

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN DE PRÁCTICAS DE FERTIRRIGACIÓN EN UNA PLANTACIÓN DE
PALTOS USANDO EL MODELO HYDRUS 2_D.**

XIMENA C. ORREGO V.¹
JOSÉ LUIS ARUMI R.²
EDUARDO HOZAPFEL H.³

RESUMEN

Se utilizó el software HYDRUS 2_D para la evaluación de prácticas de fertirrigación en frutales. El software HYDRUS 2_D corresponde a un conjunto de algoritmos numéricos que incluyen soluciones de la ecuación de Richards y la ecuación de advección-dispersión en un dominio bidimensional utilizando esquemas numéricos de elementos finitos.

El caso de estudio corresponde a una plantación de Paltos Hass ubicada en el Pueblo de Peumo (VI Región). Se simuló la temporada agrícola 2004-2005, considerando la información existente de suelos, clima y manejo agrícola. Como resultado de este análisis se concluye que la práctica de aplicar fuertes dosis de fertilizante antes del inicio de la temporada de lluvias produce una importante lixiviación de nitratos que contamina las aguas subterráneas.

¹ Ingeniero Civil Agrícola, Candidato a Doctor En Recursos Hídricos, Universidad de Concepción.
mail: xorrego@udec.cl

² Ingeniero Civil Ph.D., Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Campus Chillán.
mail : jarumi@udec.cl

³ Ingeniero Agrónomo Ph.D., Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción, Campus Chillán.
mail: eholzapf@udec.cl.

1. ANTECEDENTES GENERALES

Actualmente existe una amplia oferta para el diseño e instalación de sistema de riego tecnificado que incorporan la aplicación de fertilizantes junto con el agua de riego, lo que se conoce como fertirrigación. El uso de estos sistemas ha permitido incrementar fuertemente la eficiencia del uso de agua y fertilizante en la agricultura, pero existen serios problemas en el manejo de muchos de estos sistemas. Es común encontrar equipos de riego tecnificado que se han instalado sin estar bien dimensionados, lo que posteriormente causa que estos sean abandonados o subutilizados por el excesivo costo energético necesario para su operación. Otra realidad es que equipos, que han sido cuidadosamente diseñados, sean operados por obreros agrícolas que no poseen capacitación adecuada. Todