicas de las series de suelo de cada una de las localidades en estudio.

Las series de suelo seleccionadas para cada macro región fueron elegidas de acuerdo a parámetros de representatividad y cercanía a los planteles porcinos existentes o su área de influencia. Para cada macro región se eligieron 3 series con características contrastantes entre sí, con el propósito de comparar la respuesta a los procesos en estudio.

- **Macro región centro:** Se utilizaron los datos de las series de suelo Codigua, Lo Vásquez y Maipo. Estos presentan perfiles de profundidad variable entre 70, 78 y 120 centímetros. La serie Codigua es un suelo que presenta en su primer horizonte textura Franco Arenoso fino, delgado, bien drenado para luego predominar horizontes con texturas arenosas. La serie Lo Vásquez, presenta en su primer horizonte textura Franco arenosa, para predominar luego horizontes con textura Franco Arcilla Arenoso. La serie Maipo tiene predominio de texturas Franco arenosas. Las tablas siguientes muestran algunas características físico hídricas de los suelos asociados a la macro región Centro.

**Tabla 4.3. Propiedades físico hídricas y químicas de la serie de suelo Codigua.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes			
	I	II	III	IV
Profundidad (cm)	0-22	22-40	40-55	55-70
Textura	Fa	Fa	FA	Fa
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1,7	1,6	1,5	1,8
Capacidad de Campo	0,357	0,27	0,285	0,26
Punto Marchites Permanente	0,187	0,144	0,152	0,16
Materia Orgánica (%)	4,1	1,9	2,6	5,2
pH H <sub>2</sub> O 1:1	7,7	6,6	8	6,2
CIC (meq/100g)	20,6	13,8	17,9	17

Fuente: CIREN, 1999

**Tabla 4.4. Propiedades físico hídricas y químicas de la serie de suelo Lo Vásquez.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes				
	I	II	III	IV	V
Profundidad (cm)	0-18	18-32	32-43	43-57	57-78
Textura	Fa	FAa	FAa	FAa	Fa
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8
Capacidad de Campo	0.336	0.432	0.396	0.396	0.36
Punto de Marchitez Permanente	0.144	0.162	0.216	0.216	0.198
Materia Orgánica (%)	1.9	0.9	0.7	0.3	0.3
pH H <sub>2</sub> O 1:1	6.6	6.7	6.7	6.7	6.7
CIC (meq/100g)	13.8	21.6	22.4	23.9	24.8

Fuente: CIREN, 1999.

**Tabla 4.5. Propiedades físico hídricas y químicas de la serie de suelo Maipo.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes					
	I	II	III	IV	V	VI
Profundidad (cm)	0-16	16-33	33-50	50-74	74-92	92-120
Textura	FA	F	FA	FA	FA	F
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,6	1,7	1,9	1,9	1,8
Capacidad de Campo	0,315	0,352	0,408	0,437	0,513	0,3956
Punto Marchitez Permanente	0,195	0,224	0,272	0,304	0,342	0,234
Materia Orgánica (%)	2,6	2,1	2,1	1,4	0,7	0,5
pH H <sub>2</sub> O 1:1	8	8	7,8	7,7	7,7	7,6
CIC (meq/100g)	17,9	18,1	30,5	28,7	26,4	26,3

Fuente: CIREN, 1999.

- **Macro región centro-sur:** Se utilizaron datos de las series de suelo Lontué, Quilmén y Talcahue. Estos presentan perfiles de profundidad variables entre 55, 120 y 110 centímetros. La serie Lontué, presenta solo dos horizontes con textura franco arenosa. La serie Quilmén, presenta textura franco limosa la que varía en profundidad a textura arenosa. El suelo Talcahue es de textura franco en superficie y de textura franco limosa en profundidad. Las tablas siguientes indican algunas características físico hídricas y químicas de los suelos asociados a la macro región Centro Sur.

**Tabla 4.6. Propiedades físico hídricas y químicas de la serie de suelo serie Lontué.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes	
	I	II
Profundidad (cm)	0-22	22-55
Textura	Fa	Fa
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,8
Capacidad de Campo	0,414	0,396
Punto Marchitez Permanente	0,187	0,144
Materia Orgánica (%)	5,2	4,7
pH H <sub>2</sub> O 1:1	6,2	6,5
CIC (meq/100g)	17	22,8

Fuente: CIREN, 1999.

**Tabla 4.7. Propiedades físico hídricas y químicas de la serie de suelo Quilmén.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes				
	I	II	III	IV	V
Profundidad (cm)	0-13	13-37	37-65	65-100	100-120
Textura	FL	FL	FAL	A	A
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,63	1,6	1,7	1,65
Capacidad de Campo	0,47	0,47	0,49	0,67	0,44
Punto Marchitez Permanente	0,23	0,299	0,33	0,44	0,43
Materia Orgánica (%)	3,32	1	0,69	0,77	0,76
pH H <sub>2</sub> O 1:1	5,81	6,45	7,13	7,17	7,11
CIC (meq/100g)	-	-	-	-	-

Fuente: CIREN, 1999.

**Tabla 4.8: Propiedades físico hídricas y químicas de la serie de suelo Talcarehue.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes			
	I	II	III	IV
Profundidad (cm)	0-15	15-50	50-72	72-110
Textura	F	FL	FL	F
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1,61	1,47	1,47	1,63
Capacidad de Campo	0,386	0,382	0,382	0,374
Punto Marchites Permanente	0,242	0,22	0,382	0,423
Materia Orgánica (%)	2,51	1,86	2,12	1,22
pH H <sub>2</sub> O 1:1	6	5,7	5,8	6,7
CIC (meq/100g)	15,8	17,6	21,6	22,1

Fuente: CIREN, 1999.



- **Macro región sur.** Se utilizaron los datos de las series de suelo Temuco, Victoria y Mininco. Estos presentan perfiles de profundidad variable entre 64, 55 y 140 cm. La serie Temuco es un suelo que presenta en sus primeros horizontes textura franco arcillo limoso. La serie Victoria presenta en sus horizontes texturas franco y franco arcillo limoso. La serie Mininco tiene predominio de texturas arcillosas. Las tablas siguientes muestran algunas características físico hídricas de los suelos asociados a la macro región Sur.

**Tabla 4.9. Propiedades físicas, químicas y morfológicas de la serie Temuco.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes		
	I	II	III
Profundidad (cm)	0-30	30-50	50-64
Textura	FAL	FAL	FL
Da (g/cm <sup>3</sup> )	0,9	0,8	0,7
Capacidad de Campo	0,408	0,495	0,429
Punto Marchitez Permanente	0,8	0,8	0,7
Materia Orgánica (%)	15,3	6,3	4,1
pH H <sub>2</sub> O 1:1	5,7	6,4	6,9
CIC (meq/100g)	29,2	27,1	2

Fuente: CIREN, 1999.

**Tabla 4.10. Propiedades físicas, químicas y morfológicas de la serie Victoria.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes		
	I	II	III
Profundidad (cm)	0-14	14-28	28-55
Textura	F	FAL	F- FAL
Da (g/cm <sup>3</sup> )	0,8	0,8	0,7
Capacidad de Campo	0,501	0,444	0,395
Punto Marchitez Permanente	0,257	0,309	0,216
Materia Orgánica (%)	15,3	6,3	4,1
pH H <sub>2</sub> O 1:1	5,7	6,4	6,9
CIC (meq/100g)	29,2	27,1	2

Fuente: CIREN, 1999.

**Tabla 4.11. Propiedades físicas, químicas y morfológicas de la serie Mininco.**

Características físico hídricas y químicas	Horizontes			
	I	II	III	IV
Profundidad (cm)	0-26	26-58	58-93	93-140
Textura	A	A	A	F
Da (g/cm <sup>3</sup> )	1	1	0,9	1,2
Capacidad de Campo	0,27	0,361	0,384	0,5
Punto Marchitez Permanente	0,187	0,144	0,152	0,16
Materia Orgánica (%)	14,8	13,05	5,65	3,9
pH H <sub>2</sub> O 1:1	5,5	5,6	5,8	5,8
CIC (meq/100g)	21,2	20,8	24,4	24,6

Fuente: CIREN, 1999.

## **Cultivos y rotación de cultivos.**

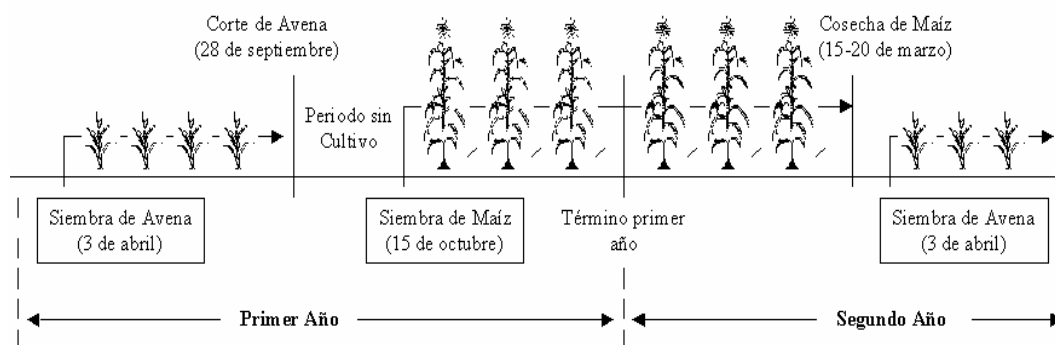
### **- Archivos de cultivo.**

Los cultivos seleccionados para realizar las modelaciones fueron maíz, avena y alfalfa. Estas especies son reconocidas por el modelo a través de un archivo de cultivo, el que contiene parámetros específicos de crecimiento, morfología y fenología, entre otros, para cada uno en particular. La obtención de estos parámetros se obtuvo a través de bibliografía, ensayos de campo y, otros fueron extraídos directamente del manual de usuario del modelo.

### **- Archivos de rotación.**

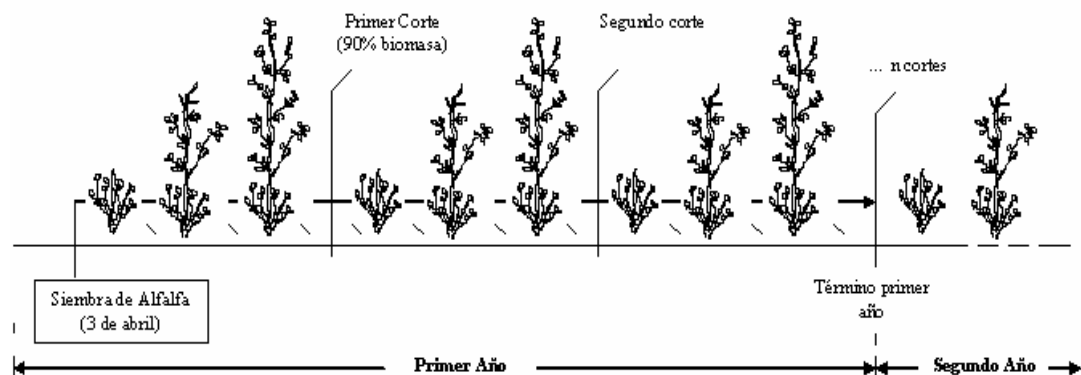
Las simulaciones contemplaron tres rotaciones continuas: maíz-avena, alfalfa y barbecho continuo o suelo desnudo. Las dos primeras fueron seleccionadas con el objetivo de maximizar la extracción de nitrógeno desde el suelo. La simulación de suelo desnudo o barbecho tuvo el propósito de ser un referente con respecto al comportamiento del nitrógeno aplicado en suelos desprovistos de cultivos. En los ensayos de campo desarrollados por el proyecto (ver sección fase 3), la lógica fue similar, evaluándose maíz-avena; ballica y suelo desnudo.

La simulación de rotación de avena-maíz comenzó con avena por un período aproximado de seis meses, para continuar la rotación con Maíz por un período de 5 meses. Los ciclos fenológicos de los cultivos variaron dependiendo de las condiciones de temperatura de la macro región en estudio. La figura 4.1 presenta el esquema de la rotación maíz-avena, con fechas aproximadas de siembra, corte y cosecha, utilizadas en el estudio.



**Figura 4.1. Esquema de rotación maíz-avena.**

La simulación de siembra de alfalfa fue realizada durante los primeros días de abril del año 1. Debido a que la alfalfa es un cultivo perenne, los cortes simulados se efectuaron de acuerdo a su biomasa acumulada, lo que se realizó manteniendo un rango de corte mínimo y máximo que varió entre los 1.000 y los 6.000 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. Por cada corte simulado se removió un porcentaje del 90% de la biomasa. La figura 4.2 presenta el esquema de manejo de la alfalfa utilizado para la simulación.



**Figura 4.2.** Esquema de manejo de la alfalfa.

### ***Riego y tasas de fertilización.***

El manejo del nitrógeno se reflejó a través de diferentes tasas de aplicación en forma de purín, como fertilizante orgánico. Así, los archivos de manejo incluyeron riego y tasas anuales de aplicación continua, para rotaciones de maíz, alfalfa y suelo desnudo.

En la tabla 4.12 se identifican las tasas de aplicación de nitrógeno utilizadas en las simulaciones. Estas tasas fueron las usadas preliminarmente, dado que una vez obtenidos los resultados, para obtener mejores conclusiones, se desarrollaron modelaciones con 4 tasas adicionales, además de simular aplicaciones continuas durante el año, como también sólo en la época primavera-verano, además de simulaciones empleando nitrógeno proveniente de fertilizantes minerales.

**Tabla 4.12.** Tasas de aplicación de nitrógeno en forma de purines para diferentes cultivos.

Rotación	Tasa de Aplicación	N-orgánico	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Maíz, Alfalfa y Barbecho	2.500 kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	875	1625
	1.600 kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	560	1040
	700 kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	245	455
	400 kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	140	260

Las simulaciones de los diferentes escenarios definidos en el estudio se realizaron con la opción de riego automático que el modelo provee. El riego automático que simula CropSyst, aplica agua de riego suficiente y en los momentos necesarios como para mantener el contenido de agua en el perfil del suelo a un nivel en el cual siempre exista agua fácilmente disponible para ser extraída por la planta. Sin embargo, para simular las condiciones reales de riego practicadas por los agricultores, donde se aplica una mayor cantidad de agua de riego que la necesaria por los cultivos, se simuló riego automático con un 40% de excedencia. Este excedente de agua corresponde aproximadamente a la condición de riego por surcos, con una eficiencia media. La tabla 4.13 señala las dosis de riego para los sistemas de manejo simulados para un promedio de 10 años.

**Tabla 4.13. Manejo de riego para Maíz y Alfalfa.**

Variables	Maíz	Alfalfa
Número de Riegos	11	17
Cantidad por Riego (mm)	72,2	66,5
Total anual (mm)	763,32	1115,54
Máximo Aplicado (mm)	99,09	78,76
Mínimo Aplicado (mm)	64,78	55,16

Nota. Promedio de diez años de simulación.

### **Validación.**

La validación del modelo se realizó, comparando datos de simulaciones con información real recolectada desde ensayos de campo y en su defecto, con bibliografía nacional.

La validación se concentró en lograr que el modelo represente lo más fielmente la realidad de las tres macro regiones, en producción y acumulación de biomasa, rendimiento final de los cultivos y evapotranspiración, este último es el componente principal del balance hídrico y que incide significativamente en el balance de nitrógeno.

Se utilizó un índice cuantitativo para el análisis del comportamiento del modelo y su validación, que consistió en efectuar comparaciones gráficas entre los datos simulados versus los datos

reales, permitiendo validar las capacidades mecánicas del modelo. No se consideraron errores de medición y otras fuentes de variación propios de los ensayos de campo utilizados como fuente de información.

Las fuentes de información utilizadas para la validación consistieron en trabajos de tesis, publicaciones, informes y entrevistas personales realizadas en la Universidad de Chile y Universidad de Concepción, como también información solicitada en los Centros Regionales de Investigación del INIA La Platina, Quilamapu y Carillanca.

La información recopilada presentó una significativa variabilidad espacial debido a la insuficiencia de datos, por ello algunos valores de los parámetros de cultivo fueron ajustados. De esta manera, el modelo fue capaz de integrar los efectos que tuvieron sobre los cultivos, la aplicación de nitrógeno, el riego y las condiciones climáticas, lo que permitió validar aceptablemente el modelo.

## **Resultados y Discusión**

### **Validación.**

El modelo fue validado para biomasa y estados de desarrollo del cultivo y para uno de los componentes principales del balance hídrico, la evapotranspiración. La validación fue desarrollada para cada macro zona establecida en el estudio, mediante la utilización de registros de evapotranspiración potencial y resultados experimentales, de rendimiento en grano y producción de biomasa para los cultivos de maíz, avena y alfalfa. La dificultad de contar con datos de ensayos de campos actuales que reflejaran los verdaderos rendimientos que hoy en día alcanzan los cultivos de alfalfa y particularmente maíz, fue una limitante que se mitigó por la accesibilidad de contar con resultados de los ensayos realizados en Lonquén y Pichidegua, por el

proyecto. A continuación se presentan los resultados de la validación del modelo por cada cultivo.

## **Biomasa y rendimientos de cultivo.**

### ***Maíz.***

El modelo se validó para maíz utilizando información proporcionada por ensayos de campo y literatura, para las macro regiones centro, centro sur y sur. Las simulaciones se desarrollaron utilizando registros climáticos reales, características de suelo de los sitios, y en general, el mismo manejo desarrollado en los ensayos recopilados.

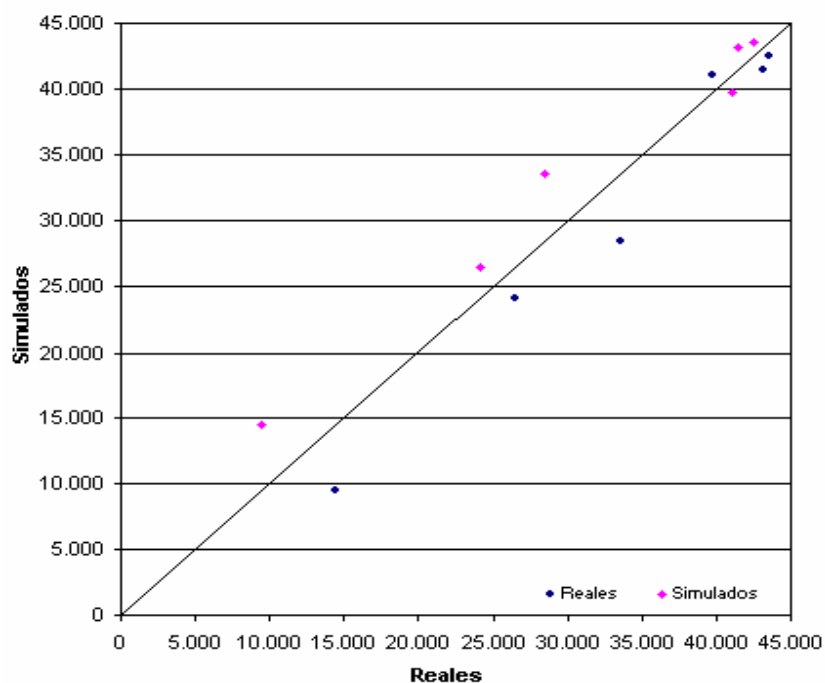
- **Macro región centro:** Se utilizaron características de las series de suelo Codigua y Lo Vázquez (CIREN, 1999), registros climáticos diarios de los años 2002-2003 de las localidades de Lonquén y Pichidegua (INIA, 2003) y datos de rendimiento y biomasa de maíz para la temporada 2002-2003 (INIA, 2003), en la validación de estos escenarios. La tabla 4.14 y las figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 muestran los valores simulados y experimentales de producción de biomasa de maíz respectivamente, para las localidades de Lonquén y Pichidegua.

**Tabla 4.14. Acumulación de biomasa de maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), reales y simulados para las localidades de Lonquén (R.M.) y Pichidegua (VI región).**

<b>Lonquén. Temporada 2002-2003. Materia Seca en <math>\text{kg ha}^{-1}</math>.</b>						
<b>Fecha</b>	<b>24-Dic-02</b>	<b>22-Ene-03</b>	<b>09-Feb-03</b>	<b>26-Feb-03</b>	<b>18-Mar-03</b>	<b>22-Abr-03</b>
<b>Simulado</b>	14.423	26.531	33.565	39.720	43.099	43.588
<b>*Reales</b>	9.426	24.142	28.477	41.099	41.420	42.507
<b>Pichidegua. Temporada 2002-2003. Materia Seca en <math>\text{kg ha}^{-1}</math>.</b>						
<b>Fecha</b>	<b>27-Dic-02</b>	<b>17-Ene-03</b>	<b>31-Ene-03</b>	<b>21-Feb-03</b>	<b>20-Mar-03</b>	<b>24-Abr-03</b>
<b>Simulado</b>	8.195	15.917	20.932	27.825	35.898	39.533
<b>*Reales</b>	9.051	16.825	22.193	27.305	36.070	40.098

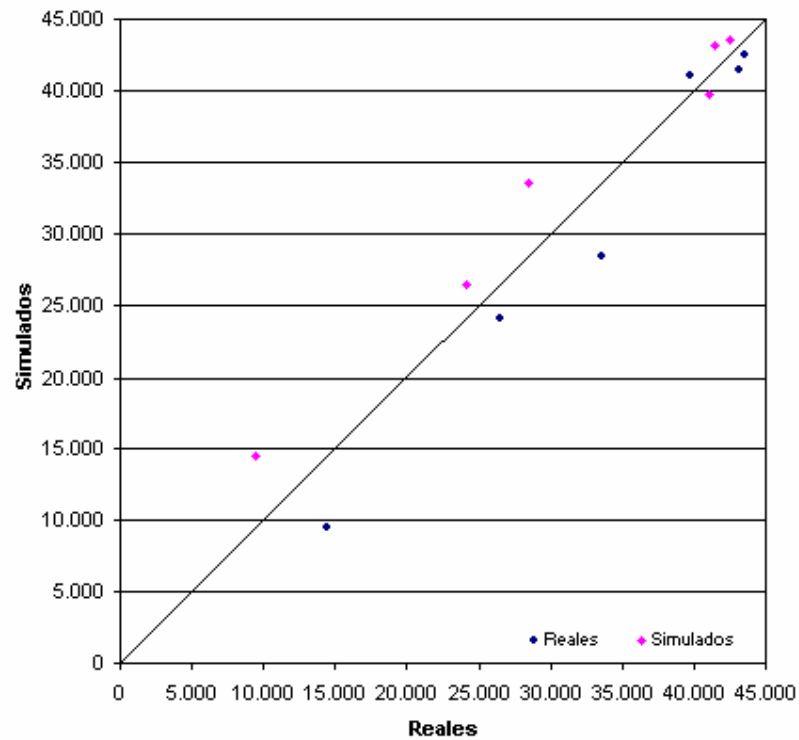
Fuente (\*): INIA, 2003.

Las figuras 4.3 y 4.4, presentan gráficos de comparación (1:1) que permiten visualizar la correspondencia entre los valores simulados y los observados.



**Figura 4.3.** Comparación de valores de materia seca simulados y reales (kg ha<sup>-1</sup>). Lonquén (R.M.).

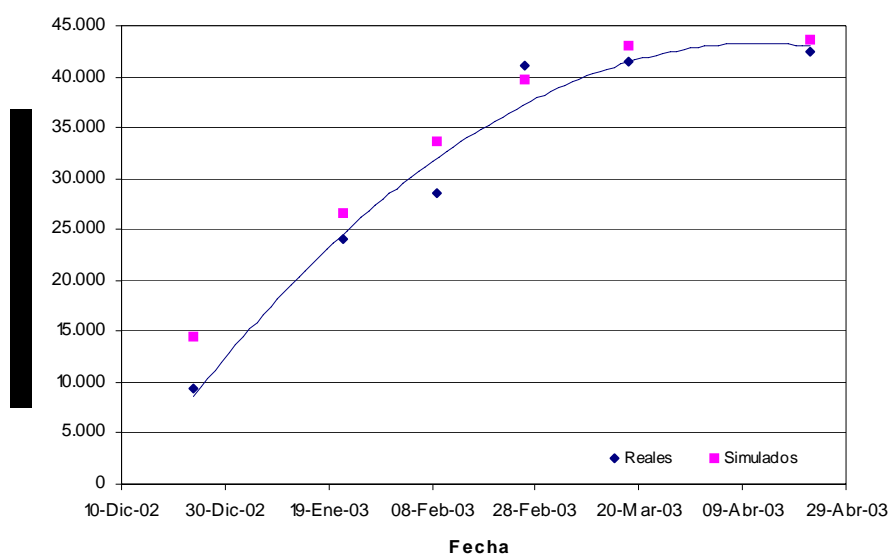




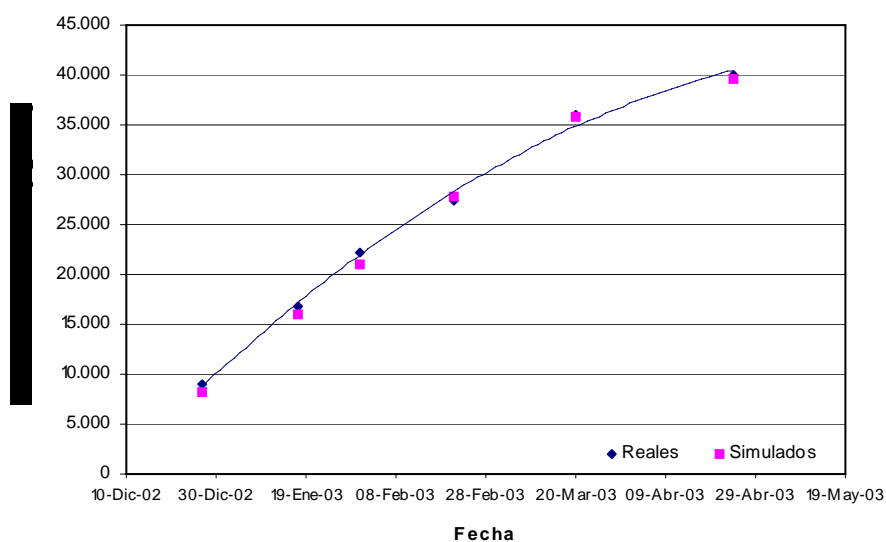
**Figura 4.4.** Comparación de valores de materia seca simulados y reales ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). Pichidegua (VI región).

La información representada en las figuras 4.3 y 4.4, permite deducir que el modelo estimó razonablemente bien la producción de biomasa de maíz para ambas localidades, con una ligera sobreestimación en las etapas iniciales del cultivo, en la localidad de Lonquén. Sin embargo, la producción de biomasa total fue razonablemente bien estimada.

Para analizar el comportamiento dinámico del modelo, se muestran en las figuras 4.5 y 4.6, las curvas de acumulación de biomasa a lo largo del periodo de desarrollo del maíz, lo que además, permite realizar una validación más detallada.



**Figura 4.5.** Acumulación de biomasa de maíz en el tiempo de valores simulados y reales. Lonquén (R.M).



**Figura 4.6.** Acumulación de biomasa de maíz en el tiempo de valores simulados y reales. Pichidegua (VI región).

De las figuras 4.5 y 4.6 es posible observar que el modelo simuló adecuadamente la tendencia de acumulación de biomasa de los resultados experimentales de la macro región centro, sobre todo en el periodo comprendido entre el inicio de llenado de grano y la madurez del cultivo de maíz,

por lo que se puede inferir que el modelo se ajustó acertadamente al desarrollo del maíz para la macro región centro.

- **Macro región centro sur:** Para la validación de este escenario se utilizaron características de la serie de suelo Quilmén (CIREN, 1999), registros climáticos de los años 2001-2002 de la localidad de Humán (INIA, 2002) e información experimental de acumulación de biomasa de maíz para la temporada 2001-2002 en la localidad de Humán (Convenio Bioleche-INIA, 2002). La tabla 4.15 y las figuras 4.7 y 4.8 muestran los valores y el comportamiento de los valores simulados y reales de producción de biomasa de maíz para la localidad de Humán (Provincia de Los Angeles, VIII región. Lat.37° 26` S; 72° 22`O).

**Tabla 4.15. Acumulación de biomasa de maíz (kg ha<sup>-1</sup>) para localidad de Humán.**

Humán. Temporada 2001-2002. Materia Seca de Maíz (kg ha <sup>-1</sup> ).								
Fecha	10-Dic-01	28-Dic-01	16-Ene-02	23-Ene-02	04-Feb-02	21-Feb-02	10-Mar-02	25-Mar-02
<b>Simulados</b>	104	4.336	11.230	13.277	17.133	23.074	27.454	30.602
<b>* Reales</b>	273	1.096	5.084	14.432	22.386	26.600	29.520	31.980

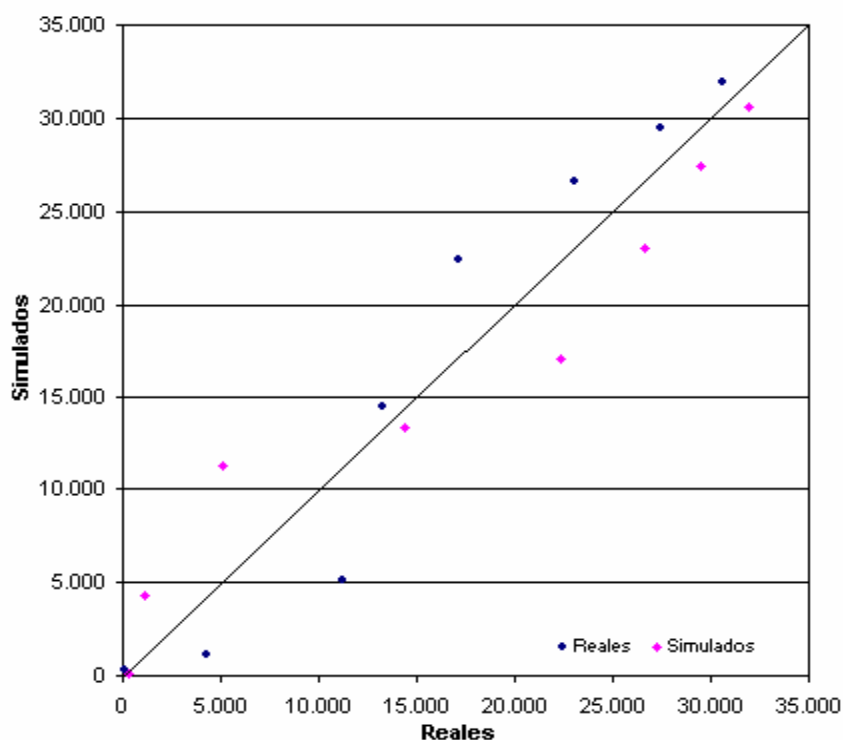
Fuente (\*): Convenio Bioleche-INIA, 2002.

La figura 4.7, compara los resultados obtenidos por el modelo y los reportados en el Centro Experimental Humán-INIA.

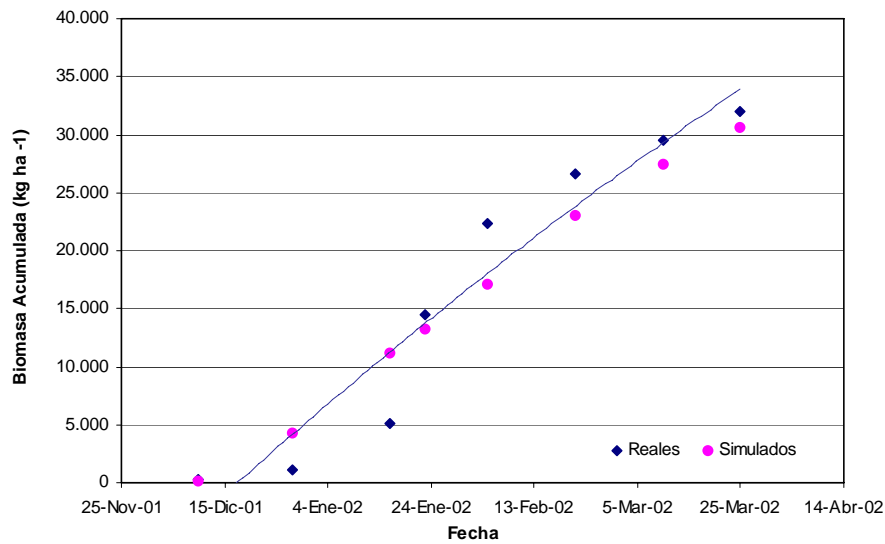
Se puede observar que el modelo, bajo estas condiciones, tendió a sobreestimar la producción de biomasa durante las etapas iniciales de desarrollo, para luego, desde aproximadamente la etapa de floración del cultivo, ajustarse gradualmente hasta lograr rendimientos finales simulados muy cercanos a los experimentales.

Para analizar más en detalle la producción de biomasa, la figura 4.8 muestra la acumulación de biomasa en el tiempo, con lo que se logra apreciar si el modelo responde a la dinámica de desarrollo del cultivo.

La figura 4.8 muestra que la tendencia de ambas curvas de acumulación de biomasa es similar, sin embargo, también se observa la sobreestimación de la producción de biomasa durante las primeras etapas de desarrollo, ajustándose finalmente a la producción de biomasa observada. Por lo tanto, para estas condiciones, se observa que el modelo responde con una moderada sobreestimación en las primeras etapas fonológicas del maíz, lo que no fue determinante en la producción final de biomasa.



**Figura 4.7.** Comparación de valores de biomasa simulados y reales. Humán (VIII región).



**Figura 4.8.** Acumulación de biomasa de maíz en el tiempo de maíz de valores simulados y reales. Humán (VIII región).

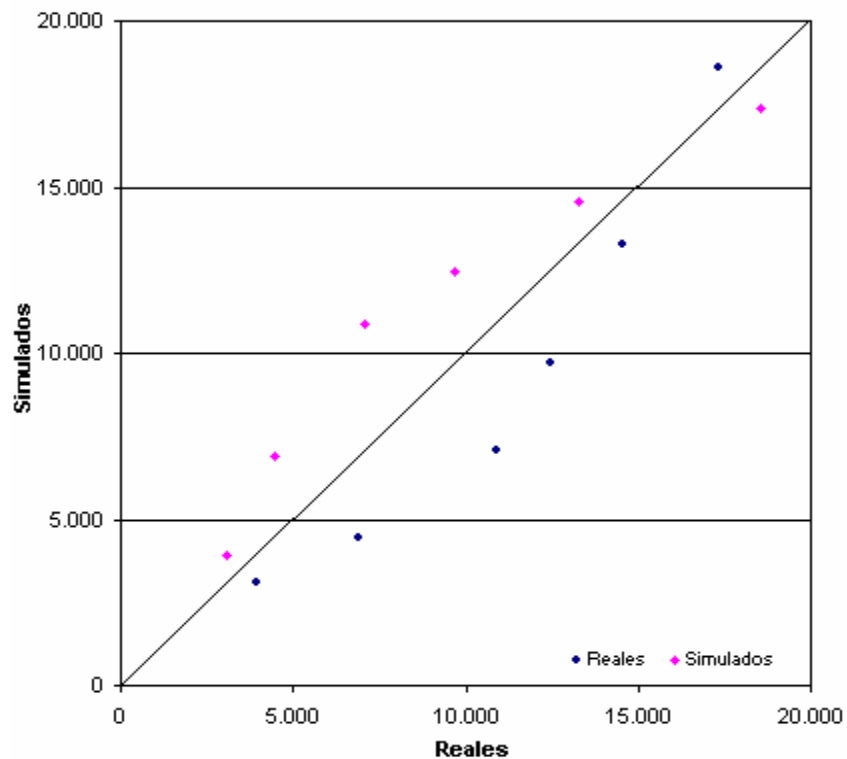
- **Macro región sur:** Se utilizaron características de la serie de suelo Minínco (CIREN, 1999), registros climáticos diarios de la estación meteorológica de INIA-Carillanca de los años 1995-1996 y datos de producción de maíz para la localidad de Carillanca en la temporada 1995-1996 (Romero O, et al. 1996), para la validación de este escenario. La tabla 4.16 y las figuras 4.9 y 4.10 muestran los valores simulados y reales de producción de biomasa de maíz para la localidad de Carillanca (IX región).

**Tabla 4.16.** Acumulación de biomasa de maíz (kg ha<sup>-1</sup>) para la localidad de Carillanca.

Carillanca. Temporada 1995-1996. Materia Seca (kg ha <sup>-1</sup> ).						
Fecha	13-Ene-96	29-Ene-96	19-Feb-96	28-Feb-96	13-Mar-96	15-Abr-96
Simulados	2.579	5.587	10.306	12.198	14.815	17.993
Reales	3.084	4.465	7.079	9.696	13.279	18.575

Fuente: Romero O., et al. 1996.

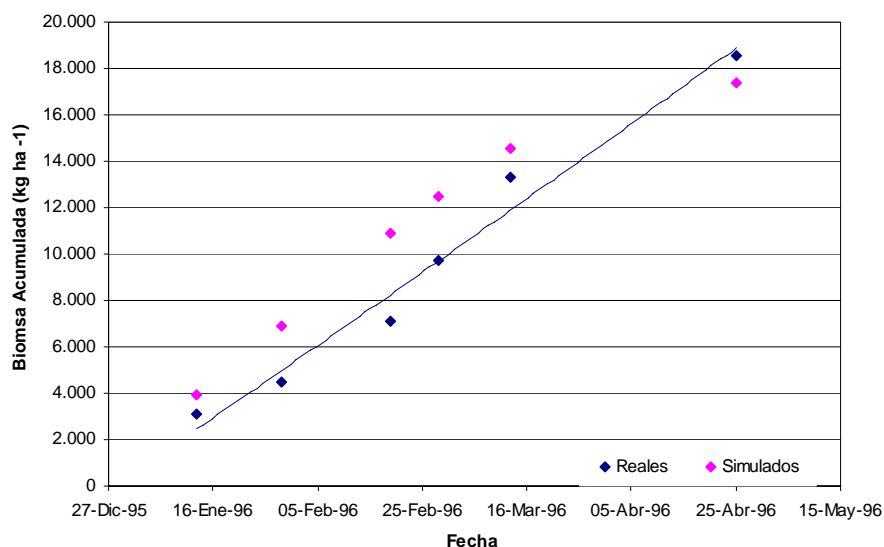
La figura 4.9 muestra la correspondencia entre los valores de biomasa simulados por el modelo y los observados.



**Figura 4.9.** Comparación valores de materia seca simulados y reales. Carillanca (IX región).

Se observa que el modelo sobrestimó moderadamente la producción de biomasa durante las etapas intermedias de desarrollo del cultivo, hasta antes de la etapa de floración. Desde floración a cosecha, los resultados simulados se ajustan gradualmente a los datos observados.

Una evaluación más detallada de los resultados obtenidos se presenta en la figura 4.10, que presenta las curvas de acumulación de biomasa a lo largo del periodo de desarrollo del maíz.



**Figura 4.10.** Acumulación de biomasa de maíz en el tiempo de valores simulados y reales. Carillanca (IX región).

Se observa de la figura 4.10 que el modelo sobreestimó moderadamente la producción de biomasa en etapas de desarrollo intermedias del cultivo, para luego, al momento de la cosecha, finalizar con valores de biomasa más ajustados a los experimentales.

De la información presentada es posible concluir que el modelo predijo razonablemente bien la fenología y la producción de biomasa de maíz para las tres macro regiones en estudio. Para las macro regiones centro sur y sur el modelo sobreestimó moderadamente la producción de biomasa en las primeras etapas del cultivo, hasta la etapa de floración. De ahí en adelante, los valores de biomasa simulados son muy similares a los reportados. Dada la escasez de información disponible para validar, en general, el modelo respondió adecuadamente a los objetivos del estudio. Aplicaciones donde sea necesario un ajuste más detallado requerirá mayor cantidad de información experimental, la que no está disponible en Chile.

La Tabla 4.17 muestra un resumen de los parámetros de crecimiento, morfología y fenología del cultivo de maíz utilizadas por CropSyst, para cada macro región. Estos fueron los parámetros usados posteriormente para simular los escenarios del presente estudio.

**Tabla 4.17. Parámetros de crecimiento, morfología y fenología del cultivo de maíz por macro región.**

Macro Región	Centro	Centro sur	Sur
<b>Parámetros de Crecimiento</b>			
Luz para establecer conversión de biomasa (g/MJ)	4	6	4
Potencial de proporción real que limita la raíz.	0,5	0,5	0,5
Temperatura media diaria óptima de crecimiento (°C)	15	14	14
<b>Parámetros de Morfología</b>			
Área foliar específica (m <sup>2</sup> /kg)	20	23	15
Coefficiente de partición tallo/hoja (1-10)	3	2	3
Duración foliar (días grado)	950	950	900
Coefficiente de extinción para la radiación solar (0-1)	0,6	0,75	0,5
Coefficiente de evapotranspiración de la hoja del cultivo	1,25	1,25	1,25
<b>Parámetros de Fenología</b>			
Emergencia (días grado)	100	100	120
Índice de Área Foliar Máxima (días grado)	900	800	900
Inicio Floración (días grado)	1200	950	950
Inicio llenado grano (días grado)	1300	1000	1050
Madurez fisiológica (días grado)	1600	1250	1150
Temperatura base (°C)	10	8	8
Temperatura corte (°C)	25	25	25

### *Alfalfa.*

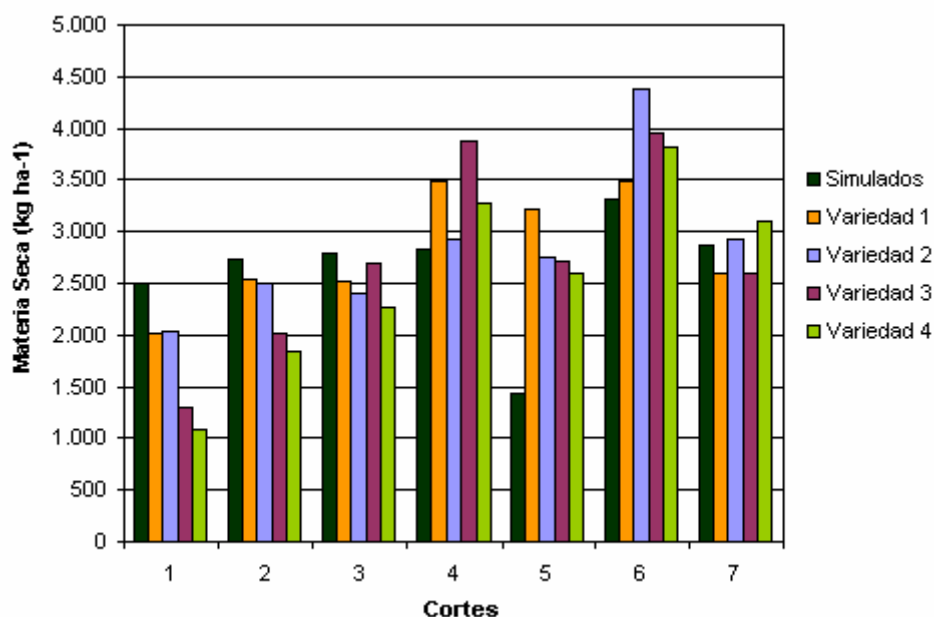
- **Macro región Centro:** Para la validación de este escenario se utilizaron características de la serie de suelo Lo Vázquez (CIREN, 1999), registros climáticos diarios de los años 1997-1998 (INIA, 1998), y datos de producción de biomasa acumulada de alfalfa para la temporada 1997-1998 (Informe Técnico INIA, 1998). La tabla 4.18 y la figura 4.11 muestran valores de rendimiento de biomasa por corte y total, obtenidos de datos simulados y ensayos experimentales de cuatro variedades de alfalfa, realizados en la Centro Regional de Investigación La Platina de INIA (Región Metropolitana).



**Tabla 4.18. Biomasa total y por corte (kg ha<sup>-1</sup>) de alfalfa simulados y experimentales. INIA- La Platina (R.M.).**

La Platina. Temporada 1987-1988. Producción de Masa Seca en kg ha <sup>-1</sup> .								
Fecha	26-08-87	06-10-87	11-11-87	16-12-87	08-01-88	19-02-88	05-04-88	Total
Corte	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
<b>Simulados</b>	2.498	2.725	2.792	2.834	1.436	3.319	2.860	18.464
<b>*Variedad 1</b>	2.020	2.530	2.510	3.490	3.220	3.480	2.600	19.850
<b>*Variedad 2</b>	2.030	2.500	2.410	2.920	2.760	4.380	2.930	19.930
<b>*Variedad 3</b>	1.190	2.270	2.290	3.510	2.870	3.510	3.250	18.890
<b>*Variedad 4</b>	570	2.230	2.580	3.040	2.010	2.290	2.290	15.010

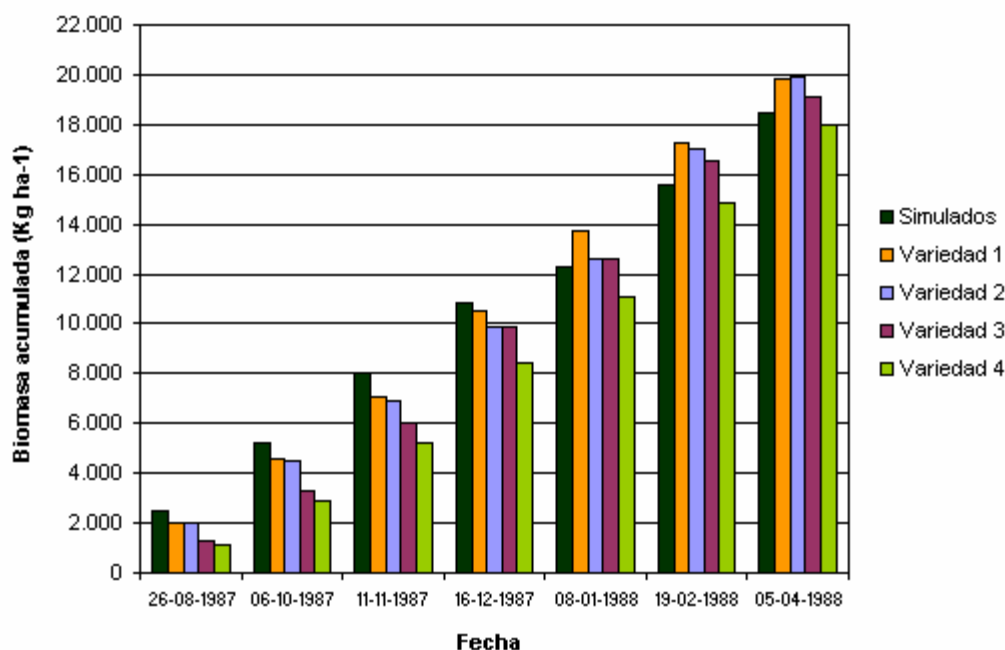
Fuente (\*): Informe Técnico INIA, 1998.



**Figura 4.11. Rendimientos por corte de biomasa de alfalfa (kg ha<sup>-1</sup>), experimentales y simulados. INIA-La Platina, Región Metropolitana.**

Se puede apreciar de la figura 4.11, que los rendimientos de biomasa simulados, fluctuaron en cada uno de los siete cortes, y además variaron con respecto a los rendimientos de biomasa experimentales. Esto es, el modelo simuló una producción de biomasa por corte y entre variedades, similares a las exhibidas por y entre los valores experimentales de las variedades de alfalfa.

Un análisis más detallado de la producción de biomasa acumulada por corte a lo largo del desarrollo del cultivo se presenta en la figura 4.12, en ella se grafican los valores experimentales y simulados acumulados por corte.



**Figura 4.12. Biomasa acumulada de alfalfa por corte. La Platina (R.M).**

La acumulación de biomasa de alfalfa a lo largo del desarrollo del cultivo fue correctamente simulada por el modelo. El ajuste exhibido por el modelo, en esta macro región, se fortalece al lograr rendimientos de biomasa totales por temporada, muy próximos a los experimentales.

- **Macro Región Centro Sur:** Para la validación de este escenario se utilizaron características de la serie de suelo Lontué (CIREN, 1999), registros climáticos diarios de la localidad Humán (INIA, 2002), y datos de producción de biomasa acumulada de alfalfa para la temporada 1990-1991 (Soto, 1991). La tabla 4.19 resume los valores de rendimientos de biomasa totales, obtenidos de datos experimentales de tres temporadas de producción de alfalfa (1989-1992), realizados en la localidad de Humán, VIII región, y datos simulados de la temporada 1990-1991.

**Tabla 4.19. Valores de rendimientos de alfalfa reales y simulados por temporadas. Humán.**

Rendimiento Materia Seca (kg ha <sup>-1</sup> )			
Temporada			
1989-1990	1990-1991		1991-1992
*Reales	Simulados	*Reales	*Reales
20.800	19.628	19.100	15.000

Fuente (\*): Soto, 2000.

En esta macro región, el comportamiento del modelo por corte, simulando las etapas de desarrollo de la alfalfa no se pudo evaluar por carencia de datos reales o experimentales, por lo tanto, sólo se evaluó la producción total de biomasa. Se observa que el modelo estimó adecuadamente la biomasa total de alfalfa para las condiciones de la temporada 1990-1991, en la localidad de Humán y además, los valores de biomasa total obtenidos estuvieron cerca del promedio para los tres años de datos en la misma zona. En general, se puede decir que el comportamiento del modelo, para la aplicación requerida es adecuado.

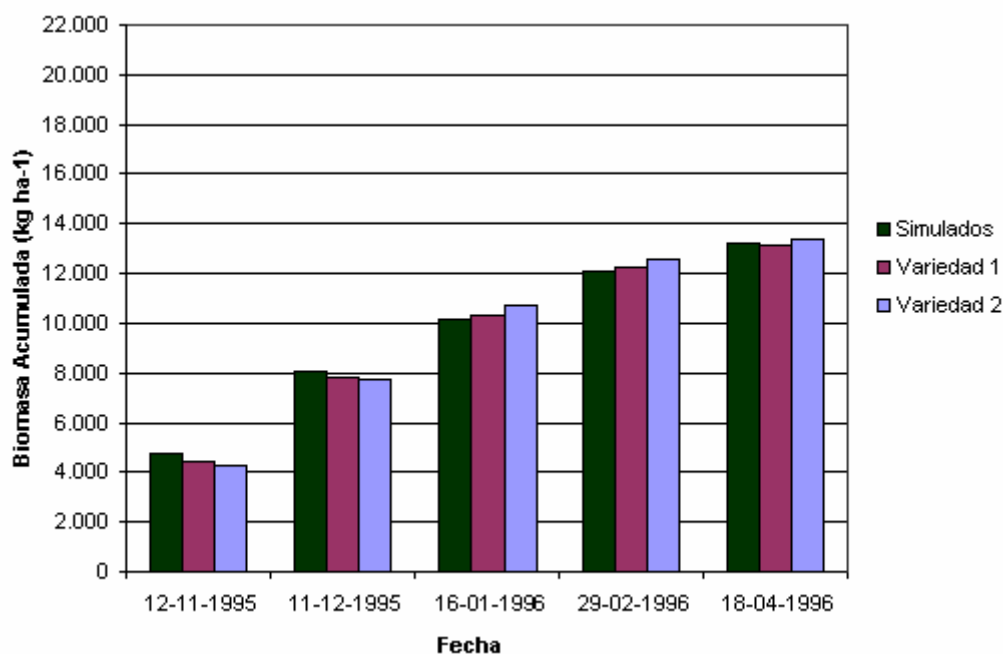
- **Macro Región Sur:** Se utilizaron características de la serie de suelo Mininco (CIREN, 1999), registros climáticos diarios de la localidad de Carillanca para la temporada 1995-1996, y datos de producción de biomasa acumulada de alfalfa para la temporada 1995-1996 (Informe Técnico INIA, 1996). La tabla 4.20 presenta valores de producción de biomasa por corte y total, obtenidos de datos simulados y ensayos experimentales de variedades de alfalfa, realizados en el Centro Regional de Investigación Carillanca de INIA (IX Región).

**Tabla 4.20. Biomasa total y por corte y totales de alfalfa experimentales y simulados. INIA-Carillanca.**

Carillanca. Temporada 1995-1996. Biomasa acumulada de alfalfa en kg ha <sup>-1</sup> .						
Fechas	12-Nov-95	11-Dic-95	16-Ene-96	29-Feb-96	18-Abr-96	Total
Corte	C1	C2	C3	C4	C5	
Simulados	4.719	3.321	2.114	1.948	1.129	13.231
*Variedad 1	4.427	3.407	2.473	1.944	920	13.171
*Variedad 2	4.276	3.433	3.012	1.862	757	13.340

Fuente (\*): Informe Técnico INIA, 1996.

La producción de biomasa disminuyó a medida que los cortes de alfalfa se fueron sucediendo. Esta misma tendencia de disminución de los rendimientos de biomasa por corte, fue simulada por el modelo, obteniéndose valores de biomasa cercanos a los experimentales.



**Figura 4.13. Biomasa acumulada de alfalfa por corte. Carillanca, IX región.**

La evolución de biomasa acumulada, exhibida en la figura 4.13, permite concluir que el modelo simuló apropiadamente la producción de biomasa de alfalfa, y los rendimientos finales alcanzados por el modelo son muy similares a los observados experimentalmente bajo las condiciones establecidas en Carillanca.

En general, el modelo representó apropiadamente el crecimiento de biomasa de alfalfa a lo largo de su desarrollo, tanto en cortes individuales como en la acumulación de biomasa total, para cada una de las tres macro regiones establecidas en el estudio.

La tabla 4.21 muestra un resumen de los parámetros de crecimiento, morfología y fenología utilizados por CropSyst, para realizar la validación del cultivo de alfalfa. Estos parámetros fueron usados posteriormente para simular los escenarios del presente estudio.

**Tabla 4.21. Parámetros de crecimiento, morfología y fenología del cultivo de alfalfa por macro región.**

Macro Región	Centro	Centro Sur	Sur
<b>Parámetros de Crecimiento</b>			
Luz para establecer conversión de biomasa (g/MJ)	1,8	1,8	1,8
Potencial de proporción real que limita la raíz.	0,5	0,5	0,5
Temperatura media diaria óptima de crecimiento (°C)	15	15	15
<b>Parámetros de Morfología</b>			
Área foliar específica (m <sup>2</sup> /kg)	22	23	15
Coeficiente de partición tallo/hoja (1-10)	4	4	4
Duración foliar (días grado)	-	-	-
Coeficiente de extinción para la radiación solar (0-1)	0,5	0,5	0,5
Coeficiente de evapotranspiración de la hoja del cultivo	1,12	1,10	1,10
<b>Parámetros de Fenología</b>			
Emergencia (días grado)	100	100	100
Índice de Área Foliar Máxima (días grado)	-	-	-
Inicio Floración (días grado)	1000	1000	1000
Inicio llenado grano (días grado)	1020	1020	1020
Madurez fisiológica (días grado)	-	-	-
Temperatura base (°C)	3	3	3
Temperatura corte (°C)	25	25	25

#### ***Avena.***

- **Macro región Centro:** Para la validación de este escenario se utilizaron características de la serie de suelo Codigua (CIREN, 1999), registros climáticos diarios de los años 2002-2003 de las localidades de Lonquén y Pichidegua (INIA, 2003) y datos de biomasa de avena para la temporada 2002-2003 (INIA, 2003).

Rendimientos simulados y experimentales de avena de las localidades de Lonquén y Pichidegua, para la temporada 2002-2003, se presentan en la tabla 4.22. El rendimiento de avena sólo fue validado para las condiciones de la macro región centro, que es donde se utiliza para los fines de esta aplicación. Adicionalmente, se validó sólo una o dos etapas de desarrollo ya que el cultivo es interrumpido en estado vegetativo para dar paso a una nueva siembra de maíz.

**Tabla 4.22. Biomasa de avena ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), experimentales y simulados. Lonquén y Pichidegua.**

Lonquén. Año 2002.		Periodo de Simulaciones
Simulados	2.724	4 meses
*Reales	3.180	4 meses
Pichidegua. Año 2002.		Periodo de Simulaciones
Simulados	3.375	4 meses
*Reales	2.932	4 meses

Fuente (\*): INIA, 2003.

El modelo, en general simuló correctamente la biomasa de avena en el periodo de cuatro meses para ambas localidades de la macro región centro, observándose en Pichidegua una ligera sobreestimación de los valores de biomasa acumulada simulados con respecto a los reales. Sin embargo, para Lonquén el modelo predijo valores menores a los reportados en los ensayos de campo. Esta diferencia podría explicarse debido a que las características fenológicas de la avena se mantuvieron constantes en ambas localidades, y éstas zonas poseen una variación climática que incide en el desarrollo del cultivo y por lo tanto en los valores de biomasa simulados.

La tabla 4.23 muestra un resumen de los parámetros de crecimiento, morfología y fenología utilizados por el modelo CropSyst para realizar la validación de la avena en la macro región centro. Estos parámetros fueron usados posteriormente para simular los escenarios del presente estudio.

**Tabla 4.23. Parámetros de crecimiento, morfología y fenología del cultivo de avena para la macro región centro.**

Macro Región	Centro
<b>Parámetros de Crecimiento</b>	
Luz para establecer conversión de biomasa (g/MJ)	3
Potencial de proporción real que limita la raíz.	0,8
Temperatura media diaria óptima de crecimiento (°C)	7
<b>Parámetros de Morfología</b>	
Área foliar específica (m <sup>2</sup> /kg)	22
Coefficiente de partición tallo/hoja (1-10)	3
Duración foliar (días grado)	850
Coefficiente de extinción para la radiación solar (0-1)	0,55
Coefficiente de evapotranspiración de la hoja del cultivo	1,0
<b>Parámetros de Fenología</b>	
Emergencia (días grado)	100
Índice de Área Foliar Máxima (días grado)	1400
Inicio Floración (días grado)	1450
Inicio llenado grano (días grado)	1500
Madurez fisiológica (días grado)	1800
Temperatura base (°C)	3
Temperatura corte (°C)	22

### **Evapotranspiración Potencial.**

La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) puede determinarse a partir de la evapotranspiración potencial (ET<sub>p</sub>) según la expresión:

$$ET_c = ET_p * K_c \quad (6)$$

Donde K<sub>c</sub> es un coeficiente de cultivo de tipo adimensional que varía con el desarrollo vegetativo del cultivo (CNR, 1998). El modelo se validó con datos de evapotranspiración potencial dada la ausencia de información de evapotranspiración real. Se utilizó información determinada para diversas localidades del país (CNR-CIREN, 1997) e información específica de evapotranspiración potencial para la localidad de Carillanca, la que fue contrastada con datos simulados.

- **Macro región centro:** Se utilizaron características de la serie de suelo Lo Vázquez (CIREN, 1999) y registros climáticos diarios de los años 1997-1998 (INIA, 1998) e índices de evapotranspiración potencial tabulados para La Platina (CNR-CIREN, 1997). La tabla 4.24, presenta los índices de evapotranspiración potencial tabulados (mm), y los valores de evapotranspiración potencial simulados por el modelo, para La Platina en la Región Metropolitana.

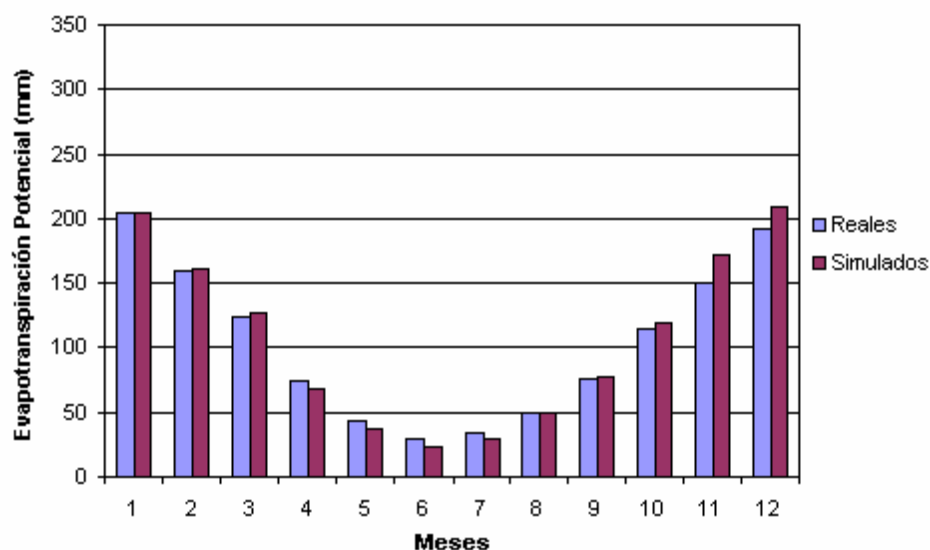
**Tabla 4.24. Valores de evapotranspiración potencial tabulados (mm) y simulados. Macro región centro.**

<b>Evapotranspiración Potencial (mm).</b>		
<b>Mes</b>	<b>*Reales</b>	<b>Simulados</b>
enero	203,88	205,12
febrero	159,75	160,82
marzo	124,00	127,75
abril	74,50	68,27
mayo	44,00	36,42
junio	29,63	23,69
julio	33,63	29,38
agosto	49,38	49,22
septiembre	75,38	77,66
octubre	114,25	118,94
noviembre	150,00	172,48
diciembre	191,88	208,91

Fuente (\*): CNR-CIREN, 1997.

La figura 4.14, muestra un gráfico que relaciona los índices de evapotranspiración potencial tabulados y los simulados por el modelo.





**Figura 4.14. Evapotranspiración potencial real versus simulada. La Platina, macro región centro.**

La figura 4.14, demuestra que para el periodo simulado, el modelo se ajustó razonablemente bien a los valores de evapotranspiración potencial reportados para la macro región centro.

- **Macro región centro sur:** Se utilizaron características de la serie de suelo Quilmén (CIREN, 1999), registros climáticos de los años 2001-2002 de la localidad de Los Angeles (INIA, 2002), e índices de evapotranspiración potencial reportados para la localidad de Humán (CNR-CIREN, 1997). La tabla 4.25, presenta los índices de evapotranspiración potencial reportados (mm), y los valores de evapotranspiración potencial simulados por el modelo para la localidad de Humán.

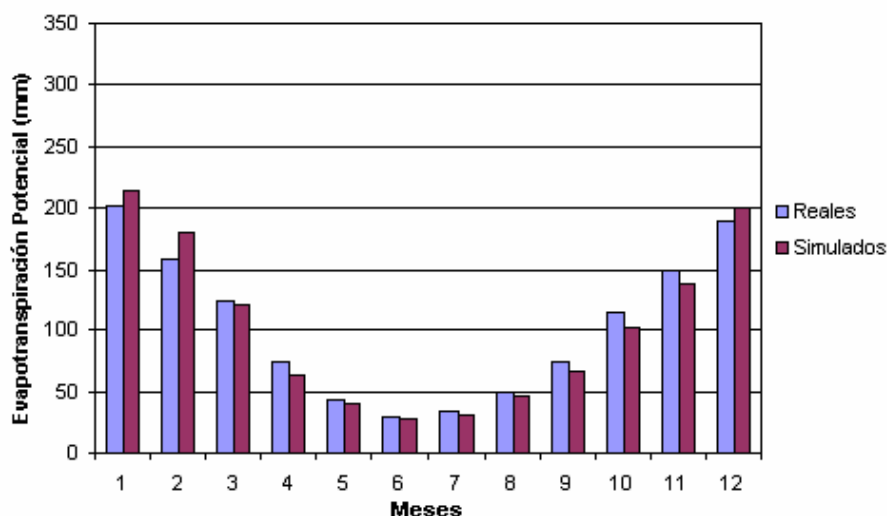
**Tabla 4.25. Valores de evapotranspiración potencial tabulados (mm) y simulados. Macro región centro sur.**

<b>Evapotranspiración potencial (mm).</b>		
<b>Mes</b>	<b>*Reales</b>	<b>Simulados</b>
enero	202,24	213,77
febrero	158,47	179,86
marzo	123,01	120,98
abril	73,90	63,33
mayo	43,65	40,32
junio	29,39	27,74
julio	33,36	31,17
agosto	48,98	45,84
septiembre	74,77	66,62
octubre	113,34	102,12
noviembre	148,80	136,88
diciembre	190,34	200,03

Fuente (\*): CNR-CIREN, 1997.

La figura 4.15, muestra un gráfico que relaciona los índices de evapotranspiración potencial históricos y los simulados por el modelo.

Los índices de evapotranspiración potencial simulados, presentes en la figura 4.15, demuestran que las simulaciones se ajustan favorablemente a los valores reportados de evapotranspiración potencial.



**Figura 4.15. Evapotranspiración potencial real versus simulada. Macro región centro sur.**

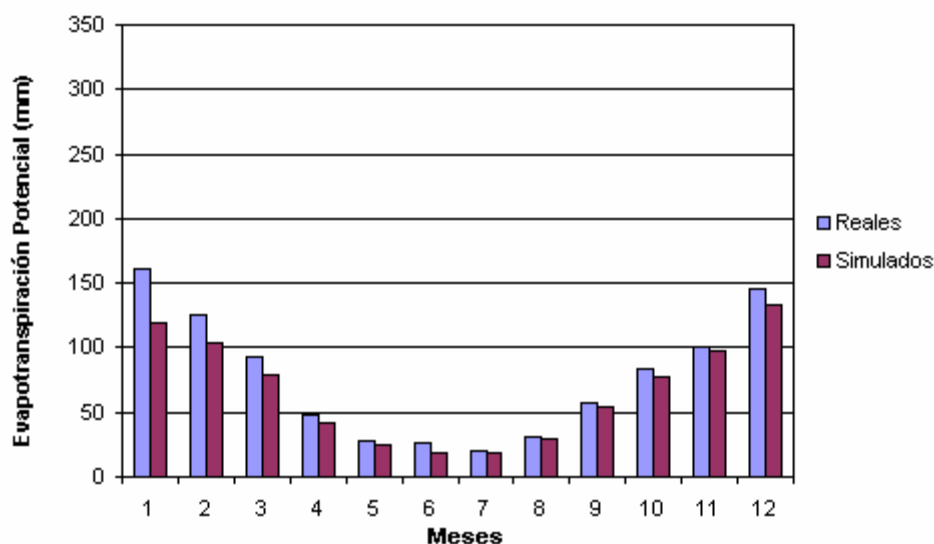
- **Macro región sur:** Se utilizaron características de la serie de suelo Mininco (CIREN, 1999), registros climáticos de los años 1994-1996 de la localidad de Carillanca (INIA, 2002), e índices de evapotranspiración potencial reales para la localidad de Carillanca (Novoa y Villaseca, 1989). La tabla 4.26, presenta los índices de evapotranspiración potencial reportados (mm), y valores de evapotranspiración potencial simulados por el modelo, para la localidad de Carillanca.

**Tabla 4.26. Valores de evapotranspiración potencial reales (mm) y simulados. Macro región sur.**

Evapotranspiración potencial (mm).		
Mes	* Reales	Simulados
enero	161,3	118,63
febrero	126,1	104,10
marzo	93,5	79,66
abril	48,1	41,27
mayo	27,5	24,79
junio	26,3	18,38
julio	20	19,01
agosto	30,6	28,78
septiembre	57,8	54,94
octubre	83,3	77,93
noviembre	101,2	96,97
diciembre	145,3	132,99

Fuente (\*): Novoa y Villaseca, 1989.

La figura 4.16, muestra un gráfico que relaciona los índices de evapotranspiración real y los simulados por el modelo.



**Figura 4.16. Evapotranspiración potencial real versus simulada. Macro región sur.**

Al relacionar la información presente en la figura 4.16, es posible observar que en el mes de enero, la evapotranspiración real es mayor que la simulada. Sin embargo para el resto de los meses, el modelo se ajustó a los valores de evapotranspiración potencial reales.

El modelo, salvo excepciones, simuló satisfactoriamente los índices de evapotranspiración potencial para todas las macro zonas en estudio.

La capacidad del modelo para simular los rendimientos totales de los cultivos, biomasa acumulada y evapotranspiración potencial, en presencia de distintas condiciones edafoclimáticas y de periodos de tiempo, fue satisfactorio para el total de los sistemas evaluados. El modelo CropSyst en general simuló bien la fenología de los cultivos y su interacción con el medio, debido a los ajustes realizados en sus parámetros internos. Esto conllevó a representar de mejor forma las realidades macro regionales, obteniendo resultados que permitieron validar óptimamente el modelo.

### **Balance general de masa, de agua y nitrógeno.**

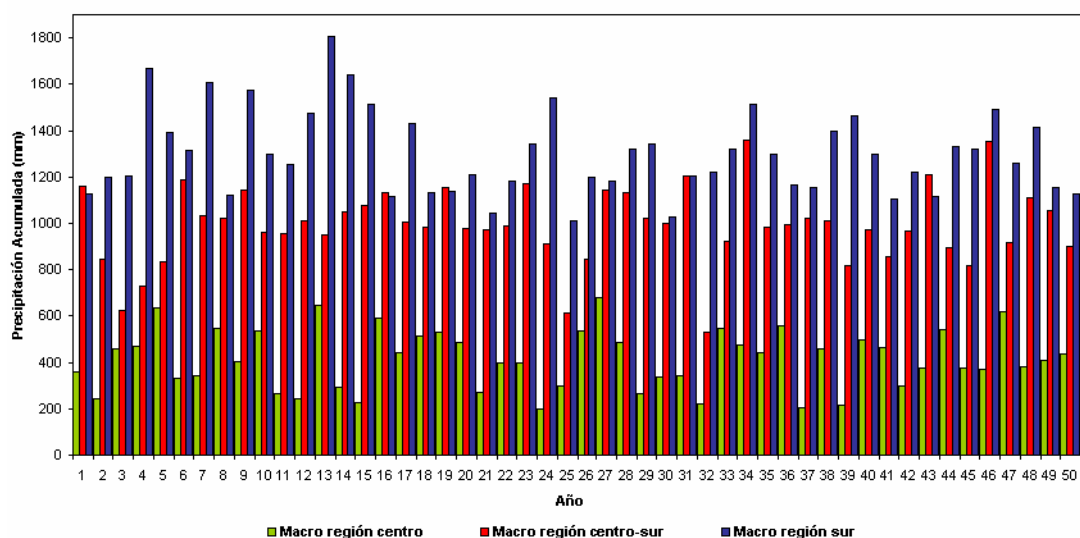
Para establecer los potenciales de lixiviación de nitrógeno, fue necesario determinar, para cada macro región considerada en el estudio, los balances de masa de agua y de nitrógeno en el sistema suelo-agua-planta-atmósfera. El resultado del balance de agua, en general, determina el balance de nitrógeno; todo esto en una dinámica que depende de factores tales como el cultivo, el suelo y las tasas de aplicación de N, en forma de purín o como fertilizante mineral, utilizadas.

### **Balance general de agua.**

La variación en el contenido de humedad en el suelo es resultado de un balance entre los aportes de agua al suelo (precipitación, riego) y las pérdidas (evapotranspiración, escurrimiento superficial, drenaje).

#### ***Aportes.***

- **Precipitación:** El componente precipitación del balance de agua fue analizado en detalle, para cada macro región, las que dadas sus características, presentan diferencias importantes, tanto en cantidad como en distribución. Para comparar las macro regiones se muestra en la figura 4.17, la serie temporal de precipitación anual generada, para 50 años para cada condición.



**Figura 4.17. Precipitaciones anuales acumuladas, por macro región. Valores generados.**

En promedio, la precipitación de la macro región centro es de 412 mm; la macro región centro sur de 991 mm y la macro región sur es de 1.299 mm. La tabla 4.27 presenta el rango y promedio de precipitaciones para las macro regiones. Se observa de la figura 4.17, una gran variabilidad interanual, manifestándose años secos, normales y lluviosos. Para analizar los datos y diferenciar los tipos de años, se utilizó el rango, frecuencia y porcentaje de montos de precipitación para cada macro región. Este análisis es pertinente dada la importancia del tipo de año en el destino del nitrógeno residual resultante de las aplicaciones de purines de cerdo al suelo.

**Tabla 4.27. Rango y promedio de precipitaciones generadas (mm año<sup>-1</sup>) anuales acumuladas.**

Macro Región	Máximo	Promedio	Mínimo
Centro	680	413	202
Centro sur	1.358	991	533
Sur	1.807	1.300	1.013

El análisis de la variabilidad de la precipitación se realizó a partir de parámetros de dispersión que asocian probabilidades de ocurrencia de precipitaciones de una determinada magnitud

(Hernández, 1992). Así, el mayor porcentaje de datos se asoció a la precipitación normal anual en la zona.

Del análisis de frecuencia de los registros de precipitación, la macro región centro presenta un 88% de los datos entre los 204 y 612 mm. Por consecuencia los datos menores a 204 (mm) fueron considerados años secos y los mayores a 612 mm, considerados años lluviosos. La macro región centro sur, muestra el 88% de los datos entre 815 y 1.222 mm lo que se considerará año normal, el 8% de los datos bajo 815 mm que fueron considerados como años secos y el 4% sobre 1.222 mm considerados años lluviosos. La macro región sur presenta el 88% de los datos entre 1.084 y 1.626 mm, señalando así a este intervalo como año normal, en consecuencia bajo los 1.084 mm se consideran años secos y sobre 1.626 mm años lluviosos.

- **Riego:** El volumen de riego aplicado a los cultivos por el modelo fue función de las características del suelo, clima y de los cultivos. Los métodos de riego difieren en cuanto a su eficiencia en relación a la cantidad de agua aplicada y la que permanece en la zona radicular disponible para los cultivos (CNR, 1998). El riego simulado consideró un 40% de excedencia por sobre la evapotranspiración a objeto de simular riego por surcos, de eficiencia media. La tabla 4.28, muestra el rango y promedio del riego aplicado para las tres macro regiones consideradas.

**Tabla 4.28. Rango y promedio de aplicación de riego anual (mm año<sup>-1</sup>) por macro región.**

Macro Región	Máximo	Promedio	Mínimo
Centro	1.441	989	595
Centro sur	1.210	838	522
Sur	692	346	117

Se observa una disminución de la aplicación de riego a medida que se avanza desde la macro región centro a la macro región sur. Esto se atribuye a las características de cada zona, tales como temperatura, humedad relativa y viento. En general, en la zona sur se observan las mayores precipitaciones y una distribución más pareja de las lluvias, así como también un

período de cultivo más corto determina menores necesidades de riego. La tabla 4.29, muestra el rango, promedio y coeficiente de variación (C.V.) de riego aplicado en función del cultivo y macro región. No se consideró la variable suelo dado que no se encontraron diferencias importantes entre los diferentes suelos y las tasas de riego aplicadas.

**Tabla 4.29. Rango y promedio anual de riego aplicado ( $\text{mm año}^{-1}$ ).**

Macro zona centro		
Variable	Alfalfa	Maíz-Avena
Máximo	1.441	1.030
Mínimo	600	595
Promedio	1.129	844
C.V	0,1476	0,0853
Macro zona centro sur		
Variable	Alfalfa	Maíz-Avena
Máximo	1.210	874
Mínimo	692	521
Promedio	956	719
C.V	0,1091	0,0937
Macro zona sur		
Variable	Alfalfa	Maíz (silo)
Máximo	692	364
Mínimo	249	117
Promedio	434	259
C.V	0,1717	0,1692

La rotación Maíz-Avena requirió una menor aplicación de agua de riego total por macro región, que la alfalfa. Esto se atribuye principalmente a un menor período vegetativo del maíz lo que incide en un menor número de riegos. La avena, por ser un cultivo invernal, no se riega, y sólo se consideró un riego inicial de presiembra de  $30 \text{ mm año}^{-1}$ . Soto (2000), señala que la raíz de alfalfa es de arraigamiento profundo, pudiendo superar los tres metros de profundidad, permitiendo así explorar un mayor volumen de suelo para obtener el agua necesaria para su desarrollo lo que genera riegos de menor frecuencia y mayor volumen.



### ***Pérdidas.***

- **Evapotranspiración:** La evapotranspiración fue función de las características de suelo, cultivo y clima para cada macro región. Esta incluye la transpiración del cultivo, evaporación desde los residuos, la superficie del suelo y los cultivos; y varía en tiempo y período vegetativo en cada rotación. Un cultivo sería particularmente efectivo controlando el potencial de lixiviación de nitrato, si es altamente extractivo de este elemento, si su tasa de evapotranspiración es alta y además coincidente con los períodos con mayor precipitación (algunos cultivos tropicales poseen estas características), disminuyendo así el potencial de drenaje, y por lo tanto la lixiviación de nitrógeno. Williams y Kissel, (1991) destacan que existe un aumento de lixiviación de nitrato cuando hay ausencia de cultivos, debido a que no existe extracción de agua por evapotranspiración con lo cual la lixiviación queda sólo en función de las diferencias en las propiedades físico hídricas de los suelos. Un resumen de la evapotranspiración en función del cultivo y macro zona se presenta en la tabla 4.30, donde se muestra rango, promedio y C.V. en base anual.

**Tabla 4.30. Rango y promedio en base anual de evapotranspiración (mm año<sup>-1</sup>), para rotación y macro zonas. Valores generados.**

Macro zona central			
Variable	Alfalfa	Maíz-Avena	Suelo Desnudo
Máximo	1.411	982	327
Mínimo	955	794	144
Promedio	1.170	888	225
C.V	0,0921	0,0378	0,1793
Macro zona centro sur			
Variable	Alfalfa	Maíz-Avena	Suelo Desnudo
Máximo	1.201	1.054	475
Mínimo	900	743	246
Promedio	1.062	884	342
C.V	0,0614	0,0626	0,1302
Macro zona sur			
Variable	Alfalfa	Maíz (silo)	Suelo Desnudo
Máximo	907	618	571
Mínimo	683	489	311
Promedio	795	553	452
C.V	0,0615	0,0411	0,128

En general, por razones climáticas, los valores máximos de evapotranspiración se registran en la zona centro disminuyendo hacia la zona sur. El aumento de la evapotranspiración (fundamentalmente evaporación) hacia la macro zona sur, se explica por un mayor monto y mejor distribución de las precipitaciones, lo que implica que, existe una mayor disponibilidad de agua para evaporar en forma directa. A su vez, se observa que la evapotranspiración en condiciones de cultivo, es superior a aquella bajo suelo desnudo, donde sólo el componente de evaporación directa está presente.

La rotación con alfalfa en comparación con el maíz presenta una mayor evapotranspiración total en todas las macro regiones. Esto sería atribuible a que la alfalfa presenta, en general, un período de desarrollo y crecimiento más largo. La mantención del suelo cubierto sería importante para maximizar la pérdida de agua por evapotranspiración y así reducir pérdidas de agua en forma de drenaje lo cual es el vehículo para transportar el nitrógeno hacia las capas más profundas del suelo.

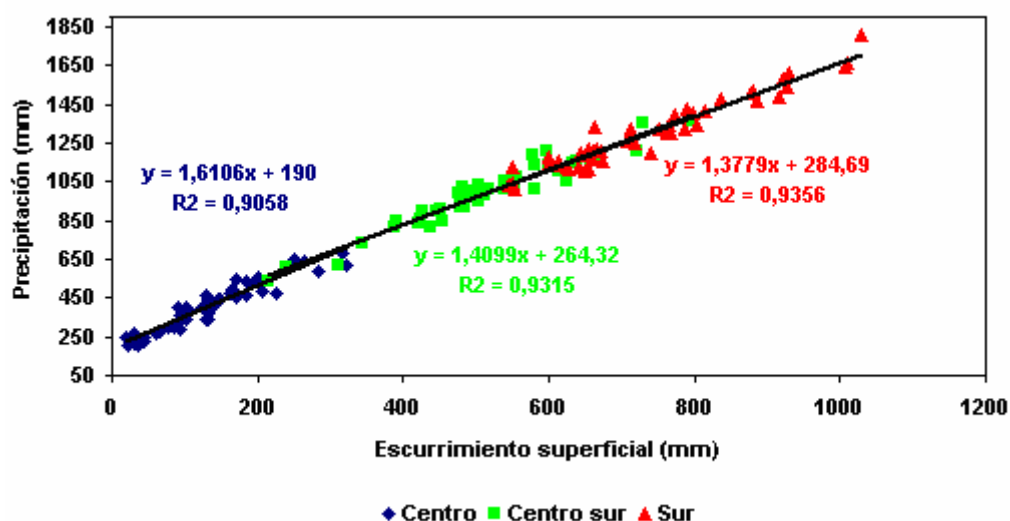
- **Escurrimiento Superficial:** En el planteamiento del balance hídrico y cantidad de agua que ingresa al suelo, es necesario considerar la fracción de las precipitaciones y del riego que es desviada como escorrentía superficial. Esta cantidad de agua es función de la pendiente y textura del suelo (Peterson y Power, 1991). El modelo predice escurrimiento superficial cuando la intensidad de lluvia supera la conductividad hidráulica; así el potencial de agua ( $\psi$ ) en el primer horizonte es mayor al potencial de entrada de aire ( $\psi_e$ ) produciendo una condición de saturación y posterior escurrimiento. La tabla 4.31, presenta rangos y promedio de escurrimiento superficial simulado para diferentes texturas por macro región.

**Tabla 4.31. Rangos y promedio de escurrimiento superficial anual ( $\text{mm año}^{-1}$ ), para diferentes texturas y macro región. Valores generados.**

Macro zona centro			
	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo arenoso	342	70	0
Suelo franco arcillo arenoso	320	66	1
Suelo franco arcilloso	346	134	7
Macro zona centro sur			
	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo franco arenoso	376	183	25
Suelo arcillo limoso	945	531	148
Suelo franco limoso	605	326	62
Macro zona sur			
	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo arcilloso	1.019	661	332
Suelo franco arcillo limoso	878	581	326
Suelo franco	612	384	199

Se observa, en general, que en suelos más arcillosos se produce mayor escurrimiento que en suelos más arenosos. Esto se debe a que la tasa de infiltración es menor en suelos arcillosos que en arenosos, dado que tienen una menor macro porosidad y estructuras desfavorables. Por lo tanto, es posible que en suelos más arcillosos el espacio poroso que conduce agua se reduzca, lo cual limita el potencial del agua y de aire, dificultando el ingreso de agua al interior del suelo y facilitando la escorrentía superficial.

La infiltración y el escurrimiento de agua en un suelo son procesos relacionados. El escurrimiento aumenta si la infiltración disminuye. Cuando el escurrimiento es mínimo y la infiltración es máxima producto de riego o precipitación, la oportunidad de tener agua drenada también aumenta. Al contrario, si la infiltración es mínima y existe ingreso de agua (riego, precipitación o ambas), la oportunidad de tener escurrimiento superficial aumenta. Para comparar las macro regiones se muestra en la figura 4.18, un análisis de correlación para las variables de precipitación y escurrimiento superficial en función de la precipitación en base anual.



**Figura 4.18.** Correlación de variables precipitación- esguerrimiento superficial de 50 años generados en presencia de cultivos.

Del análisis de correlación, se determinó una misma tendencia para las macro regiones centro, centro sur y sur, entre precipitación y esguerrimiento con un coeficiente de correlación superior a 0,9. Así se determinó una estrecha relación entre la precipitación y el esguerrimiento superficial. Williams y Kissel (1991), señalan que un aumento del esguerrimiento en suelos de textura arcillosa hace que el volumen de drenaje disminuya y por ende la lixiviación de nitratos.

- **Drenaje:** El drenaje o percolación profunda es el resultado de un balance entre el agua aportada al suelo por precipitaciones, riego y las pérdidas por evapotranspiración y esguerrimiento. El exceso de agua, si es que existe, resultante de este balance, se mueve en forma vertical desde los estratos superiores del suelo a los más profundos. El agua drena más rápido en suelos arenosos que en suelos arcillosos por diferencia de magnitud de la conductividad hidráulica (Williams y Kissel., 1991). La capacidad de drenaje, es una característica del suelo que depende de sus características físicas, químicas y del estado de humedad previo a la precipitación. El drenaje, para efectos de esta aplicación, se refiere al agua del suelo que drena más allá de 120 cm. Las tablas 4.32 y 4.33 presentan el rango y

promedio de agua drenada para diferentes texturas y macro regiones en presencia y ausencia de cultivos.

**Tabla 4.32. Rango y promedio de drenaje anual (mm año<sup>-1</sup>) en presencia de cultivo, para diferentes texturas y macro regiones. Valores generados.**

Macro zona centro			
Variable	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo arenoso	601	369	186
Suelo franco arcillo arenoso	532	250	63
Suelo franco arcilloso	532	322	211
Macro zona centro sur			
Variable	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo franco arenoso	997	711	379
Suelo arcillo limoso	545	386	232
Suelo franco limoso	818	533	180
Macro zona sur			
Variable	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo arcilloso	510	363	209
Suelo franco arcillo limoso	611	401	247
Suelo franco	896	598	405

**Tabla 4.33. Rango y promedio de drenaje anual (mm) en ausencia de cultivo, para diferentes textura y macro región. Valores generados.**

Macro zona centro			
Variable	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo arenoso	413	161	17
Suelo franco arcillo arenoso	228	114	16
Suelo franco arcilloso	230	57	0
Macro zona centro sur			
Variable	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo franco arenoso	632	434	140
Suelo arcillo limoso	130	69	5
Suelo franco limoso	436	291	94
Macro zona sur			
Variable	Máximo	Promedio	Mínimo
Suelo arcilloso	632	434	140
Suelo franco arcillo limoso	387	223	140
Suelo franco	707	433	276

Se observa de las tablas 4.32 y 4.33 un aumento del drenaje a medida que el suelo es más arenoso. En suelos con cultivos se observó un mayor drenaje, debido al aporte de agua de riego al balance hídrico, a diferencia de la condición de suelo desnudo donde se observa un menor drenaje debido a que no existe aporte por riego durante el período primavera-verano.

Si se estimara un índice de drenaje definido como la fracción de agua drenada respecto del agua total que ingresa al suelo se encontraría que éste, en promedio, es mayor para suelos más arenosos (30%) y menor para suelos más arcillosos (18%). El índice de drenaje en ausencia de cultivos es también, en promedio, mayor para suelos más arenosos (12%) y menor para suelos más arcillosos (4%). Williams y Kissel (1991), reporta que para suelos arenosos, la cantidad de agua que puede ser drenada bajo la zona radicular, puede llegar hasta un 32%, mientras que para suelos arcillosos alcanza un 7%.

### **Balance general de nitrógeno.**

La variación en el contenido de nitrógeno en el suelo es resultado de un balance entre los aportes de nitrógeno, ya sea en forma de purín de cerdo (nitrógeno orgánico e inorgánico) o como fertilizante mineral y, las pérdidas (desnitrificación, absorción de nitrógeno por las plantas y lixiviación). Se analizó por cada macro región, la ecuación general de conservación de masa para el sistema suelo-planta, para estudiar el potencial de lixiviación de nitrógeno en el largo plazo, considerando como nitrógeno potencialmente lixiviable, al exceso de este elemento en el sistema (se consideró sistema al volumen de suelo, definido por una profundidad de hasta 1,2 m), el que, debido a eventos de drenaje, puede afectar la calidad de las aguas subterráneas. En general, la profundidad del suelo no afecta la velocidad de transporte del agua de drenaje con su correspondiente carga de N, lo que si, debido a que la distancia a recorrer es menor, se puede encontrar más rápidamente N en el sector inferior del suelo en un suelo más delgado que en uno más profundo.

### *Aportes.*

- **Nitrógeno aplicado:** En esta primera etapa del estudio, el purín de cerdo como fertilizante orgánico proveniente de plántales porcinos fue la principal entrada de nitrógeno al suelo. Los escenarios simulados incluyeron cuatro tratamientos con tasas de aplicación de nitrógeno como purín de 2.500, 1.600, 700 y 400 kg N ha<sup>-1</sup> (60% de nitrógeno en forma mineral y 40% en forma orgánica), distribuidos aproximadamente cada una semana desde el mes de noviembre hasta inicios del mes de febrero y no considerando aplicación invernal. **Esta aplicación fue denominada discontinua, dado que no incluía el período otoño-invierno.**
- **Mineralización:** Los valores de mineralización de nitrógeno obtenidos mediante simulación están en función, principalmente, de la fracción orgánica del nitrógeno proveniente de la aplicación de purines, del nitrógeno proveniente de la materia orgánica del suelo, de los residuos de los cultivos y finalmente del clima (precipitación y temperatura), no afectando considerablemente a este proceso, la rotación y el tipo de suelo. La tabla 4.34, muestra los rangos y el promedio de mineralización anual simulados por cada macro región.

Se observa que los valores de mineralización en la macro zona centro son mayores a los encontrados en la macro zona centro sur, debido a que la mineralización requiere de una fuente de energía, temperatura favorable, aireación y condiciones adecuadas de humedad (Meisinger et al, 1991). No obstante, la tendencia a una disminución de la mineralización a medida que se avanza hacia el sur, tomando en cuenta el argumento antes mencionado, no queda de manifiesto al observar los valores de mineralización de la macro zona sur. Esto podría ser atribuible a la presencia de mayores contenidos de materia orgánica en los suelos de la macro zona sur (suelos trumaos y rojos) los que influyen en el aumento de los valores de mineralización simulados por el modelo, para esta zona.

**Tabla 4.34. Rango y promedio de mineralización anual de nitrógeno (kg N ha<sup>-1</sup>) simulado, por macro regiones.**

Macro región centro				
Tasas (kg N ha <sup>-1</sup> )	2.500	1.600	700	400
Máximo	1071	761	462	345
Mínimo	827	560	216	169
Promedio	916	640	320	247
Macro zona centro sur				
Tasas (kg N ha <sup>-1</sup> )	2.500	1.600	700	400
Máximo	1018	742	466	342
Mínimo	728	482	223	144
Promedio	848	582	300	204
Macro zona sur				
Tasas (kg N ha <sup>-1</sup> )	2.500	1.600	700	400
Máximo	1149	886	618	539
Mínimo	848	566	217	194
Promedio	965	692	390	333

#### ***Pérdidas.***

- **Absorción de nitrógeno:** Los valores de absorción simulados, incluyen nitrógeno en forma de ión amonio y preferentemente ión nitrato (forma en que el nitrógeno es absorbido por las plantas). La tabla 4.35, muestra el promedio de absorción de nitrógeno anual, por rotación de cultivos para cada macro región, tipo de suelo y tasa de aplicación, por un periodo de 50 años. Estos valores de absorción fueron obtenidos de los resultados proporcionados por el modelo durante los periodos de desarrollo de los cultivos. En el caso del maíz el promedio de extracción de nitrógeno se calculó desde el 14 de octubre hasta su cosecha, alrededor del 11 de marzo; la avena durante el periodo comprendido entre el 3 de abril hasta su corte aproximadamente el 27 de septiembre; y por último la alfalfa, cuyo cálculo de extracción de nitrógeno se realizó desde su siembra el 1 de septiembre por un periodo continuo, considerando sólo frecuencias de 6 a 7 cortes anuales, sin remoción total del cultivo.



**Tabla 4.35. Promedio de extracción de nitrógeno anual ( $\text{kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ), para cada macro región, tipo de suelo, rotación de cultivos y tasa de aplicación. Valores simulados.**

<b>Macro zona centro</b>				
<b>Tasas (<math>\text{kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}</math>)</b>				
<b>Maíz-avena</b>	<b>2.500</b>	<b>1.600</b>	<b>700</b>	<b>400</b>
Suelo arenoso	754	754	734	499
Suelo franco arcillo arenoso	766	766	717	449
Suelo franco arcilloso	746	746	741	518
<b>Alfalfa</b>	<b>2500</b>	<b>1600</b>	<b>700</b>	<b>400</b>
Suelo arenoso	667	667	553	395
Suelo franco arcillo arenoso	668	669	573	358
Suelo franco arcilloso	668	668	639	421
<b>Macro zona centro sur</b>				
<b>Tasas (<math>\text{kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}</math>)</b>				
<b>Maíz-avena</b>	<b>2.500</b>	<b>1.600</b>	<b>700</b>	<b>400</b>
Suelo franco arenoso	681	681	647	390
Suelo arcillo limoso	681	681	648	389
Suelo franco limoso	682	682	673	509
<b>Alfalfa</b>	<b>2.500</b>	<b>1.600</b>	<b>700</b>	<b>400</b>
Suelo franco arenoso	520	520	517	317
Suelo arcillo limoso	519	519	519	342
Suelo franco limoso	520	520	518	403
<b>Macro zona sur</b>				
<b>Tasas (<math>\text{kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}</math>)</b>				
<b>Maíz Silo</b>	<b>2.500</b>	<b>1.600</b>	<b>700</b>	<b>400</b>
Suelo arcilloso	339	339	339	339
Suelo franco arcillo limoso	339	339	339	337
Suelo franco	339	339	339	334
<b>Alfalfa</b>	<b>2.500</b>	<b>1.600</b>	<b>700</b>	<b>400</b>
Suelo arcilloso	425	425	425	443
Suelo franco arcillo limoso	425	425	425	440
Suelo franco	425	425	425	398

Los valores de extracción de nitrógeno exhibidos en la tabla anterior demuestran, a excepción de la macro región sur, que en rotaciones de maíz-avena se produce una marcada diferencia en los valores de absorción de este elemento cuando se disminuye la tasa de aplicación de 700 a 400  $\text{kg N ha}^{-1}$ , esta diferencia no se observa en otras tasas de aplicación. Por lo tanto, se puede inferir que, no importando el tipo de suelo, a partir de una tasa de aplicación de 700  $\text{kg N ha}^{-1}$ , la extracción de nitrógeno por la rotación maíz-avena se mantiene relativamente constante y podría

eventualmente corresponder a una tasa máxima de aplicación desde el punto de vista de la extracción por esta rotación, lo que es absolutamente consistente con los resultados alcanzados en los ensayos de campo del proyecto. En la macro región sur, los cultivos presentan una absorción de nitrógeno relativamente constante, no importando la tasa de aplicación. Esto podría explicarse debido a que el aporte de nitrógeno por parte del suelo por mineralización es muy importante y además que la absorción de nitrógeno depende de la biomasa y ciertamente, los rendimientos potenciales de maíz son mayores en las macro regiones centro y centro sur, que en la macro región sur. Sin embargo, la tendencia general para rotaciones de maíz-avena es la disminución de la extracción de nitrógeno hacia el sur.

En el caso de rotación con alfalfa, los valores simulados de absorción de nitrógeno demostraron que no existió una variación significativa en la extracción con tasas de aplicación superiores a  $700 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Soto (2000) reporta para la alfalfa en la VIII región de Chile, una extracción de  $643 \text{ kg ha}^{-1}$  anual, lo cual es comparable con los valores obtenidos con el modelo para la zona centro sur.

**Por lo tanto, se podría concluir que para las rotaciones de maíz-avena y alfalfa, una tasa máxima de aplicación, desde el punto de vista de la extracción, podría ser hasta  $700 \text{ kg N ha}^{-1}$ , aplicados en forma discontinua** (es decir, sólo durante la primavera y el verano) ya que a partir de ésta tasa de aplicación, para ambos cultivos, no se observa una extracción significativamente mayor. Aplicaciones sobre esta tasa tendrían como consecuencia un aumento del nitrógeno residual, potencialmente lixiviable.

- **Pérdidas gaseosas:** La simulación de las pérdidas gaseosas incluyeron la desnitrificación y la volatilización. La desnitrificación o reducción del ión nitrato, involucra la pérdida de nitrógeno en forma de  $\text{N}_2$  y óxidos ( $\text{NO}_x$ ) y la volatilización, la pérdida de  $\text{NH}_3$  producto de la descomposición de la materia orgánica nitrogenada. La tabla 4.36, presenta un promedio anual de valores simulados de pérdidas gaseosas por macro región y tipo de rotación, incluyendo suelo desnudo.

Se observa de la tabla 4.36 para todas las macro regiones en estudio, una disminución de las pérdidas gaseosas a medida que las tasas de aplicación de nitrógeno son menores y que estas pérdidas aumentan en ausencia de cultivos (suelo desnudo) a medida que se avanza de norte a sur. Lo anterior se corrobora con estudios realizados por Urquiaga y Zapata (2000), que señalan que la presencia de cultivos disminuye las pérdidas gaseosas de nitrógeno, debido a la extracción y, que en suelos arcillosos, con alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y menor drenaje, las pérdidas de nitrógeno son mayores. De igual modo, las pérdidas de nitrógeno por desnitrificación se favorecen bajo condiciones anaeróbicas y mal drenaje en el suelo.

**Tabla 4.36. Promedio de pérdidas gaseosas por macro región en kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Valores simulados.**

Macro región centro				
Tasa (kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2500	1600	700	400
Alfalfa	526	344	141	81
Maíz-Avena	562	356	146	84
Suelo Desnudo	986	780	351	213
Macro región centro				
Tasa (kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2500	1600	700	400
Alfalfa	544	345	147	82
Maíz-Avena	577	362	146	85
Suelo Desnudo	810	520	232	139
Macro región sur				
Tasa (kg N ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2500	1600	700	400
Alfalfa	497	318	139	79
Maíz-Avena	502	320	141	82
Suelo Desnudo	504	323	142	81

Se evaluó un índice de porcentaje de pérdida gaseosa anual, definido como la fracción total de nitrógeno perdido en forma de gas con respecto al total de nitrógeno aplicado en forma de purín. **De este índice se obtuvo, que en promedio las simulaciones mostraron que se pierde un 20% de nitrógeno en forma de gas en presencia de cultivos y sobre el 38% bajo condición de suelo desnudo.** Valores cercanos al 20% estimado por el índice de porcentaje de pérdida gaseosa anual, fueron calculados por Chadwick et al (1997) y Martínez (1997), que calcularon pérdidas gaseosas entre 20 y 30% bajo condiciones de suelo con cultivos. Este 20% de pérdidas gaseosas,

podría posiblemente reducir los contenidos de nitrógeno en forma de nitrato y amonio desde el perfil del suelo y disminuir la potencialidad de que el nitrógeno residual lixivie hacia las aguas subterráneas.

- **Lixiviación de nitrógeno:** Las formas de nitrógeno susceptibles de ser lixiviadas son los iones  $\text{NO}_3^-$  y en menor medida el  $\text{NH}_4^+$ . El movimiento del N dependerá de la cantidad de nitrógeno aplicado como purín, la tasa de mineralización de la fracción orgánica del nitrógeno del suelo y del fertilizante (purín), del volumen de agua de drenaje y por la absorción de nitrógeno por los cultivos. La tabla 4.37, presenta los valores promedio simulados de nitrógeno lixiviado y el porcentaje de nitrógeno lixiviado respecto a la tasa de aplicación, para diferentes texturas de suelo y macro regiones, en presencia de cultivos.

**Tabla 4.37. Valores promedio anual de nitrógeno lixiviado ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) y porcentaje por textura y macro región, en presencia de cultivo. Valores simulados.**

Macro zona centro				
Tasa ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )	2500	1600	700	400
Suelo arenoso	1.327 (53%)	653 (41%)	10 (1%)	19 (5%)
Suelo franco arcillo arenoso	1.226 (49%)	553 (35%)	8 (1%)	4 (1%)
Suelo franco arcilloso	1.292 (52%)	630 (39%)	17 (2%)	4 (1%)
Macro zona centro sur				
Tasa ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )	2500	1600	700	400
Suelo franco arenoso	1.286 (51%)	646 (40%)	57 (8%)	37 (9%)
Suelo arcillo limoso	1.216 (49%)	595 (37%)	13 (2%)	2 (0,5%)
Suelo franco limoso	1.421 (57%)	746 (47%)	86 (12%)	18 (4,5%)
Macro zona sur				
Tasa ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )	2500	1600	700	400
Suelo arcilloso	1.706 (68%)	1.033 (64%)	358 (51%)	133 (33%)
Suelo franco arcillo limoso	1.783 (71%)	1.102 (69%)	420 (60%)	193 (48%)
Suelo franco	1.651 (66%)	973 (61%)	293 (42%)	111 (28%)

De la tabla 4.37 se observa que, de norte a sur, los valores simulados de lixiviación aumentan. Esta tendencia puede ser explicada por que la mineralización del nitrógeno disminuye desde la macro región centro hacia la centro sur, por lo que habría menos nitrógeno mineralizado disponible para ser lixiviado. Sin embargo, la lixiviación de nitratos aumenta en la macro región

sur debido a la presencia de suelos con altos contenidos de materia orgánica que aportan una carga importante de nitrógeno susceptible de ser lixiviado. Otra condición que podría justificar los valores de lixiviación encontrados, es la disminución de la absorción de nitrógeno a medida que se avanza hacia la macro región sur. Esta disminución trae como consecuencia un aumento del nitrógeno susceptible de ser lixiviado y por último, las condiciones climáticas que favorecen las precipitaciones hacia el sur de nuestro país, aumentan la probabilidad de drenaje y por consiguiente el potencial de lixiviación de nitratos.

La tabla 4.38 muestra valores promedio simulados de nitrógeno lixiviado y el porcentaje de nitrógeno lixiviado respecto a la tasa de aplicación, para diferentes texturas de suelo y macro regiones, en ausencia de cultivos.

**Tabla 4.38. Valores promedio anual de nitrógeno lixiviado ( $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) y porcentaje sobre lo aplicado, por textura y macro región, en ausencia de cultivo. Valores simulados.**

Macro zona centro				
Tasa ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ )	2500	1600	700	400
Suelo arenoso	1.507 (60%)	984 (62%)	459 (66%)	292 (73%)
Suelo franco arcillo arenoso	1.141 (46%)	707 (44%)	301 (43%)	181 (45%)
Suelo franco arcilloso	1.513 (61%)	475 (30%)	223 (32%)	143 (36%)
Macro zona centro sur				
Tasa ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ )	2500	1600	700	400
Suelo franco arenoso	1.817 (73%)	1.152 (72%)	505 (72%)	306 (76%)
Suelo arcillo limoso	447 (18%)	221 (14%)	99 (14%)	62 (16%)
Suelo franco limoso	1.820 (73%)	1.196 (75%)	569 (81%)	370 (93%)
Macro zona sur				
Tasa ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ )	2500	1600	700	400
Suelo arcilloso	2.069 (83%)	1.393 (87%)	718 (>100%)	503 (>100%)
Suelo franco arcillo limoso	2.114 (85%)	1.438 (90%)	762 (>100%)	546 (>100%)
Suelo franco	1.991 (80%)	1.312 (82%)	634 (91%)	417 (>100%)

Los valores simulados de lixiviación para condiciones de suelo desnudo, son mayores a los valores de lixiviación en presencia de cultivos. Williams y Kissel (1991), señalan que el drenaje y la lixiviación de nitratos aumentan cuando no existe presencia de cultivos siendo ambos procesos, sólo función de la textura de los suelos. Meisinger y Randall, (1991), mencionan que la pérdida

de nitrógeno se facilita en suelos húmedos, pero principalmente dependerá de las condiciones climáticas y propiedades del suelo. Esto explicaría que en la macro zona sur exista sobre un 100% de lixiviación sobre lo aplicado cuando se utilizan tasas menores a  $700 \text{ kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , debido a altas precipitaciones y presencia de altos índices de materia orgánica en sus suelos (aporte por mineralización).

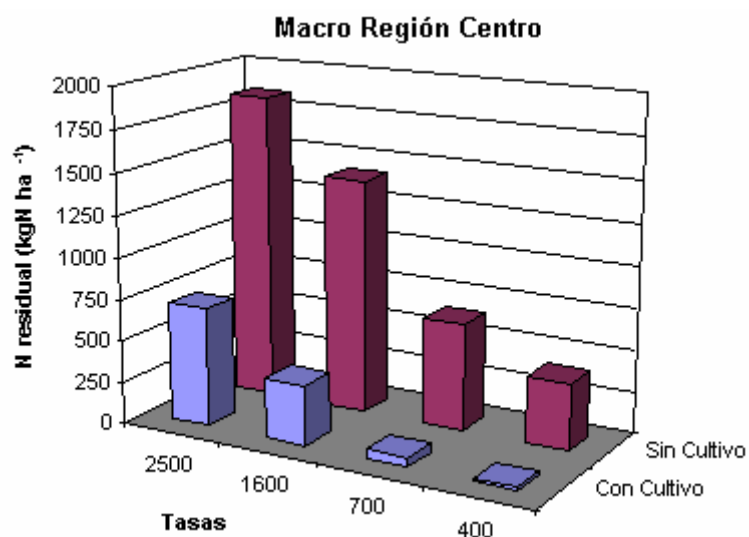
Del análisis de las tablas 4.37 y 4.38, podemos inferir que la lixiviación disminuye en presencia de cultivos y aumenta en ausencia de ellos; disminuye a medida que las tasas de aplicación de nitrógeno disminuyen y son menores en macro regiones ubicadas hacia el norte de nuestro país. Se observa además, que en suelos de textura arenosa los valores de lixiviación son mayores. Para tasas de aplicación de nitrógeno altas ( $2.500$  y  $1.600 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y en suelos de textura arcillosa, los niveles de lixiviación son menores, ya que el drenaje es más lento, lo que retarda el desplazamiento del nitrógeno, hasta que aumente el agua de drenaje por eventos de precipitación o riego, descargando cantidades considerables de nitratos. Sin embargo para tasas de aplicación más bajas ( $700$  y  $400 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), los suelos arcillosos presentan índices más bajos de lixiviación que los suelos con texturas más arenosas.

- **Nitrógeno residual:** La diferencia entre aportes y pérdidas, corresponde al nitrógeno residual. Este nitrógeno puede permanecer en el suelo para ser absorbido por el siguiente cultivo, o bien, lixiviar producto del drenaje resultante de precipitaciones o riego. La tabla 4.39, y las figuras 4.19, 4.20 y 4.21, muestran los valores simulados de nitrógeno residual en presencia y ausencia de cultivos, tasa de aplicación y macro región.

**Tabla 4.39. Promedio anual de nitrógeno residual por macro región (kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), con y sin presencia de cultivos. Valores simulados.**

Macro Región Centro		
Tasa (kg N ha <sup>-1</sup> )	Con Cultivo	Sin Cultivo
2.500	713	1841
1.600	362	1413
700	57	645
400	17	404
Macro Región Centro Sur		
Tasa (kg N ha <sup>-1</sup> )	Con Cultivo	Sin Cultivo
2.500	537	1237
1.600	270	905
700	38	415
400	12	264
Macro Región Sur		
Tasa (kg N ha <sup>-1</sup> )	Con Cultivo	Sin Cultivo
2.500	384	792
1.600	185	519
700	114	278
400	87	196

La figura 4.19, compara los valores de nitrógeno residual para la macro región centro, bajo distintas tasas de aplicación y en presencia y ausencia de cultivos. El promedio de los valores simulados de nitrógeno residual fue obtenido sumando el nitrógeno residual de cada horizonte del perfil del suelo hasta profundidades que fluctuaron entre 78 y 120 cm.

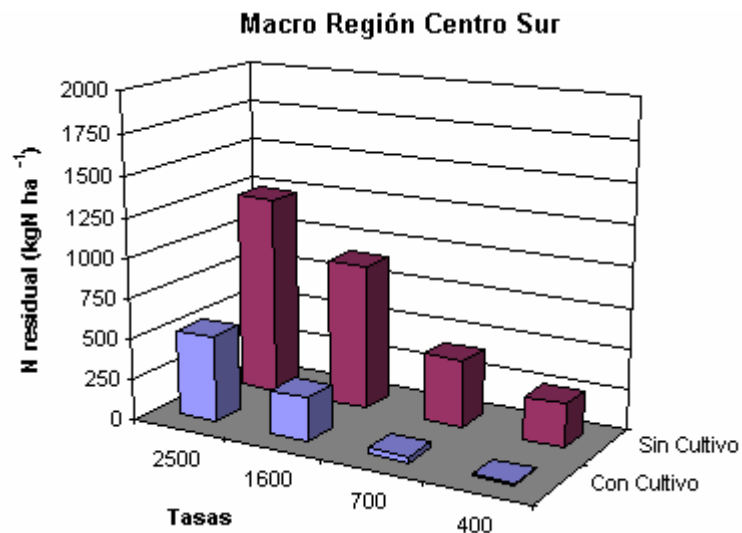


**Figura 4.19. Nitrógeno residual (kg N ha<sup>-1</sup>), para la macro región centro.**

Se observa de la figura 4.19, que el nitrógeno residual aumenta para la macro zona centro, a medida que las tasas de aplicación de nitrógeno se incrementan. Un análisis de la macro zona centro permite deducir que para las tasas de 2.500 y 1.600 kg N ha<sup>-1</sup> los cultivos funcionan como extractores de nitrógeno, sin embargo éstos no son capaces de absorber más que su potencial extractivo, originándose cantidades importantes de nitrógeno remanente. Con aplicaciones de 700 y 400 kg N ha<sup>-1</sup>, el nitrógeno residual disminuye considerablemente debido a que las cantidades de nitrógeno aplicado no son muy superiores a la absorción, originándose bajas cantidades de nitrógeno residual. La ausencia de cultivos aumenta los valores de nitrógeno residual, observándose grandes cantidades remanentes en los suelos de esta macro región, debido a que no existe riego y los aportes de agua por precipitaciones son de baja frecuencia y cantidad.

La figura 4.20, compara los valores de nitrógeno residual para la macro región centro sur, bajo distintas tasas de aplicación y en presencia y ausencia de cultivos. El promedio de los valores simulados de nitrógeno residual fue obtenido sumando el nitrógeno residual de cada horizonte del perfil de suelo hasta profundidades que fluctuaron entre 55 y 120 cm.

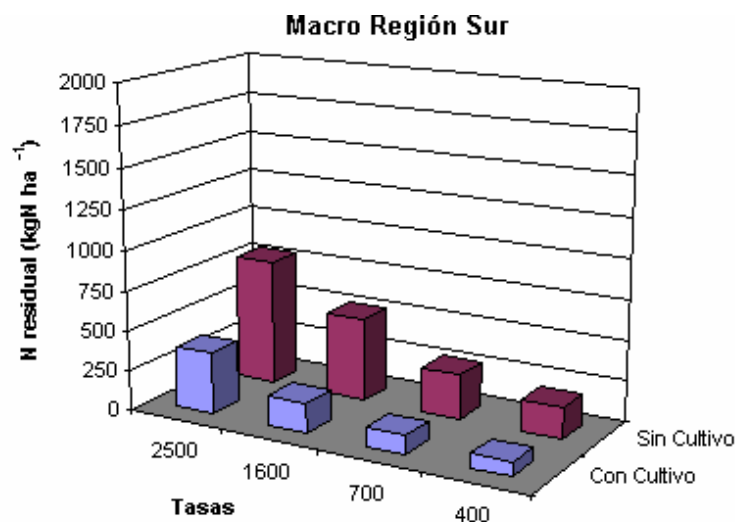




**Figura 4.20:** Nitrógeno residual ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ), para la macro región centro sur.

El comportamiento de nitrógeno residual presentado en la figura 4.20, es similar al demostrado en la macro región centro; sólo la disminución de los valores de nitrógeno residual hacen la diferencia. Para tasas de aplicación entre 700 y 400  $\text{kg N ha}^{-1}$ , los valores de nitrógeno residual son considerablemente menores que en ausencia de cultivos.

La figura 4.21, compara los valores del nitrógeno residual en la macro región sur, para distintas tasas de aplicación y en presencia y ausencia de cultivos. El promedio de los valores simulados de nitrógeno residual fue obtenido sumando el nitrógeno residual de cada horizonte del perfil de suelo hasta profundidades que fluctuaron entre 55 y 140 cm.



**Figura 4.21.** Nitrógeno residual ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ), para la macro región sur.

Se observa de la figura 4.21, que el nitrógeno residual aumenta a medida que las tasas de aplicación de nitrógeno se incrementan. Los valores en general, para todas las tasas, son inferiores a los observados en las macro regiones centro y centro sur, presumiblemente por un mayor drenaje debido a mayores precipitaciones. Los valores de nitrógeno residual observados para tasas de aplicación entre los 700 y 400  $\text{kg N ha}^{-1}$  y presencia de cultivos, son comparativamente mayores a los encontrados en las macro regiones centro y centro sur. Esto se explicaría debido a que los rendimientos alcanzados en esta macro región fueron menores a los de las otras macro zonas, y los rendimientos de biomasa están directamente relacionados con la extracción de nitrógeno, y por ende, con el nitrógeno residual.

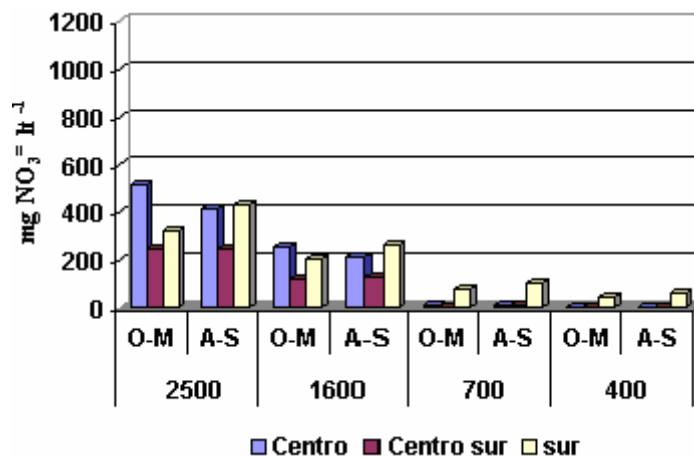
Por lo tanto, de la información analizada se que el nitrógeno residual está relacionado directamente con la cantidad de nitrógeno aplicado; que la potencialidad de los cultivos como agentes extractores de nitrógeno son un importante factor a considerar en la disminución de nitrógeno residual y que el aumento de las precipitaciones hacia zonas del sur de Chile, podrían ser las responsables de la disminución del nitrógeno residual por un aumento del drenaje y la lixiviación de éste.

### **Lixiviación de nitrógeno por periodo.**

El nitrógeno residual, resultante de la dinámica particular de cada combinación suelo-rotación-clima, está disponible para ser utilizado por el siguiente cultivo o ser lixiviado si se dan las condiciones apropiadas. Este nitrógeno residual tiene un comportamiento diferente, dependiendo fundamentalmente de la época del año donde éste se manifieste. Para poder acercarse a establecer un rango, ambientalmente sustentable, de las tasas de aplicación de nitrógeno en forma de purín de cerdo, se requiere analizar la relación temporal entre drenaje de agua y lixiviación de nitrógeno, lo que fue estimado mediante la concentración media de nitrato del agua de drenaje, ambos valores simulados por el modelo. Este análisis es el resultado de las combinaciones entre los distintos factores que integra el modelo y da orientaciones, para cada zona bajo análisis y distintas rotaciones de cultivo, sobre los valores esperados de concentración de nitratos en el agua de drenaje y las tasas de aplicación de nitrógeno como purín. No obstante, este criterio por sí sólo, no es suficiente para establecer exhaustivamente la sustentabilidad de una aplicación, en lo que intervienen aspectos como la recarga de los acuíferos, la dinámica del agua subterránea y la contribución de una fuente respecto a otras, en la misma cuenca hidrográfica.

Para estimar las concentraciones esperadas se desarrolló un análisis que combinó el nitrógeno lixiviado y el drenaje, calculándose la concentración media de nitrógeno en el agua de drenaje, dividiendo el año en cinco períodos, cada uno de ellos representativos de ciertas condiciones. Estos períodos fueron octubre-marzo (primavera-verano), abril-septiembre (otoño-invierno), marzo-abril (otoño), abril-junio (otoño) y julio-septiembre (invierno). El análisis consideró características de suelo, presencia y ausencia de cultivo y tasas de aplicación de nitrógeno en forma de purín.

La figura 4.22, muestra los valores simulados promedio de concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el agua de drenaje, entre los periodos de octubre-marzo (O-M) y abril-septiembre (A-S), para una rotación de maíz-avena, distintas tasas de aplicación y macro zonas.



**Figura 4.22:** Concentración promedio de nitratos en el agua de drenaje, por periodos, para rotación maíz-avena, distintas tasas de aplicación y macro zonas (datos calculados desde datos simulados).

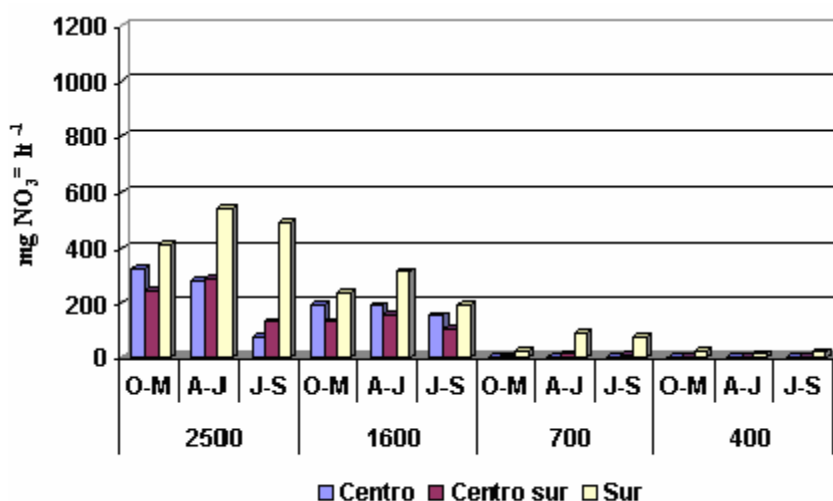
Se observa de la figura 4.22 que las mayores concentraciones de nitrato en el agua de drenaje, ocurren con las dos tasas de aplicación más elevadas para todas las macro regiones. Los rangos de concentración de nitratos en el agua de drenaje varían dependiendo de la tasa de aplicación, observándose que en tasas de 2.500 kg N ha<sup>-1</sup>, las concentraciones máximas por año alcanzan 929, 495 y 757 mg lt<sup>-1</sup>, para las macro zonas centro, centro sur y sur respectivamente. De igual forma, para las macro zonas centro, centro sur y sur, en tasas de 1.600 kg N ha<sup>-1</sup> las concentraciones máximas totales por año alcanzan los 473, 252 y 469 mg lt<sup>-1</sup>, respectivamente.

Desde el periodo octubre-marzo (O-M), al periodo abril-septiembre (A-S) existe una disminución aproximada del 19% en la concentración de nitratos en el agua de drenaje, para la macro región centro; no observándose una variación en la concentración de nitratos para la macro región centro sur; y aumenta aproximadamente un 30% la concentración de nitratos en el agua de drenaje en la macro región sur.

La tendencia antes discutida, se repite para cada tasa de aplicación, por lo que se puede señalar que, en general, para la macro región centro la concentración de nitratos en el agua de drenaje es

comparativamente superior, producto de menores cantidades de agua de drenaje en dicho período (evapotranspiración en su máximo). Para la macro región centro sur, las concentraciones de nitrato en el agua de drenaje no varían notoriamente en ambos periodos. Por último, la macro región sur, debido a la presencia de periodos más prolongados de precipitaciones entre los meses de octubre-marzo (O-M), muestra concentraciones menores de nitratos en el agua de drenaje (efecto de dilución), los que aumentan en los meses de abril-septiembre (A-S) presumiblemente por la ausencia de cultivo (avena) en este periodo.

La figura 4.23, muestra los valores simulados promedio de concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el agua de drenaje, entre los periodos de octubre-marzo (O-M), marzo-abril (M-A) y julio-septiembre (J-S), para una rotación de alfalfa, distintas tasas de aplicación y macro zonas.

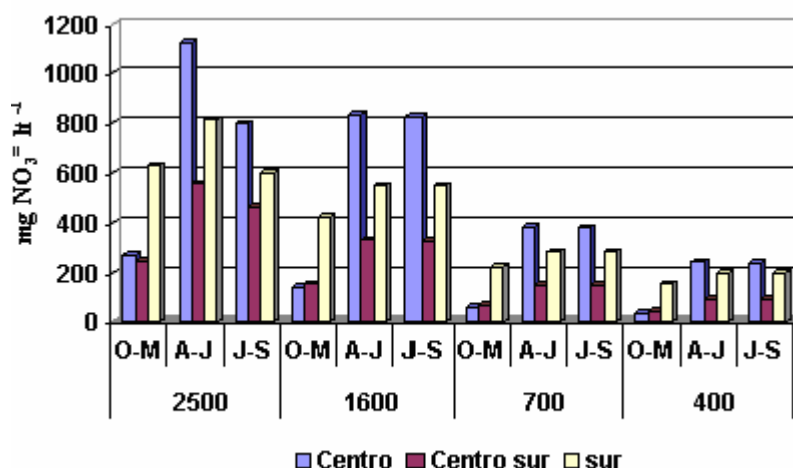


**Figura 4.23.** Concentración promedio de nitratos en el agua de drenaje, por periodos, para rotación de alfalfa, distintas tasas de aplicación y macro zonas (datos calculados desde datos simulados).

Las máximas concentraciones de nitratos en el agua de drenaje, presentadas en la figura 4.23, ocurren con tasas de aplicación de 2.500 y 1.600  $\text{kg N ha}^{-1}$ , originando concentraciones totales de nitratos en el agua de drenaje por año de 887 y 540  $\text{mg l}^{-1}$  para la macro región centro, de 736 y 382  $\text{mg l}^{-1}$  para la macro región centro sur y de 1.274 y 751  $\text{mg l}^{-1}$  para la macro región sur.

En el análisis por periodos, se observa que las concentraciones de nitratos de las macro regiones centro y centro sur, presentan una similitud en sus valores. Sin embargo, para la macro región sur, entre los periodos abril-junio (A-J) y julio-septiembre (J-S), las concentraciones de nitrato en agua de drenaje aumentan considerablemente, debido probablemente a una disminución en la extracción de nitrógeno por disminución de rendimientos en biomasa, atribuibles al mayor periodo de latencia de la alfalfa en macro zonas más frías.

La figura 4.24 muestra los valores simulados promedio de concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) en el agua de drenaje, entre los periodos octubre-marzo (O-M), abril-junio (A-J) y julio-septiembre (J-S), para suelo desnudo, distintas tasas de aplicación y macro zonas.



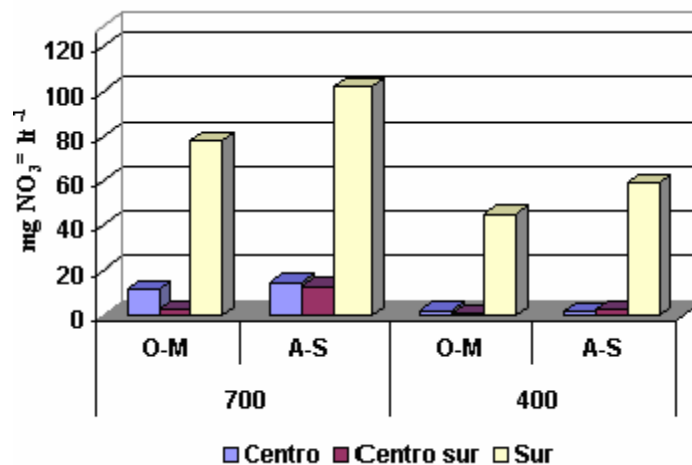
**Figura 4.24.** Concentración promedio de nitratos en el agua de drenaje, por periodos, para suelo desnudo, distintas tasas de aplicación y macro zonas (datos calculados desde datos simulados).

Un comportamiento similar al de los cultivos presenta el suelo desnudo, con máximas concentraciones de nitratos en el agua de drenaje en tasas altas de aplicación de 2.500 y 1.600 kg N ha<sup>-1</sup>, las que originan concentraciones totales de nitratos en el agua de drenaje por año de 2.511 y 1.803 mg lt<sup>-1</sup> para la macro región centro, de 1.358 y 809 mg lt<sup>-1</sup> para la macro región centro sur y de 2.259 y 1.517 mg lt<sup>-1</sup> para la macro región sur.

La rotación de cultivos de maíz-avena presentó niveles levemente mayores de concentración de nitratos en agua de drenaje que rotaciones de alfalfa. Bajo condiciones de suelo desnudo, los valores de concentración de nitratos en agua de drenaje son claramente mayores a los calculados en presencia de cultivos, disminuyendo éstos a medida que se avanza hacia la macro región sur. Las características climáticas inciden en la concentración de nitratos en el agua de drenaje, obteniéndose, entre los periodos abril-junio (A-J) y julio-septiembre (J-S), mayores concentraciones en zonas de pocas precipitaciones y bajas concentraciones en zonas de alta pluviosidad. No obstante, en estos periodos, la macro región sur presenta una situación especial, al exhibir altos valores de concentración de nitratos en el agua de drenaje en periodos de máximo drenaje, lo que podría ser justificado por el aporte de nitrógeno mineralizado desde la materia orgánica de los suelos de esta macro zona.

Considerando que los niveles de lixiviación disminuyen ostensiblemente para tasas de aplicación de 700 y 400 kg N ha<sup>-1</sup>, se realizará un análisis más focalizado y considerando una menor escala, a objeto de discriminar mejor los valores de concentración de nitratos en el agua de drenaje, con tasas bajas de aplicación.

La figura 4.25, muestra la concentración promedio de nitratos en el agua de drenaje (mg lt<sup>-1</sup>), para tasas de aplicación de 700 y 400 kg N ha<sup>-1</sup>, rotación de maíz-avena y en dos periodos, octubre-marzo (O-M) y abril-septiembre (A-S), que representan el periodo de desarrollo de los cultivos de maíz y avena respectivamente.



**Figura 4.25.** Concentración promedio de nitratos en agua de drenaje, por periodos para tasas bajas de aplicación, para maíz-avena y distintas macro zonas (datos calculados desde datos simulados).

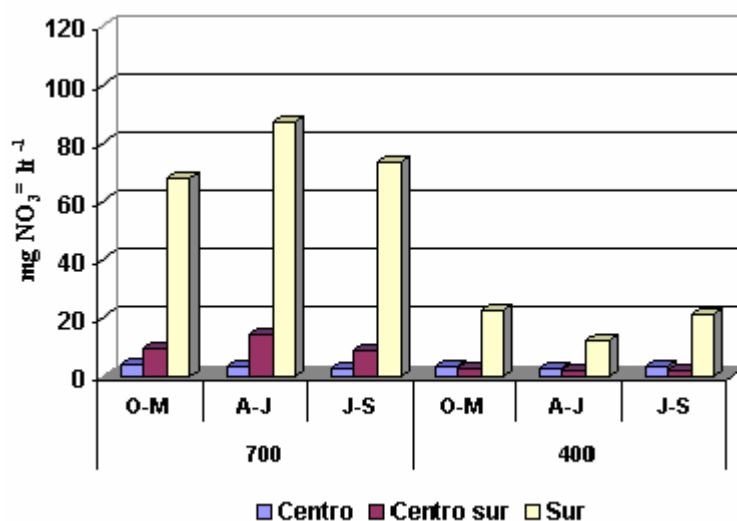
Se puede observar que los valores de concentración de nitratos son directamente proporcionales a ambas tasas de aplicación. En el periodo octubre-marzo (O-M), los valores de concentración son comparativamente menores a los exhibidos en el periodo abril-septiembre (A-S). Esto podría explicarse debido a que el cultivo de maíz extrae bastante nitrógeno y por la eventual dilución de los nitratos en el drenaje debido a los aportes de agua de riego (aproximadamente 800 mm en el periodo O-M). El periodo abril-septiembre (A-S), se encuentra una mayor concentración, lo que podría atribuirse a una menor capacidad relativa de la avena para extraer nitrógeno y a la presencia de nitrógeno residual, lo que contribuye a la formación de nitratos potenciando los procesos de lixiviación.

Al comparar ambas tasas de aplicación, para la rotación maíz-avena, se infiere que con aplicaciones de 700 kg ha<sup>-1</sup> de nitrógeno en forma de purín, el balance entre aplicación y extracción de nitrógeno produce eventos de lixiviación teóricos con concentraciones totales por año del orden de los 26,3 a 15,7 mg lt<sup>-1</sup> de nitrato para la macro región centro y centro sur respectivamente, mayores a los exhibidos con aplicaciones de 400 kg N ha<sup>-1</sup>. Con aplicaciones de 400 kg N ha<sup>-1</sup>, debido a que la extracción de nitrógeno es cercana a la cantidad aplicada, por mineralización puede existir un remanente de nitrógeno que origina eventos anuales de



lixiviación de baja magnitud con concentraciones totales de entre 3,75 y 3,64 mg lt<sup>-1</sup>, en las macro regiones centro y centro sur respectivamente. Sin embargo, la macro región sur presenta una tendencia similar a las otras macro regiones, pero con magnitudes más elevadas, alcanzando concentraciones totales por año del orden de los 180,6 y 104,1 mg lt<sup>-1</sup> para tasas de aplicación de 700 y 400 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente, lo que puede ser atribuible a la mineralización de nitrógeno de la materia orgánica, abundante en estos suelos.

La figura 4.26, muestra la concentración promedio de nitratos en el agua de drenaje (mg lt<sup>-1</sup>), para tasas de aplicación de 700 y 400 kg N ha<sup>-1</sup>, entre los periodos de octubre-marzo (O-M), marzo-abril (M-A) y julio-septiembre (J-S), para rotación de alfalfa, en las macro regiones centro, centro sur y sur.



**Figura 4.26.** Concentración promedio de nitratos en agua de drenaje, por periodos, para tasas bajas de aplicación, para alfalfa y distintas macro zonas (datos calculados desde datos simulados).

La concentración promedio de nitratos en el agua de drenaje es, para todos los periodos, superior para tasas de aplicación de 700 kg N ha<sup>-1</sup> que para 400 kg N ha<sup>-1</sup>. Por periodos se observa que para una tasa de aplicación de 700 kg N ha<sup>-1</sup>, los valores de concentración son mayores en el periodo de abril-junio (A-J) que en el periodo octubre-marzo (O-M), probablemente debido a la

presencia de nitratos derivados del nitrógeno residual del cultivo anterior. En el periodo julio-septiembre (J-S), se observa una leve disminución de los niveles de lixiviación, comparado con el periodo inmediatamente anterior, atribuible a una disminución de la presencia de nitratos acompañado por un aumento del drenaje (dilución). Las mínimas concentraciones se presentan en el periodo octubre-marzo (O-M), donde la extracción de nitrógeno por parte de la alfalfa es máxima, aun cuando en este periodo se realizan las aplicaciones de purines. Lo anterior se traduce en un total de concentraciones anuales de 10,0; 31,6 y 228,6 mg lt<sup>-1</sup>, para las macro regiones centro, centro sur y sur, respectivamente.

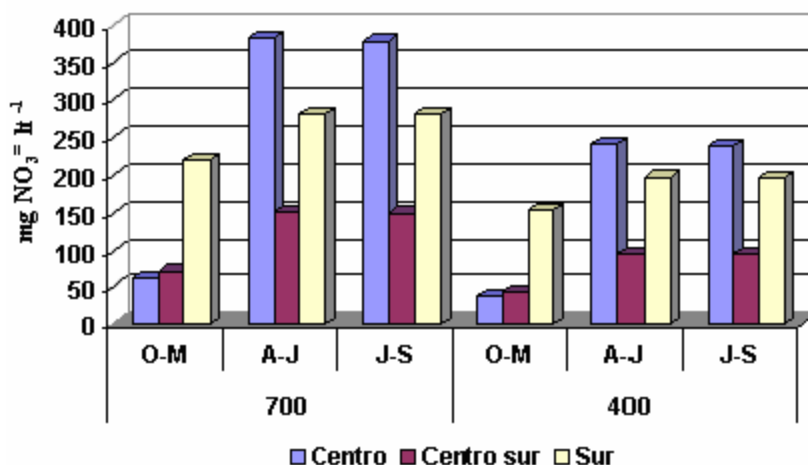
Para tasas de aplicación de 400 kg N ha<sup>-1</sup>, las concentraciones de nitrato disminuyen levemente desde la macro región centro hacia la centro sur para todos los periodos analizados, con una concentración total anual de 9,10 y 6,97 mg lt<sup>-1</sup> respectivamente. Sin embargo, existe un aumento significativo en la macro región sur, con una concentración total anual de 56,2 mg lt<sup>-1</sup>, esto presumiblemente por la presencia de suelos con abundancia de materia orgánica natural, la cual al mineralizarse, libera nitrógeno, que es lixiviado. Se observa además, en la figura 4.26, que las concentraciones por macro región se mantienen casi constantes, lo que podría ser explicado por la presencia de bajos contenidos de nitrógeno residual, debido a que las cantidades de nitrógeno aplicado no son muy superiores a las cifras de extracción de nitrógeno por los cultivos, existiendo para esta tasa, un límite muy cercano entre los aportes y las pérdidas de nitrógeno en el sistema suelo-planta-atmósfera, aún cuando pequeñas cantidades de nitrógeno remanente puedan ser lixiviadas.

En consecuencia, si se correlaciona la concentración de nitratos en el agua de drenaje con la lixiviación de nitrógeno, se observa que, para aplicaciones de 700 kg N ha<sup>-1</sup>, la lixiviación de nitratos para la macro región sur se mantiene relativamente constante, para todos los periodos. Igual tendencia muestran los valores de lixiviación de la macro región centro sur y sur, aunque presentan un leve aumento en el periodo abril-junio (A-J) por mayor drenaje, siempre mantienen una diferencia significativamente menor a los valores de lixiviación de la macro región sur. Para aplicaciones de 400 kg N ha<sup>-1</sup>, los valores de concentración de nitratos para la macro regiones centro son levemente menores a los de la macro región centro sur, considerando todos los

periodos en análisis. Sin embargo, la macro región sur evidencia valores notablemente mayores de lixiviación, probablemente debido a la mineralización del nitrógeno de materia orgánica que contribuye a la formación de nitratos.

Las rotaciones de maíz-avena y alfalfa no demostraron una variación significativa en los valores de acumulación de biomasa, rendimiento y extracción de nitrógeno a partir de una tasa de aplicación superior a  $700 \text{ kg N ha}^{-1}$ . La presencia de cultivos es un factor importante en la disminución de nitrógeno residual en el perfil del suelo. El siguiente análisis demuestra la diferencia en la cantidad de nitrógeno residual disponible a ser lixiviado cuando no existen cultivos que realicen extracción.

La figura 4.27, muestra el promedio de valores simulados de concentración de nitratos ( $\text{mg lt}^{-1}$ ), para las tasas de aplicación de  $700$  y  $400 \text{ kg N ha}^{-1}$ , entre los periodos de octubre-marzo (O-M), abril-junio (A-J) y julio-septiembre (J-S), para suelo desnudo, para las macro regiones centro, centro sur y sur.



**Figura 4.27.** Concentración promedio de nitratos en agua de drenaje por periodos, para tasas bajas de aplicación, para suelo desnudo y distintas macro zonas (datos calculados desde datos simulados).

Existe una tendencia similar por periodo y tasas de aplicación, variando solo la magnitud de los valores de concentración de nitratos en el agua de drenaje. El periodo octubre-marzo (O-M), es el que presenta menores cantidades de lixiviación por insuficiencia de agua de drenaje que promueva eventos de lixiviación, exceptuando la macro región sur que posee mayores probabilidades de precipitaciones en ese periodo. Claramente entre los meses de abril y septiembre se producen eventos de lixiviación mayores debido a que el nitrógeno residual acumulado en los meses sin drenaje (O-M) queda disponible para ser lixiviado.

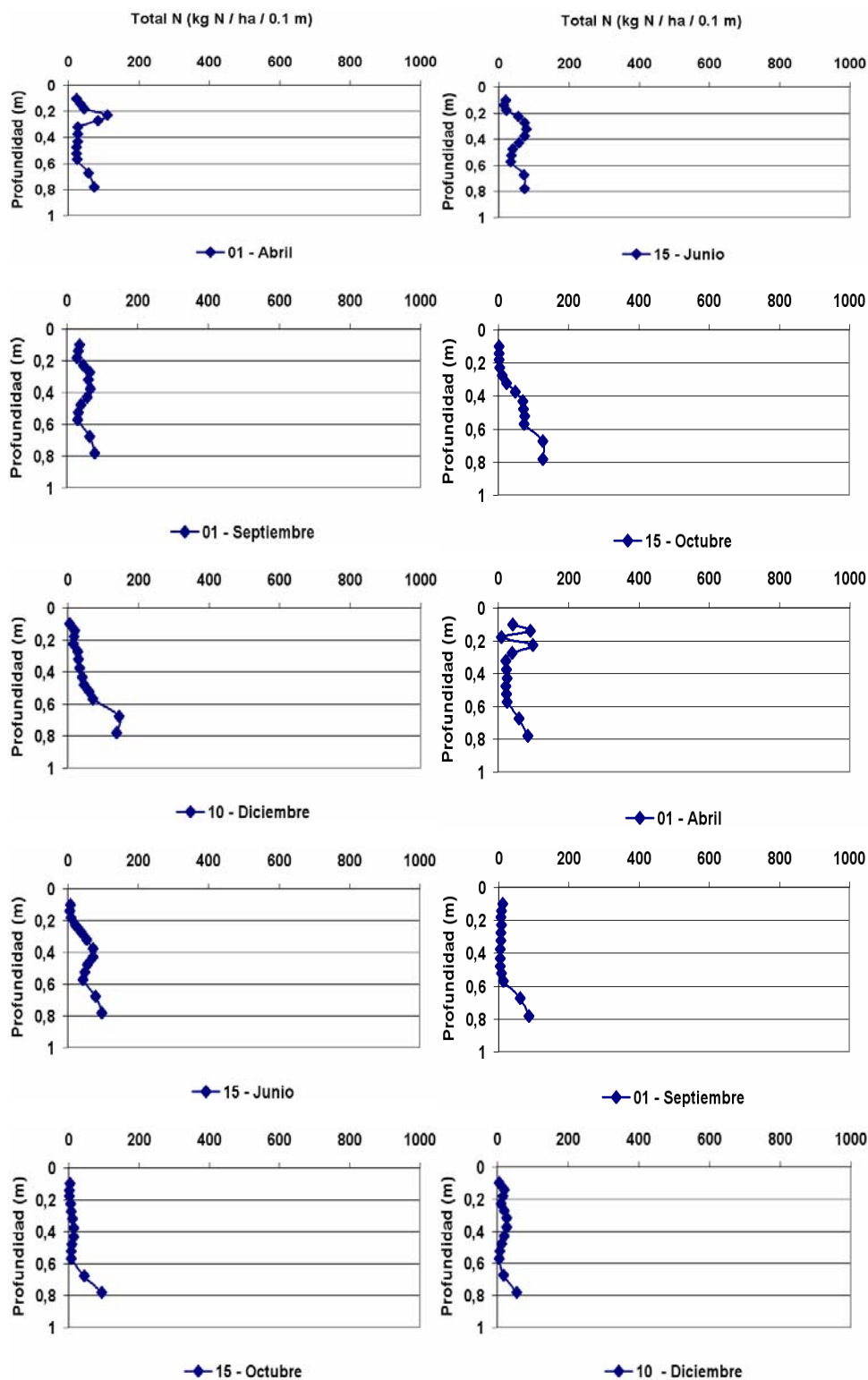
En la macro región centro los procesos de mineralización y los mayores contenidos de nitrógeno residual, permiten que los montos de lixiviación de nitratos en suelo desnudo sean potencialmente mayores a los simulados para las otras macro regiones, entre los meses de abril a septiembre. Se observa que para una tasa de  $700 \text{ kg N ha}^{-1}$ , las concentraciones totales de nitrato en el agua de drenaje por año son del orden de los 821, 369 y  $781 \text{ mg lt}^{-1}$  para las macro regiones centro, centro sur y sur respectivamente, disminuyendo a 561, 232 y  $546 \text{ mg lt}^{-1}$  para tasas de aplicación de  $400 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

### **Dinámica del nitrógeno en el perfil del suelo.**

El nitrógeno en el perfil de suelo tiene una dinámica que es función, entre otros factores, del clima, tipos de suelo, cultivo y tasas de aplicación. Esta dinámica produce como efecto la mayor abundancia relativa de nitrógeno en distintos períodos del año, o a diferente profundidad en el perfil del suelo. Esto trae como consecuencia la presencia de nitrógeno residual, o en su defecto, la lixiviación de nitrógeno cuando las condiciones son favorables.

El modelo tiene las capacidades para simular la dinámica de este elemento en el tiempo como resultado de la combinación de varios factores ambientales, de difícil evaluación en ensayos de terreno. En las figuras 4.28 a la 4.33 se muestra la dinámica simulada del nitrógeno en el perfil de suelo, para distintas fechas relacionadas con la fenología del cultivo y condiciones ambientales (fechas en invierno, otoño, verano y primavera), para una rotación de maíz-avena y de suelo

desnudo, con una tasa de aplicación de nitrógeno de  $1.600 \text{ kg ha}^{-1}$ . El período analizado considera la transición desde un año relativamente seco a otro más lluvioso, para las condiciones de las macro regiones centro, centro sur y sur. Los suelos utilizados para este análisis, fueron con características texturales intermedias. Para la macro región centro se utilizó un suelo franco arcillo arenoso, para la centro sur, un suelo arcillo limoso y para el sur, un suelo de textura franco arcillo limoso.



**Figura 4.28.** Contenido de nitrógeno en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1} 0,1 \text{ m}^{-1}$ ). Período continuo de año seco a lluvioso, para macro región centro y condición de rotación maíz-avena.

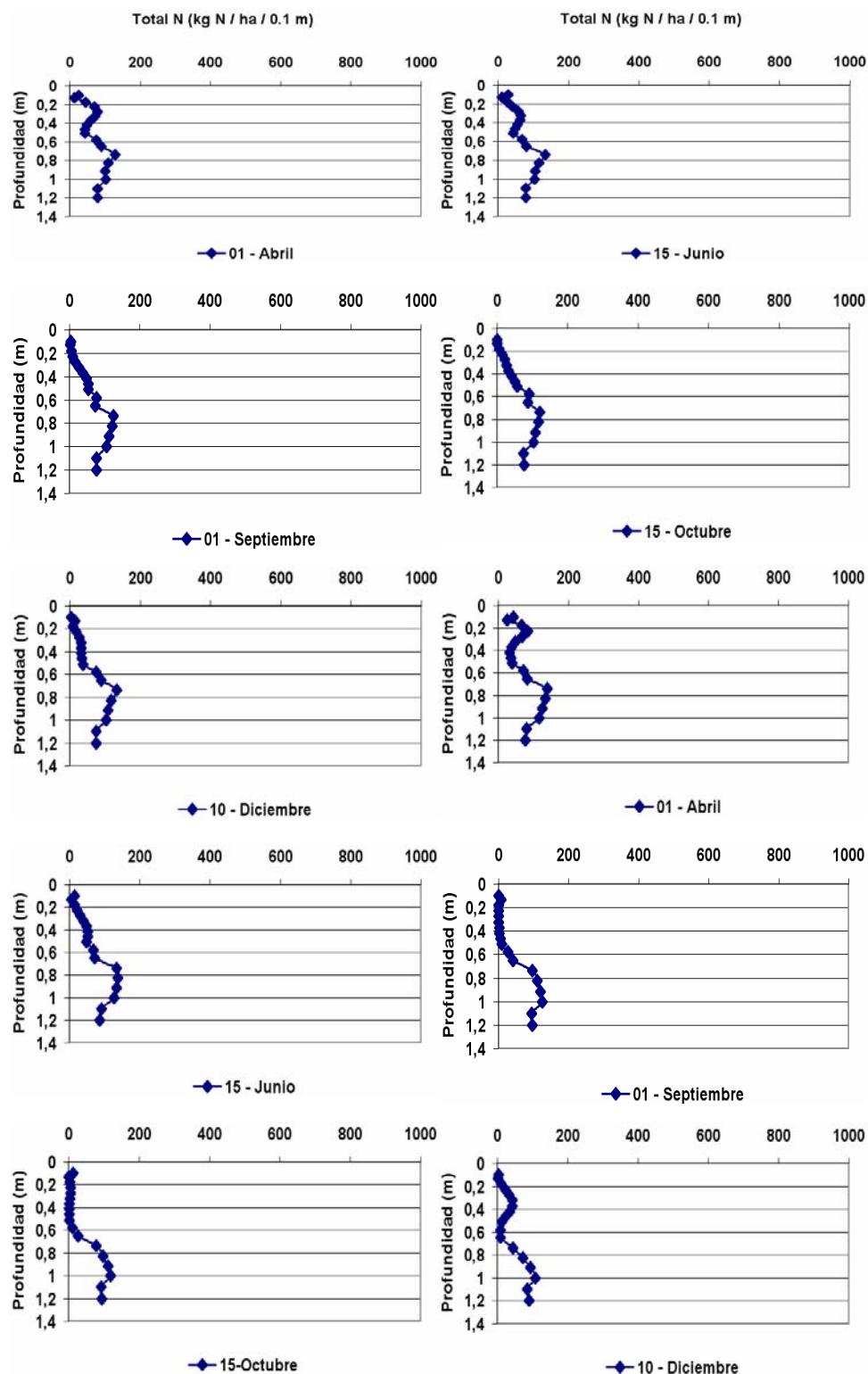
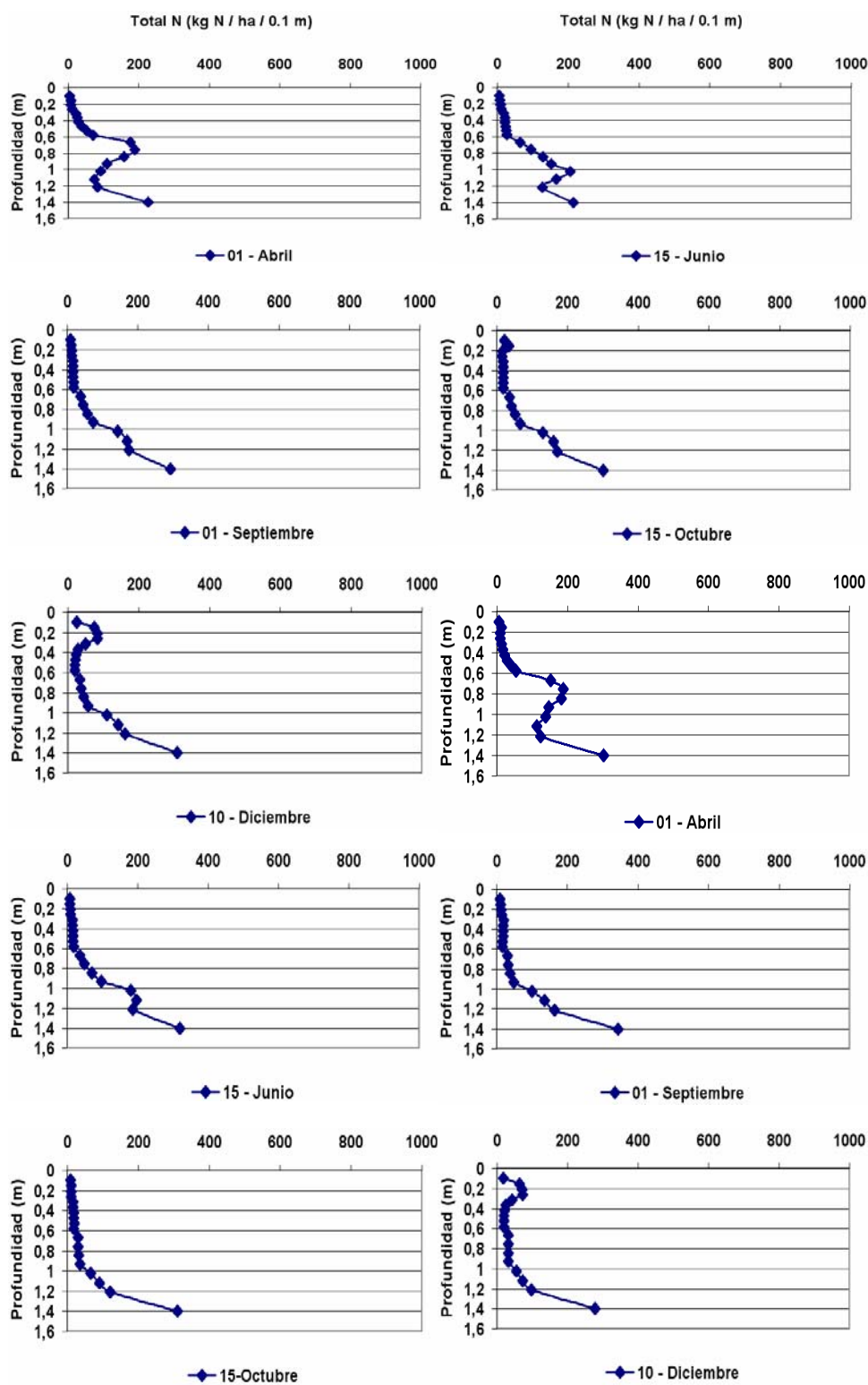
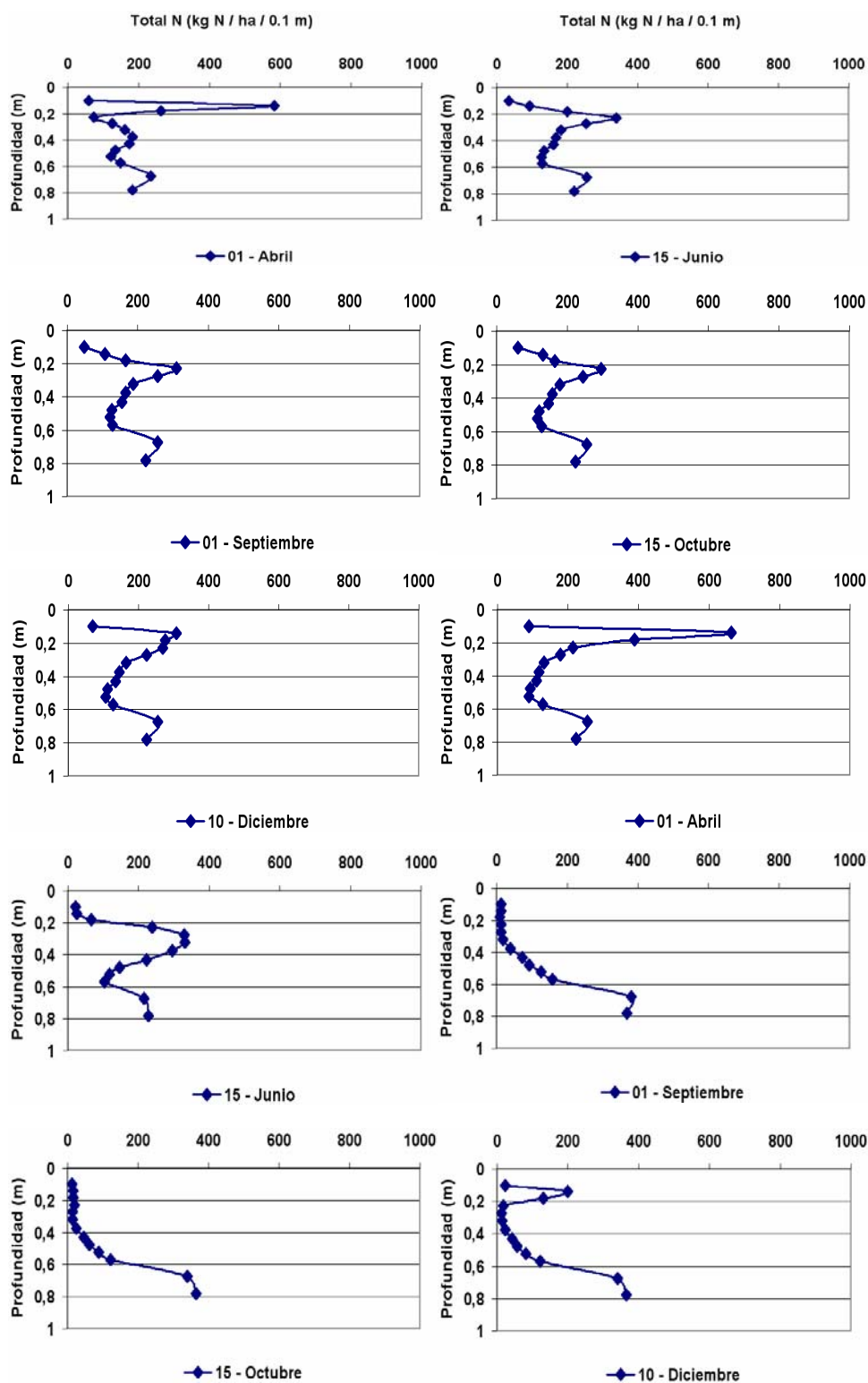


Figura 4.29. Contenido de nitrógeno en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1} 0,1 \text{ m}^{-1}$ ). Período continuo de año seco a lluvioso, para macro región centro sur y condición de rotación maíz-avena.



**Figura 4.30.** Contenido de nitrógeno en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1} 0,1 \text{ m}^{-1}$ ). Período continuo de año seco a lluvioso, para macro región sur y condición de rotación maíz (silo).





**Figura 4.31.** Contenido de nitrógeno en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1} 0,1 \text{ m}^{-1}$ ). Período continuo de año seco a lluvioso, para macro región centro y condición de rotación suelo desnudo.

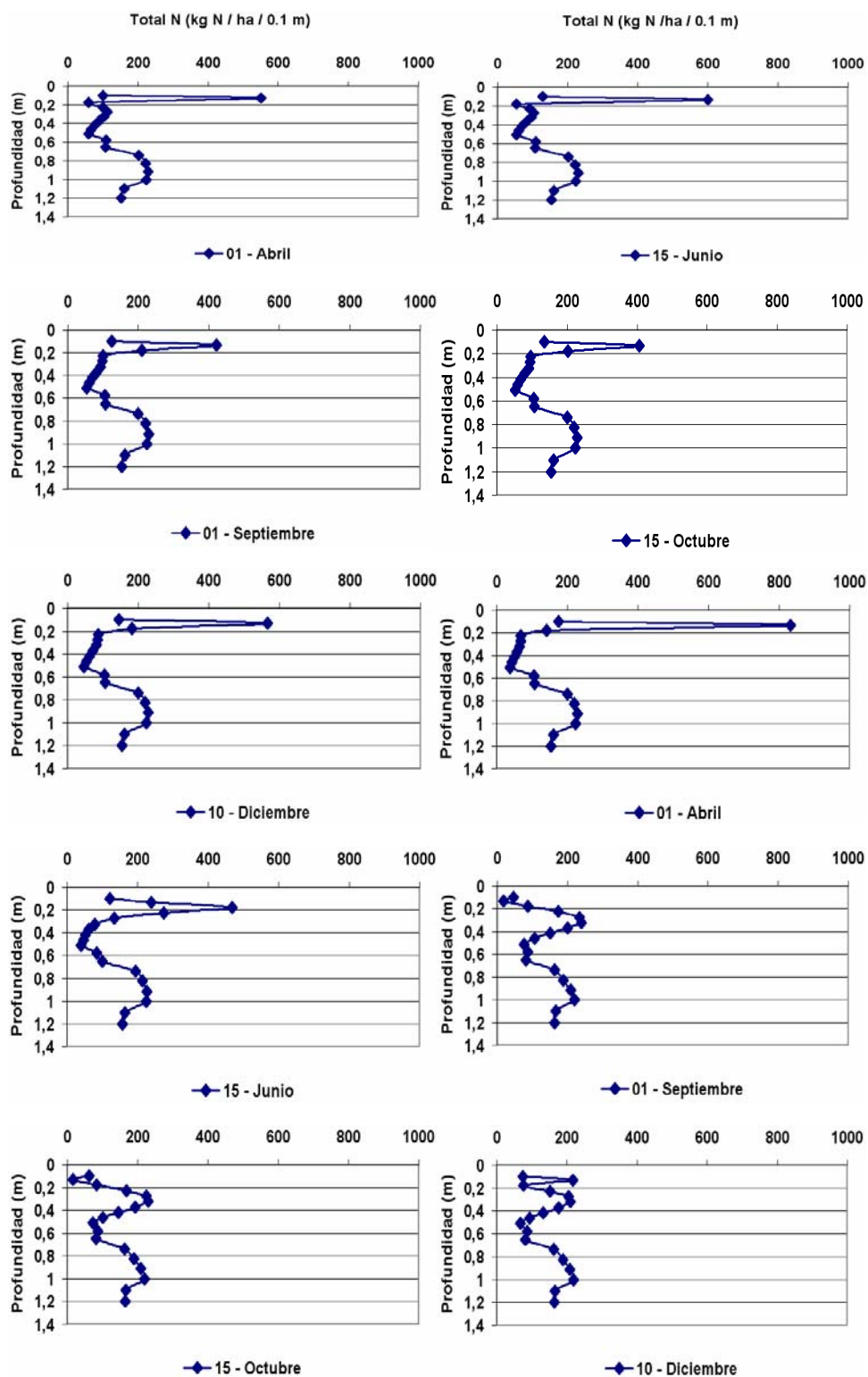
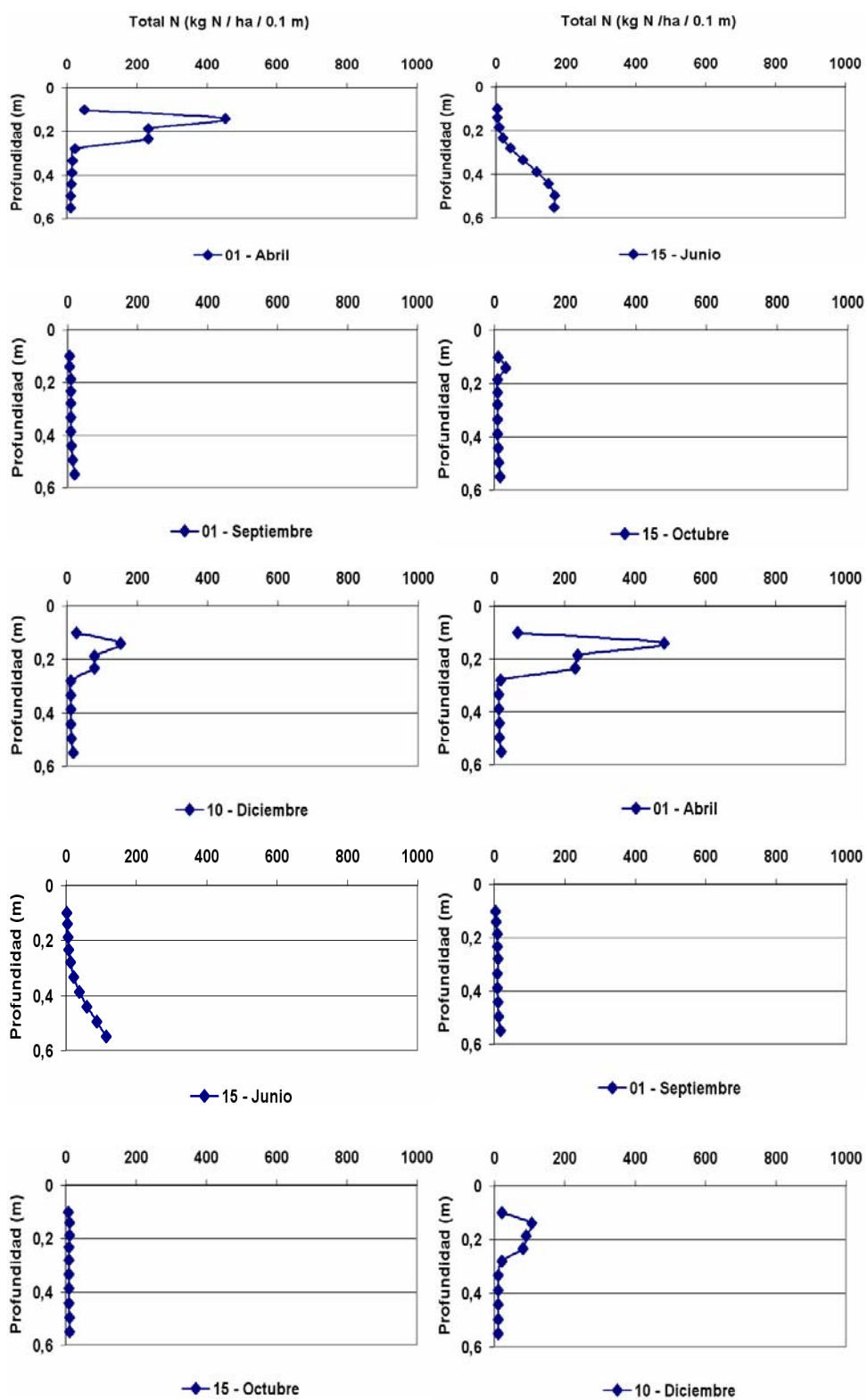


Figura 4.32. Contenido de nitrógeno en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1} 0,1 \text{ m}^{-1}$ ). Período continuo de año seco a lluvioso, para macro región centro sur y condición de rotación suelo desnudo.



**Figura 4.33.** Contenido de nitrógeno en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1} 0,1 \text{ m}^{-1}$ ). Período continuo de año seco a lluvioso, para macro región sur y condición de rotación suelo desnudo.

Al comparar la cantidad de nitrógeno total en el perfil de suelo ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ), bajo condiciones de suelo con cultivo (figuras 4.28, 4.29, 4.30) y suelo desnudo (Figuras 4.31, 4.32, 4.33), se observa una menor cantidad de nitratos en el perfil de suelo con cultivos para todas las épocas consideradas en el análisis, que bajo condición de sin cultivo o suelo desnudo. Al respecto, Peterson y Power (1991), señalan que un sistema de cultivo origina un mayor efecto para regular el movimiento de nitrato bajo la zona radicular y a través del perfil de suelo. De esta forma suelos con condiciones de cultivo reducen la concentración de nitrato al tiempo en que se está produciendo percolación, disminuyendo así el potencial de lixiviación. Por lo tanto, la presencia de cultivos es determinante en la extracción de nitrógeno y agua desde el suelo, disminuyendo considerablemente el potencial de lixiviación de este elemento, por dos vías: una disminuyendo las cantidades totales de nitrógeno en el perfil del suelo y, disminuyendo el potencial de drenaje, el cual arrastra el nitrógeno fuera de la zona de raíces.

Analizando ahora la dinámica del nitrógeno, se observa que en años más secos bajo condición de cultivo, entre los meses de octubre y abril, el nitrógeno residual producto de las aplicaciones de primavera-verano anterior es desplazado por efecto de los riegos. Este nitrógeno residual permanece en general, sin mucho movimiento por el período invernal del año seco. Bajo una condición sin cultivo, no se observa este desplazamiento, sí una acumulación en los primeros centímetros de profundidad dado que no existe riego. Para el siguiente año lluvioso, entre los meses de abril y septiembre, suelos con cultivo y desnudo, la cantidad de nitrógeno remanente de los meses de octubre y abril es desplazada por las precipitaciones, observándose que el desplazamiento del nitrógeno en profundidad es mayor en suelos desnudos que con cultivos, debido a que existe una mayor disponibilidad de nitrógeno residual y mayor oferta de agua para drenaje.

Más específicamente en la figura 4.28 se observa que el nitrógeno no es desplazado en profundidad en el año seco, si no hasta bien entrada la primavera, producto de los riegos. En el siguiente año, el nitrógeno residual en el suelo disminuye y es rápidamente lixiviado dado que corresponde a un año más lluvioso. La figura 4.29, correspondiente a la macro región centro sur, muestra que el nitrógeno remanente producto de las aplicaciones de primavera y verano, es

desplazado por efecto de las precipitaciones invernales hacia niveles más profundos del suelo (0,6 y 0,8 m), para luego iniciar una acumulación en primavera en los niveles superiores del suelo (0,2 y 0,4 m). Esto se produce dado que un año seco en el área centro sur presenta, en general, valores más altos de precipitación que en la zona centro. Para el siguiente año, de características lluviosas, durante el período abril-septiembre, existe un desplazamiento y una disminución de la cantidad de nitrógeno en los primeros centímetros de profundidad, observándose una acumulación a profundidades entre 0,8 y 1,2 m, para entonces en los meses de primavera verano, mostrar una nueva acumulación entre los 0,2 y 0,4 m de profundidad producto de las aplicaciones. Finalmente la figura 4.30, muestra que, en un año seco el nitrógeno residual se encuentre a una mayor profundidad, entre 0,6 y 0,8 m, que en la zona centro y centro sur, dado que la zona sur en verano presenta más altas precipitaciones que las dos áreas predecesoras. Se observa que el siguiente año lluvioso, el nitrógeno residual es rápidamente lixiviado a inicios de invierno.

En las figuras 4.31, 4.32, y 4.33, al comparar el nitrógeno residual bajo condiciones de suelo desnudo y año seco, se observa una importante acumulación de nitrógeno en los primeros centímetros de profundidad del suelo al término de verano y al principio de otoño, el que es desplazado más o menos en profundidad en invierno por las precipitaciones disponibles. En el siguiente año, dado a que es un año más lluvioso, el nitrógeno residual disminuye en el suelo ya que es rápidamente lixiviado. Peterson y Power (1991), señalan que una acumulación de nitratos en períodos donde el suelo se encuentre sin cultivo y con precipitaciones mayores a 250 mm, aumenta el potencial de lixiviación. Por lo tanto, se resalta el uso de cultivos para maximizar el consumo de agua por la planta y minimizar la cantidad de nitrógeno en el suelo.

### **Determinación de nuevos escenarios de simulación.**

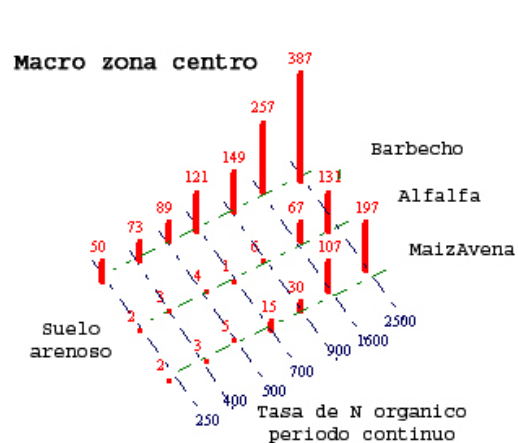
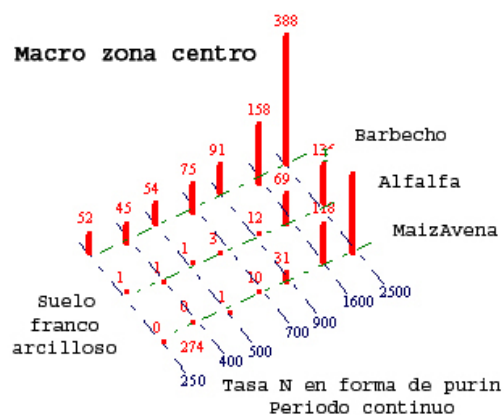
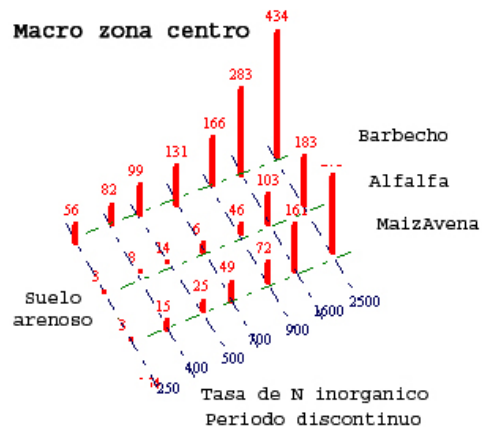
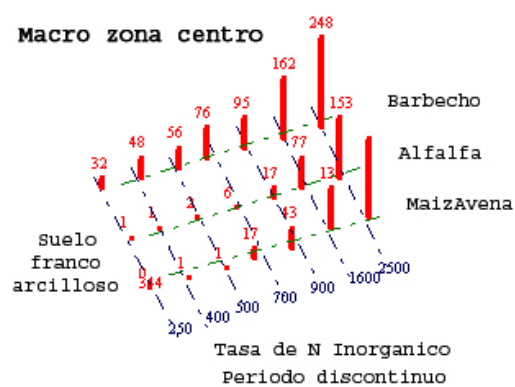
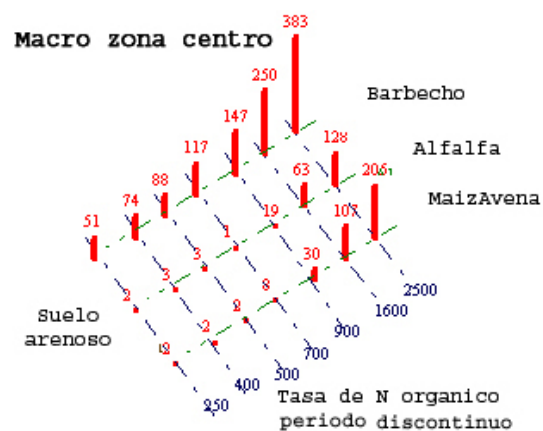
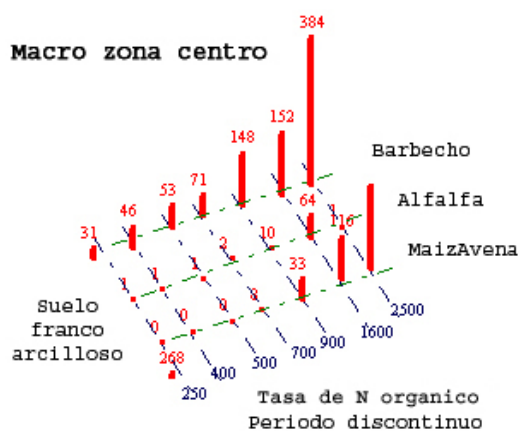
En una primera instancia el análisis estuvo centrado en la respuesta dinámica del nitrógeno en el suelo frente a tasas de aplicación de nitrógeno que tuviese como origen los purines de cerdo, de 400, 700, 1.600 y 2.500 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Adicionalmente, como fue indicado, la simulación con CropSyst sólo contempló la modalidad de aplicación discontinua, esto es, no se consideró la aplicación en período invernal.

A consecuencia de los buenos resultados y el análisis y validación de esta primera etapa, nacieron de este equipo de trabajo, en conjunto con el equipo de supervisión del SAG, nuevas inquietudes derivadas de la necesidad de responder de una manera más completa y con un mayor grado de precisión a la variedad de escenarios reales que surgen de la aplicación de nitrógeno al suelo en el largo plazo.

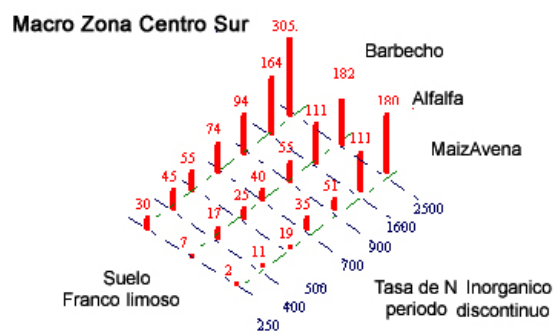
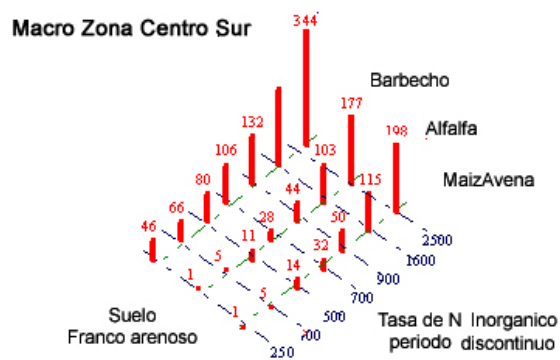
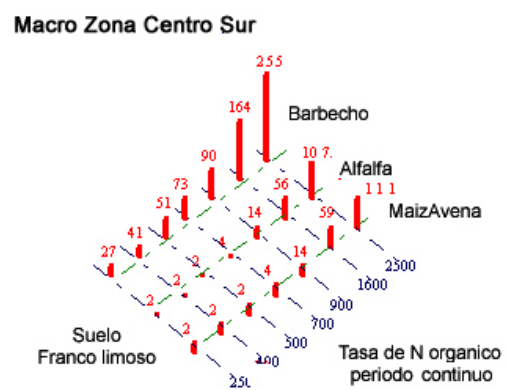
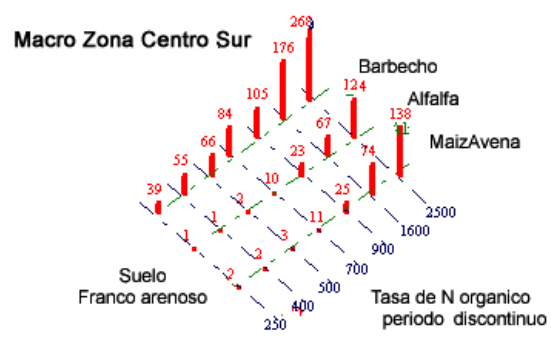
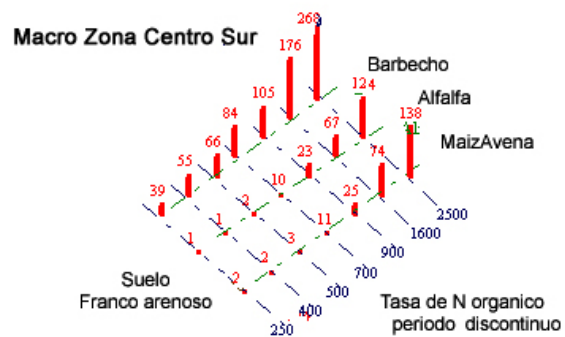
De esta forma se procedió a realizar una simulación a través de CropSyst considerando en primer lugar la ampliación de las tasas de aplicación de nitrógeno, utilizando además de las señaladas con anterioridad, 250, 500 y 900 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a objeto de discriminar mejor entre tasas. Se le adicionó la condición de aplicación continua, manteniendo el anterior de tipo discontinuo. Posterior a esto, y considerando las mismas 7 tasas, se simuló la aplicación de nitrógeno inorgánico proveniente de fertilización de fuentes minerales, y, por razones obvias, bajo condiciones de aplicación de distribución anual discontinua. Todos estos escenarios fueron creados a objeto de comparar entre diferentes condiciones el riesgo de lixiviación probable y el nitrógeno residual resultante.

### **Análisis de tasas promedio mensual de nitrógeno lixiviado bajo todas las condiciones.**

El movimiento vertical de nitrógeno es variable en el espacio y tiempo, y dependerá de la cantidad de nitrógeno aplicado como purín o nitrógeno inorgánico, el tipo de suelo, del volumen de agua de drenaje debido a la zona geográfica y el riego, por la presencia de cultivos que determinan la absorción de nitrógeno y finalmente por la distribución anual de las aplicaciones (continuas y discontinuas). Para observar esto en perspectiva, dado que las cifras son a veces difíciles de interpretar, se elaboraron gráficos, que muestran las variables combinadas. Este tipo de análisis gráfico tiene como objetivo relacionar todas las variables y condiciones mencionadas anteriormente, a través de múltiples entradas que permitan relacionar en un punto determinado el promedio mensual de nitrógeno lixiviado (kg/ha). La importancia del diseño de este tipo de gráficos, es entregar en forma clara y precisa las distintas variables estudiadas para poder relacionarlas respecto a la zona geográfica y tipo de suelo. Las figuras a continuación presentan valores acumulados promedio mensuales simulados de nitrógeno lixiviado (kg/ha) bajo distintas condiciones de distribución anual, para la zona centro, centro sur y sur respecto a tasas de aplicación.



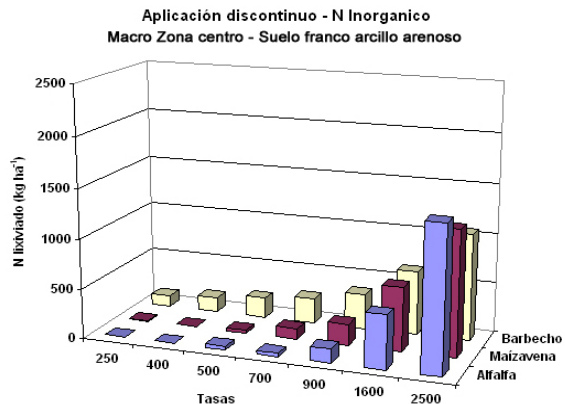
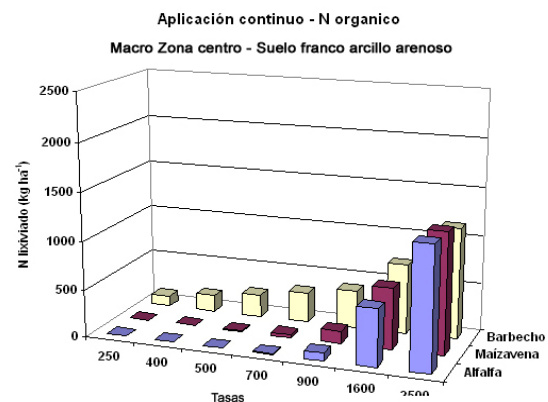
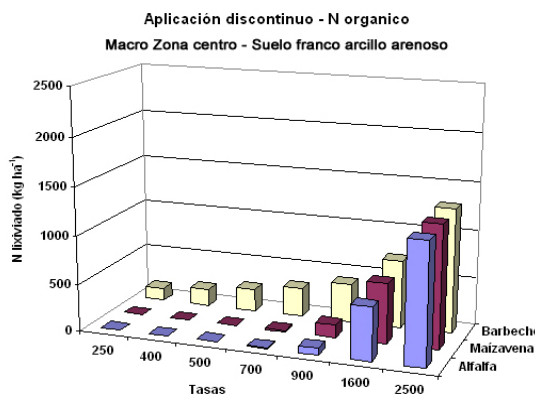
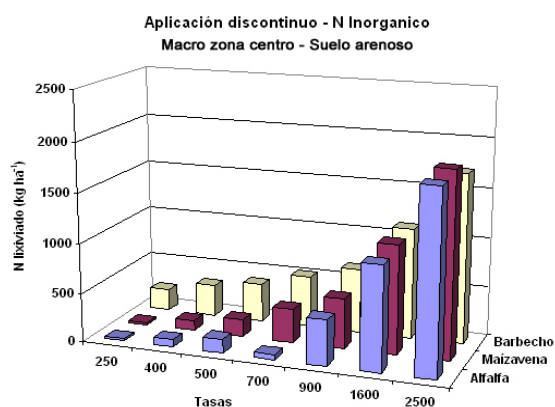
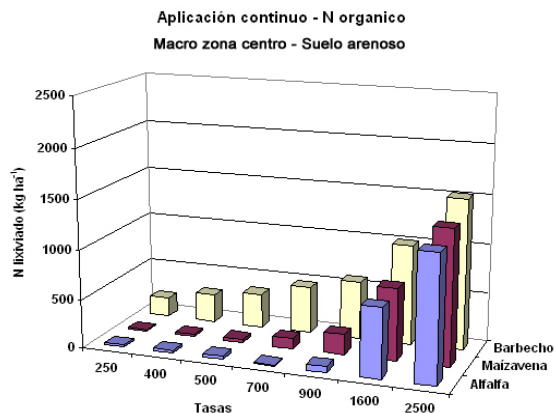
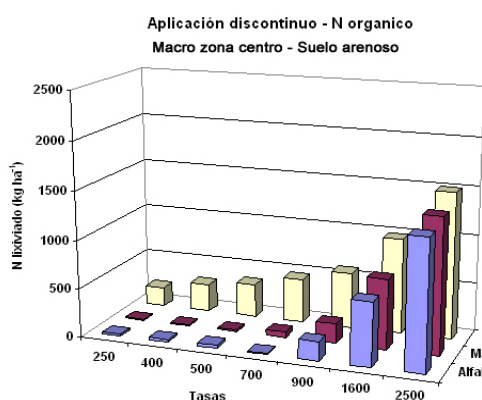




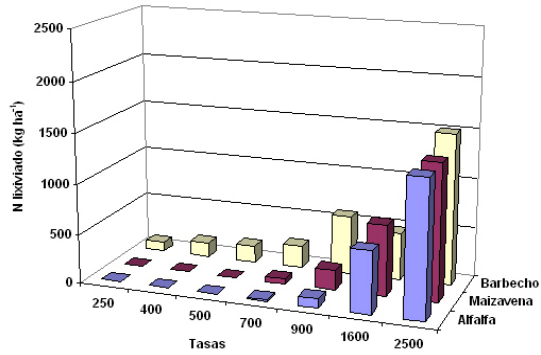
En primer lugar, este análisis corrobora la hipótesis de que los valores simulados de lixiviación de nitrógeno total anual para condiciones de suelo desnudo, son mayores a los valores de lixiviación en presencia de cultivos. Podemos inferir, que la lixiviación disminuye en presencia de cultivos y aumenta en ausencia de ellos; disminuye a medida que las tasas de aplicación de nitrógeno disminuyen y son menores en macro regiones ubicadas hacia el norte de nuestro país. En suelos de textura arenosa los valores de lixiviación son mayores. Para tasas de aplicación de nitrógeno altas ( $2.500$  y  $1.600 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y en suelos de textura arcillosa, los niveles de lixiviación son menores, ya que el drenaje es más lento, lo que retarda el desplazamiento del nitrógeno, hasta que el agua de drenaje aumente por eventos de precipitación o riego, lo que produce una descarga de cantidades considerables de nitratos, de carácter residual, acumulados en el suelo. La tasa de  $900 \text{ kg N ha}^{-1}$  presenta el límite visual entre cantidades razonables de absorción de nitrógeno por parte del cultivo y su acumulación residual y eventual lixiviación. **Para tasas superiores a  $900 \text{ kg N ha}^{-1}$ , la lixiviación presenta un fuerte incremento**. Para tasas de aplicación más bajas ( $700$ ,  $500$ ,  $400$  y  $250 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), los suelos arcillosos presentan índices más bajos de lixiviación que los suelos con texturas más arenosas. Respecto a los valores entre periodos continuos y discontinuos, no se aprecia una diferencia notable. Esto se debe a que este análisis es de tipo anual acumulado, el cual sólo le da importancia al valor promedio de lixiviación y no discrimina períodos del año, o valores máximos y mínimos.

### **Análisis y evaluación del potencial de lixiviación de nitrógeno bajo todas las condiciones**

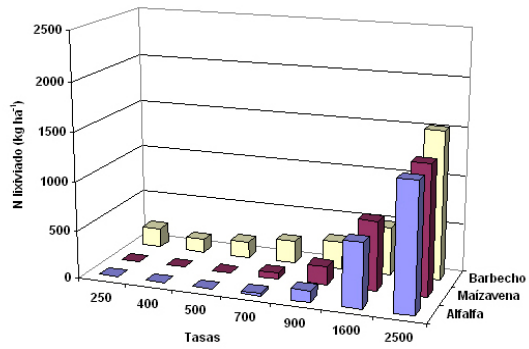
El análisis consideró características de suelo, macro región, presencia y ausencia de cultivo, tasas de aplicación de nitrógeno en forma de purín, tasas de aplicación de nitrógeno en forma inorgánica, aplicación en forma continua y discontinua. Las figuras siguientes, muestran los valores de lixiviado potencial, en presencia y ausencia de cultivos, tasas de aplicación y macro región.



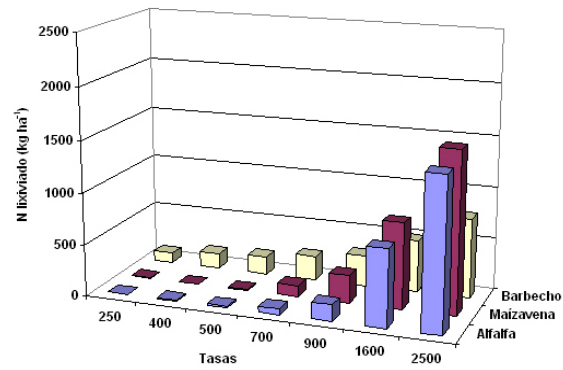
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona centro - Suelo franco



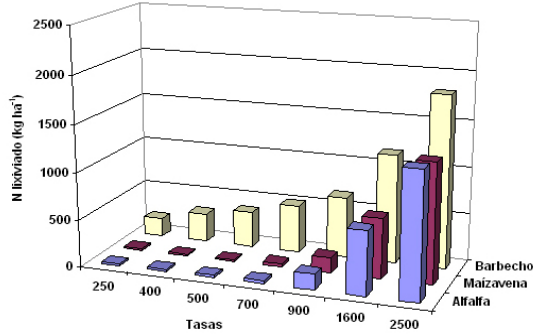
Aplicación continuo - N organico  
Macro Zona centro - Suelo franco



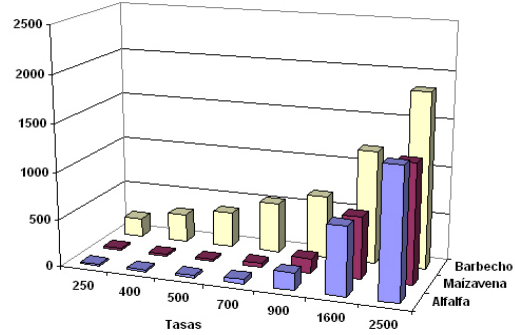
Aplicación discontinuo - N Inorganico  
Macro Zona centro - Suelo franco



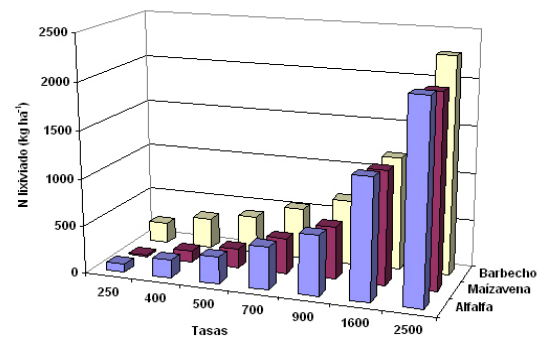
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo franco arenoso



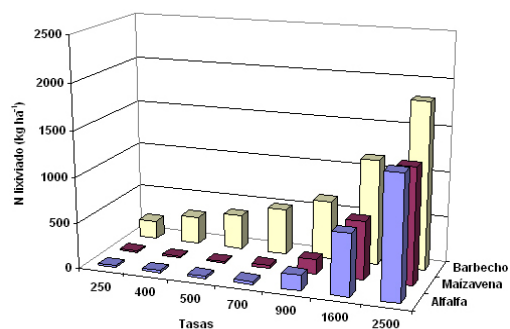
Aplicación continuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo franco arenoso



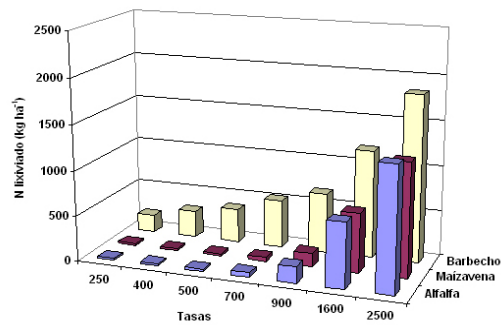
Aplicación discontinuo - N Inorganico  
Macro Zona centro sur - Suelo franco arenoso



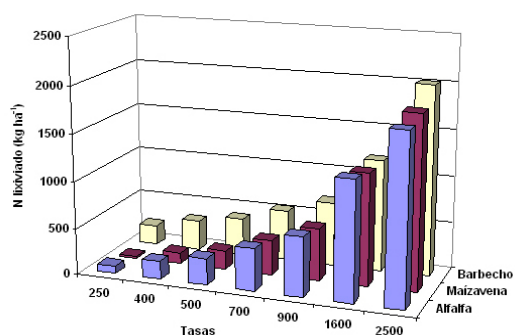
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo arcillo limoso



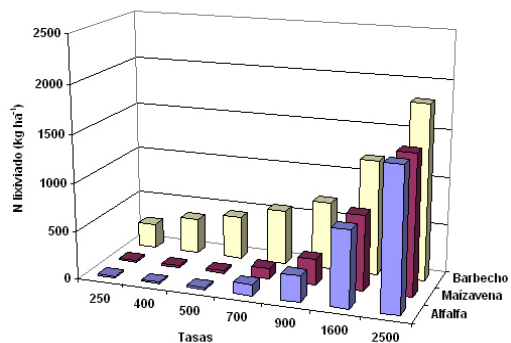
Aplicación continuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo arcillo limoso



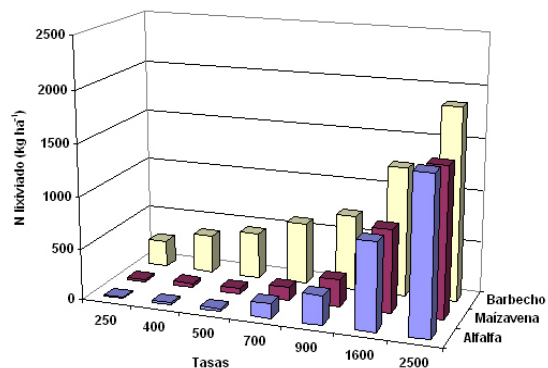
Aplicación discontinuo - N Inorganico  
Macro Zona centro sur - Suelo arcillo limoso



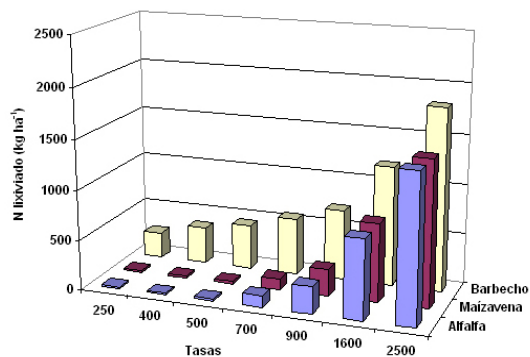
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo franco limoso



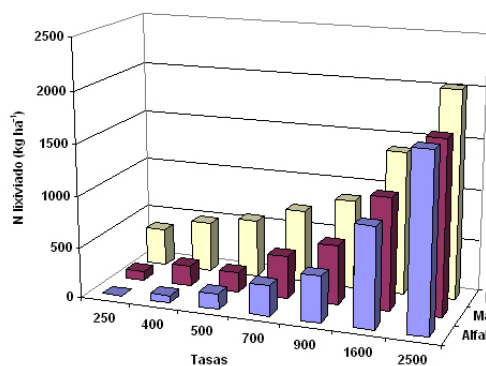
Aplicación continuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo franco limoso



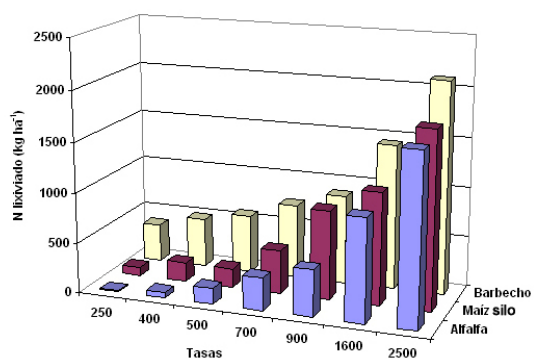
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona centro sur - Suelo franco limoso



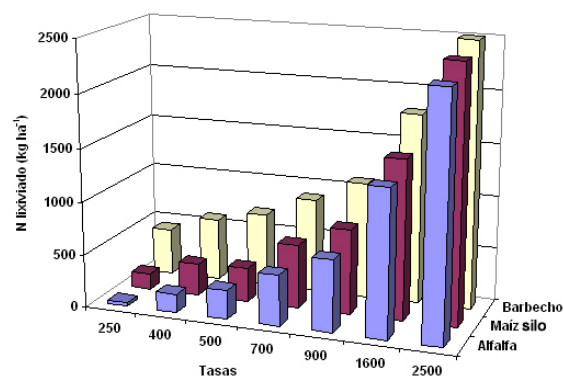
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona sur - Suelo arcilloso



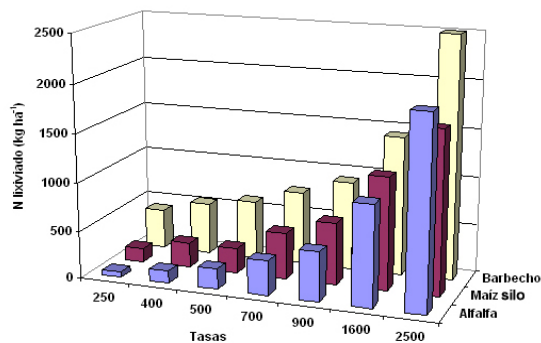
Aplicación continuo - N organico  
Macro Zona sur - Suelo arcilloso



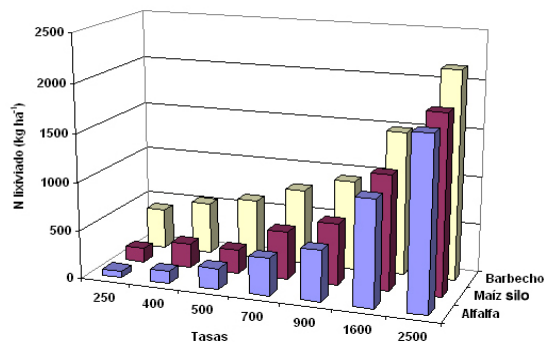
Aplicación discontinuo - N Inorganico  
Macro Zona sur - Suelo arcilloso



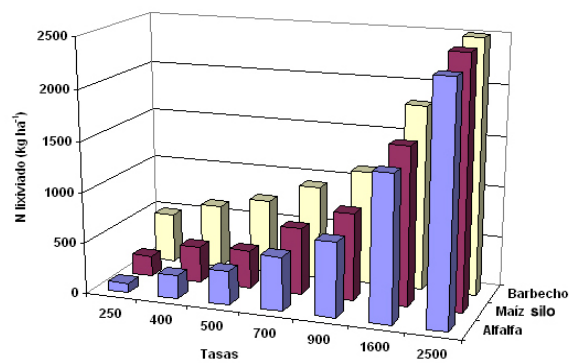
Aplicación discontinuo - N organico  
Macro Zona sur - Suelo franco arcillo limoso

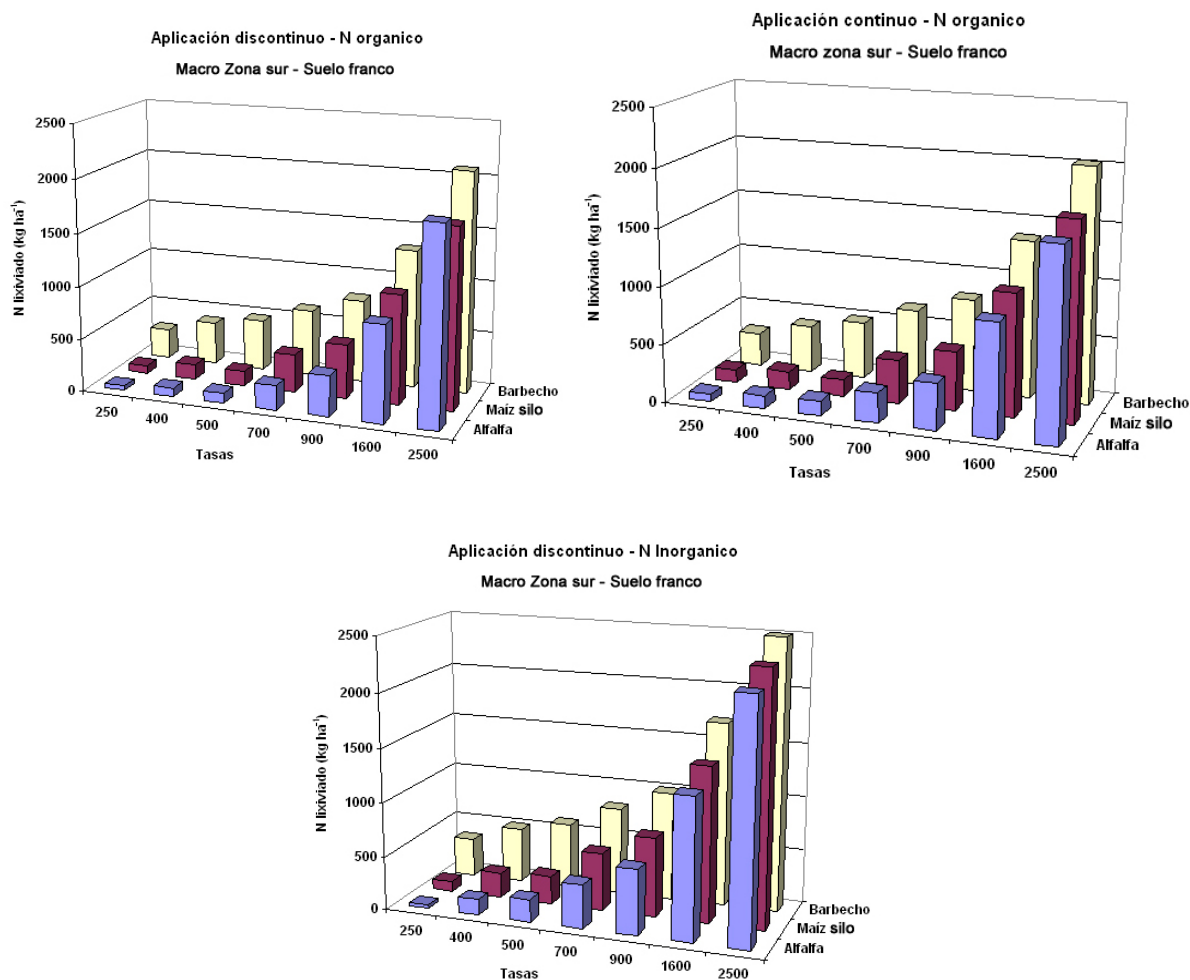


Aplicación continuo - N organico  
Macro Zona sur - Suelo franco arcillo limoso



Aplicación discontinuo - N Inorganico  
Macro Zona sur - Suelo franco arcillo limoso





Al comparar los valores de las distintas aplicaciones de todas las tasas de aplicación y en presencia y ausencia de cultivos, el potencial lixiviado, aumenta a medida que las tasas de aplicación de nitrógeno se incrementan. En general, se observa un mayor aumento del potencial de lixiviación, con las aplicaciones de N inorgánico (fertilización mineral) por sobre las aplicaciones N en forma de purín, para todas las macro regiones. Se puede distinguir un comportamiento similar del potencial de lixiviación para los diferentes suelos, y macro región; sólo se observa una clara diferencia entre los suelos más arenosos con las aplicaciones de N inorgánico respecto a suelos más arcillosos.

Se observa que para la macro región sur y para todas las condiciones, los valores del potencial de lixiviación de N son comparativamente mayores a los encontrados en las macro regiones centro y

centro sur. Esto se explicaría a la presencia de una mayor cantidad de materia orgánica de origen natural en el suelo, comparativamente a los suelos de las otras macro regiones.

Los valores de potencial de lixiviación de N observados bajo tasas de  $700 \text{ kg N ha}^{-1}$  y ausencia de cultivos, son comparativamente mayores a los encontrados en las aplicaciones de N orgánico continua y discontinua, para todas las macro regiones. Así en aplicaciones de N inorgánico, se observa un aumento significativo en tasas menores a  $700 \text{ kg N ha}^{-1}$  respecto a las demás aplicaciones. Esto debido principalmente a la aplicación de nitrato en forma directa al suelo.

El análisis permite deducir, que para tasas de aplicación tanto de forma continua como discontinua de  $2.500$ ,  $1.600$  y  $900 \text{ kg N ha}^{-1}$  los cultivos no son capaces de absorber más de lo que su potencial extractivo se lo permite. **Se observa que con aplicaciones de N inorgánico sobre  $500 \text{ kg N ha}^{-1}$  el cultivo o combinación de cultivos muestra incapacidad de absorber más nitrógeno.**

De los valores observados y analizados, se puede mencionar que el potencial de lixiviación de nitrógeno está directamente relacionado con el tipo de aplicación (orgánica o inorgánica) y la tasa de nitrógeno aplicado, además, la importancia de los cultivos como agentes extractores es de gran importancia para disminuir el potencial de lixiviación de N. Además, por condiciones naturales, se observa un aumento del potencial de lixiviación en la macro región sur por sobre la centro y centro sur.

#### **Análisis de la frecuencia de observación de eventos de lixiviación, para todas las condiciones.**

En términos probabilísticos, cuando se analiza la probabilidad de ocurrencia de un evento de lixiviación potencial de nitrógeno, su magnitud (es decir, la concentración o la masa lixiviada) está inversamente relacionado con su frecuencia de ocurrencia. Es decir, se espera encontrar más raramente eventos de gran magnitud, y más frecuentemente eventos de menor magnitud. Se

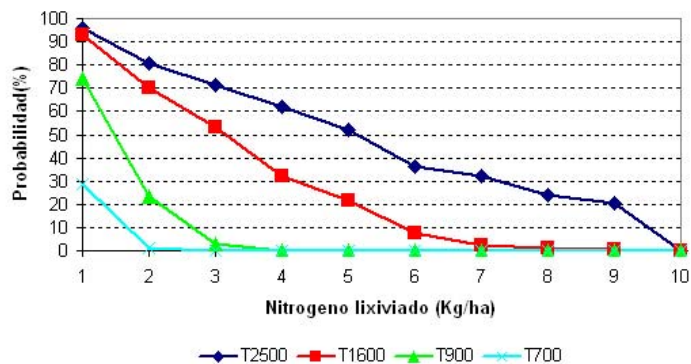


decidió analizar la información generada por el modelo, para todas las condiciones, usando una solución gráfica de distribución de probabilidad de Weibull. Este análisis gráfico tiene como objetivo mostrar la probabilidad (%) de que ocurra un valor de lixiviación en un determinado rango de valores bajo distintas tasas de aplicación, tanto con aplicación continua como discontinua. Se puede observar, en forma general, que a mayores tasas de aplicación la probabilidad de que ocurra un evento de lixiviación potencial de gran magnitud, es mayor, disminuyendo a tasas inferiores a  $700 \text{ kg N ha}^{-1}$ , especialmente en presencia de cultivos. El análisis de frecuencia de observación, es entregar una relación directa entre la clase y la mayor frecuencia de observación para diferentes variables. Se muestra en los gráficos siguientes, bajo condiciones de rotación de cultivos y tasas de aplicación, la probabilidad de excedencia.

Macro zona centro  
Suelo arenoso  
Aplicación discontinua  
Rotación Maiz-Avena

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400

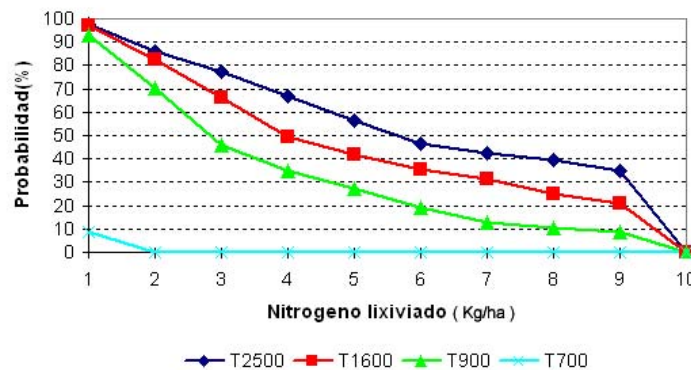
Probabilidad de excedencia (Media mensual)



Macro zona centro  
Suelo arenoso  
Aplicación discontinua  
Rotación Barbecho

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400

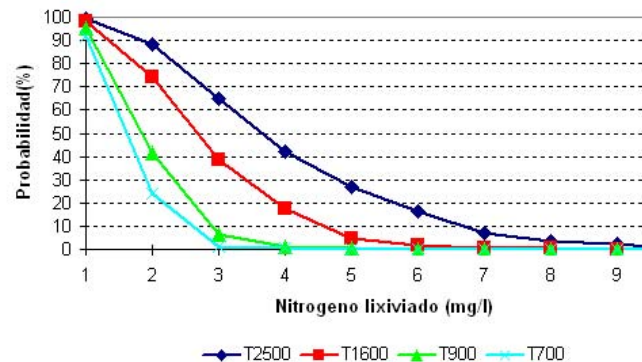
Probabilidad de excedencia (Media mensual)



Macro zona sur  
Suelo Arcilloso  
Aplicación discontinua  
Rotación maizavena

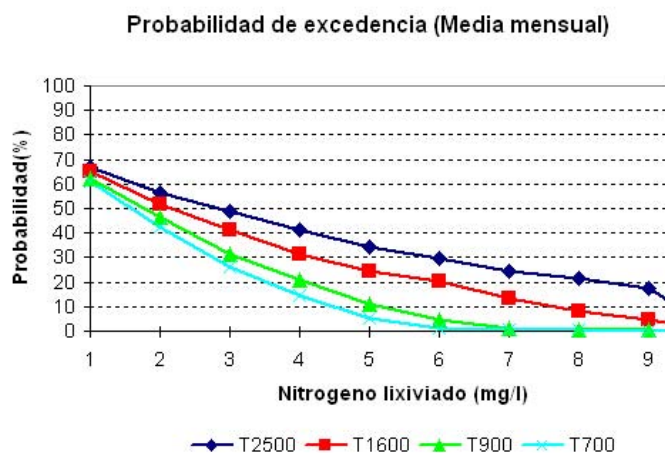
Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400

Probabilidad de excedencia (Media mensual)



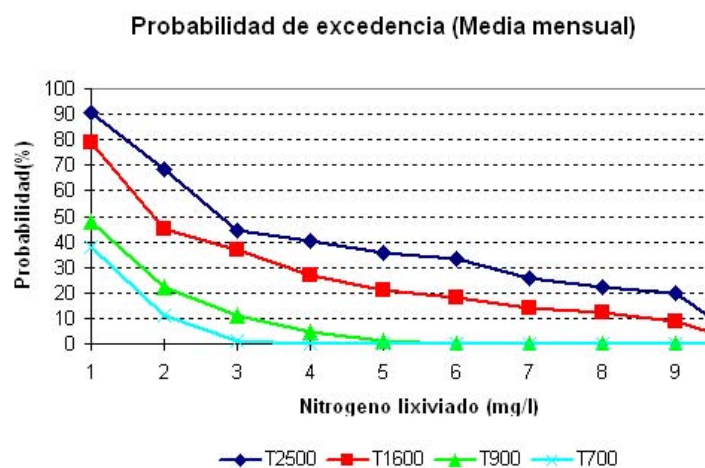
Macro zona sur  
Suelo Arcilloso  
Aplicación discontinuo  
Rotación barbecho

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



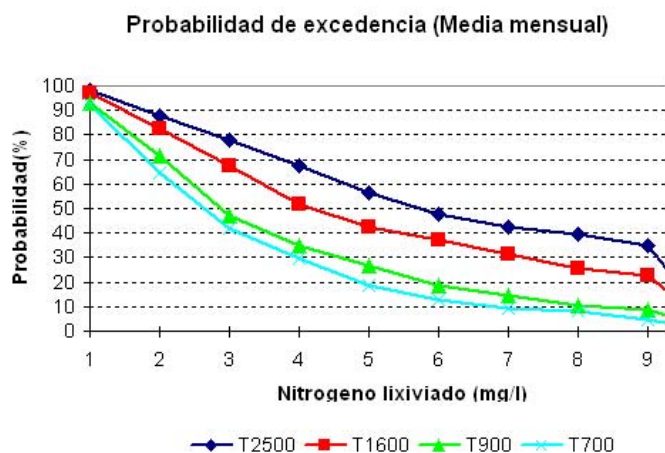
Macro zona centro  
Suelo Arenoso  
Aplicación continuo  
Rotación Maizavena

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



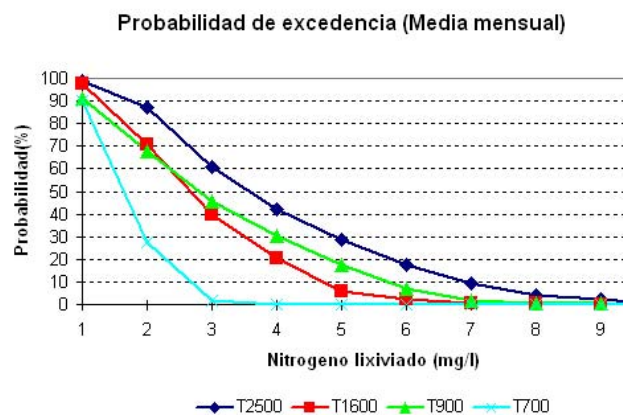
Macro zona centro  
Suelo Arenoso  
Aplicación continuo  
Rotación barbecho

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



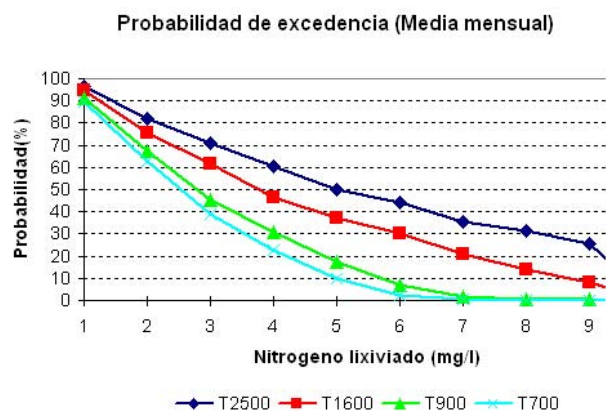
Macro zona sur  
Suelo Arcilloso  
Aplicación continuo  
Rotación Maíz/silo

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



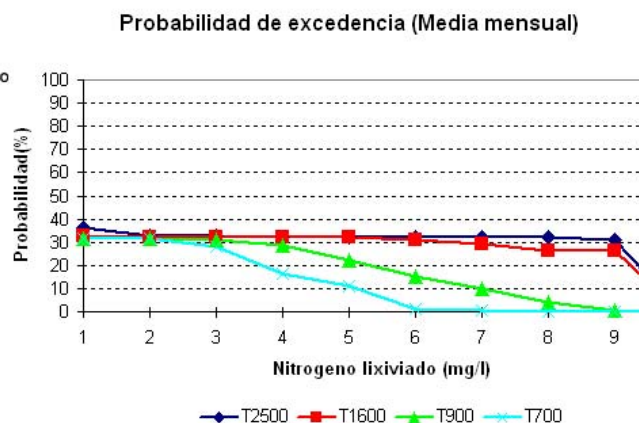
Macro zona sur  
Suelo Arcilloso  
Aplicación continuo  
Rotación barbecho

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



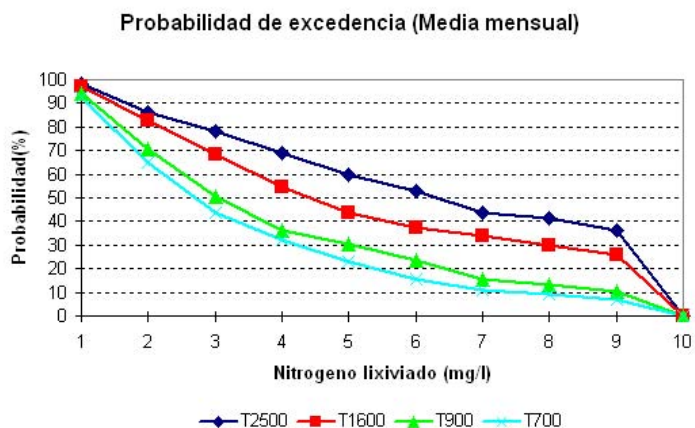
Macro zona centro  
Suelo Arenoso  
Aplicación N inorganico  
Rotación maizavena

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



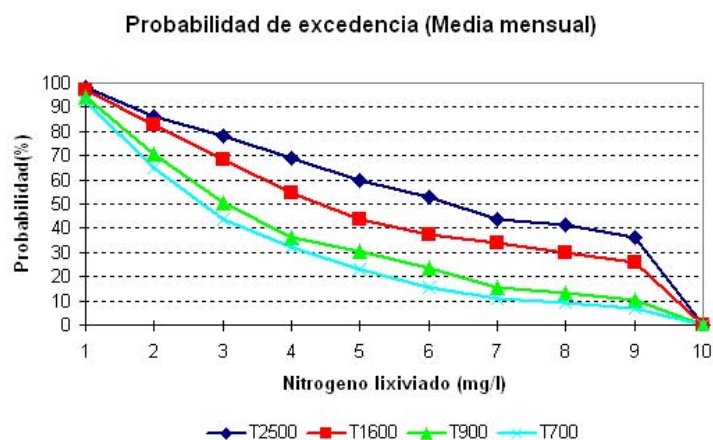
Macro zona centro  
Suelo Arenoso  
Aplicación N inorganico  
Rotación barbecho

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



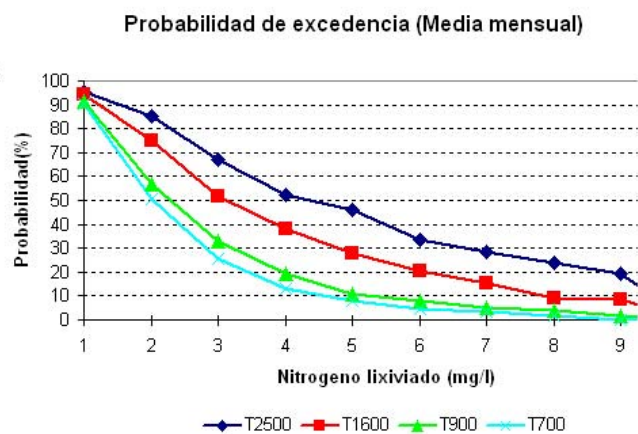
Macro zona sur  
Suelo Arcilloso  
Aplicación N inorganico  
Rotación maíz silo

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



Macro zona sur  
Suelo Arcilloso  
Aplicación N inorganico  
Rotación barbecho

Clase  
1 (0-10)  
2 (10-50)  
3 (50-100)  
4 (100-150)  
5 (150-200)  
6 (200-250)  
7 (250-300)  
8 (300-350)  
9 >>400



Bajo condiciones de aplicación de tipo discontinua, los resultados de la simulación para la macro zona centro indican que existe una diferencia sustancial en la probabilidad de excedencia del valor umbral de 50 mg/l para concentración de nitrógeno en el agua de drenaje, con aplicaciones de 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y de 900 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. En el primer caso, para cualquiera de los tres tipos de suelo de la macro zona y como sistema de cultivo barbecho o suelo desnudo, la probabilidad de excedencia es inferior al 5%, mientras que para aplicaciones de 900 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> la probabilidad de excedencia de este valor supera el 70%. Esta tendencia se repite considerando cualquiera de los cultivos simulados en lugar de barbecho o suelo desnudo, donde la probabilidad de excedencia promedio supera el 30%. **Se debe interpretar por tanto que, para la macro zona centro, la tasa de 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> constituye un límite donde a tasas mayores se espera que la lixiviación genere concentraciones, promedio anual de nitrógeno en el agua de drenaje, de 50 mg/l con una muy alta probabilidad.** Igualmente se puede señalar que se observa una mayor probabilidad de superar este umbral de concentración cuando se aplican tasas de 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> o mayores sobre suelos desnudos que sobre suelos con cultivos. En general, la presencia de cultivos involucra la utilización de parte del nitrógeno y por ende una disminución del total residual que se dispone en los horizontes del suelo.

Comparando entre las diversas macro zonas, en general, se observa un comportamiento muy similar entre las regiones centro y centro sur. La macro zona centro sur presenta contenidos de materia orgánica en sus suelos similares a los presentes en los suelos de la macro zona centro. Esta zona puede considerarse como de transición respecto a su comportamiento, evaluado con los valores de probabilidad de excedencia de eventos de lixiviación importantes, que se estiman para la macro zona centro y la macro zona sur, siendo eso si los valores de probabilidad mucho más cercanos a la primera de éstas.

Al contrario de lo que se estima para la macro zona centro, la incidencia en la probabilidad de lixiviación esperada, a partir del aumento en la tasa de aplicación desde 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> hasta 900 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, es muy leve para los tres tipos de suelos con presencia de cultivos, y prácticamente inexistente para los tres tipos de suelos en condiciones de barbecho o suelo

desnudo. En el primero de los casos la probabilidad de excedencia del valor 50 mg/l fluctúa entre un 20% y un 30%. En suelos desnudos la probabilidad de excedencia fluctúa alrededor de un 40%. En consecuencia, al igual que para la zona centro, tasas de aplicación en el rango 700 - 900 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> producen valores de concentración de nitrógeno en el suelo superiores a 50 mg/l. Sin embargo, a diferencia de la macro zona centro, la tasa de aplicación 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> no constituye un límite respecto del cual la probabilidad de excedencia del valor de concentración umbral disminuya hasta niveles despreciables, en especial si son comparados los escenarios de suelos con cultivos. Por consiguiente, se sugiere que el valor límite de tasa de aplicación debe ser menor a 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en la macro zona sur. Dentro de las razones para explicar estas diferencias está el hecho de que en general los suelos de la macro zona sur presentan un mayor contenido de materia orgánica, y por lo tanto, un mayor contenido de nitrógeno inicial. Por otro lado, y aún cuando las condiciones hidrológicas inciden en una mayor capacidad de dilución del nitrógeno contenido en los suelos, existe un mayor potencial de lixiviación que incidirá en una mayor cantidad total de nitrógeno circulando a través de los diversos horizontes del suelo.

Bajo condiciones de aplicación de distribución anual continua en la macro zona centro, considerando los tres tipos de suelos en condición de barbecho, los resultados de la simulación indican un 70% de probabilidad de excedencia del valor de 50 mg/l de nitrógeno, considerando tasas de aplicación de 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 900 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; esto es, no existe mayor incidencia en la variación de tasas de aplicación en este rango. Estos niveles de excedencia indicarían que el valor límite para tasa de aplicación en función de la superación de la concentración umbral establecida puede ser menor a los 700 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, en las condiciones de aplicación previamente descritas. **Al tener como referencia la comparación entre los tipos de aplicación continua y discontinua en la macro zona centro se observa que, en general, la probabilidad de excedencia es siempre mayor bajo aplicación continua, fluctuando entorno al 70%.** Esta situación se repite en la macro zona sur, en donde la diferencia entre ambos tipos de aplicación es menor, pero existente. Para la macro zona sur con suelos en condición de barbecho la probabilidad de excedencia de la concentración umbral fluctúa entre un 20% y un 30%. Se puede inferir con cierto grado de

certeza que las tasas bajo condiciones de aplicación continua, las aplicaciones totales deben tener una carga inferior a  $700 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y comparativamente menores que las aplicadas bajo condición discontinua en las tres macro zonas, en orden a no superar el umbral de concentración de nitrógeno de referencia.

Finalmente cuando se prescinde del aporte de nitrógeno por aplicación de purín y sólo existe aporte de éste como nitrógeno inorgánico (fertilizante), en términos globales no se advierten diferencias significativas en las probabilidades de excedencia frente a la aplicación de tasas de  $700 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $900 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . En este sentido sí existen diferencias entre suelos desnudos y con cultivos, evidenciándose en promedio una probabilidad de excedencia promedio cercana al 70% para suelos en condición de barbecho (incluyendo todas las tasas) y al 30% para suelos con cultivos (incluyendo todas las tasas).

Resta determinar las diferencias existentes entre la aplicación de nitrógeno orgánico e inorgánico. Para la macro zona centro, existen mayores diferencias de la respuesta de la probabilidad de excedencia frente a tasas de aplicación de  $700 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $900 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , cuando la aplicación es de tipo orgánico que en el caso de aplicación de nitrógeno inorgánico. En este sentido se debe tener en cuenta que el nitrógeno inorgánico está disponible inmediatamente en el suelo para ser lixiviado, no debiendo sufrir la serie de procesos de transformación que si experimentará el nitrógeno orgánico cuando es aplicado. Por otro lado, frente a la aplicación de tasas de  $900 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en promedio existen rangos de probabilidad de excedencia semejantes frente a la aplicación de nitrógeno orgánico e inorgánico (10% a 30%). Finalmente, al comparar el comportamiento de probabilidad de excedencia frente a la aplicación de tasas de  $700 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $900 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , sólo se registran diferencias significativas para la aplicación de nitrógeno orgánico.



## Corroboración.

## Lixiviación de nitrógeno.

El modelo en los aspectos de simulaciones de lixiviación de nitrógeno, fue corroborado usando datos de lixiviación de lisímetros de ensayos de campo realizados en la localidad de Pichidegua, temporada 2002-2003, maíz (*Zea mays*) como cultivo y suelo de textura franco arcillo arenosa en superficie y arcillosa en profundidad, pertenecientes a la serie de suelo Lo Vázquez. Registros climáticos diarios de los años 2002 y 2003 obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas a la localidad de Pichidegua, se emplearon para realizar la simulación de los escenarios.

## Simulaciones

El proceso de corroboración del modelo se efectuó mediante la creación de dos escenarios de simulación que integraron información local de suelo, clima, cultivo y manejo, y cuyo objetivo fue reproducir las condiciones de campo. Los archivos de manejo para CropSyst, incluyeron dos tipos de tratamientos con aplicaciones de agua y nitrógeno en cantidades y fechas iguales a las efectuadas en los ensayos. La tabla 4.40 presenta las cantidades de nitrógeno empleadas por temporada para cada tratamiento.

**Tabla 4.40. Aplicación de nitrógeno y agua de riego por tratamiento.**

Tratamiento	Aplicación (kg N ha <sup>-1</sup> )	Riego total (mm)
T1	3019,6	942
T2	958	942

Fuente (\*): INIA, 2003.

Las simulaciones desarrolladas utilizando la información antes mencionada, permitieron generar resultados que se exhiben en las tablas 4.41 y 4.42. En éstas se compararon los parámetros simulados con los experimentales de extracción de nitrógeno por el cultivo (kg ha<sup>-1</sup>), drenaje (mm) y lixiviación de nitrógeno (kg ha<sup>-1</sup>).

**Tabla 4.41. Resultado de drenaje, extracción y lixiviación de nitrógeno de las simulaciones para el primer tratamiento (T1).**

<b>*Reales</b>		
<b>Drenaje (mm)</b>	<b>Extracción kgN ha<sup>-1</sup></b>	<b>Lixiviación kgN ha<sup>-1</sup></b>
304,7	413,6	668,7
<b>Simulados</b>		
<b>Drenaje (mm)</b>	<b>Extracción kgN ha<sup>-1</sup></b>	<b>Lixiviación kgN ha<sup>-1</sup></b>
220,6	518,4	616,4

Fuente (\*): INIA, 2003.

**Tabla 4.42. Resultado de drenaje, extracción y lixiviación de nitrógeno de las simulaciones para el segundo tratamiento (T2).**

<b>*Reales</b>		
<b>Drenaje (mm)</b>	<b>Extracción kgN ha<sup>-1</sup></b>	<b>Lixiviación kgN ha<sup>-1</sup></b>
260,7	368	174,2
<b>Simulados</b>		
<b>Drenaje (mm)</b>	<b>Extracción kgN ha<sup>-1</sup></b>	<b>Lixiviación kgN ha<sup>-1</sup></b>
220,7	501	174,1

Fuente (\*): INIA, 2003.

La complejidad y variabilidad del sistema evaluado, conjuntamente con la dinámica que caracteriza al nitrógeno en el sistema suelo-planta- atmósfera, pueden ser el motivo de las diferencias exhibidas entre los datos simulados y experimentales en el análisis presentado.

Por el contrario, los datos expuestos de lixiviación simulados y experimentales, para ambos tratamientos, presentaron una mínima variación. En el primer tratamiento (T1), la diferencia existente entre el valor de lixiviación real y el simulado, podría atribuirse a que el drenaje, factor importante en el desplazamiento del nitrógeno en el suelo, fue menor al real y que el valor simulado de extracción de nitrógeno por el cultivo, fue mayor al real. Ambas condiciones podrían ser las responsables de la escasa diferencia advertida. Sin embargo, aun cuando la diferencia entre el valor simulado y real de lixiviación en el segundo tratamiento (T2), es casi nula, se observa una diferencia entre los valores reales y simulados de drenaje y extracción de nitrógeno que no inciden en el valor de lixiviación simulado, por lo que podemos asumir que el modelo predice aceptablemente los niveles de extracción, drenaje y lixiviación de nitrógeno para los escenarios evaluados.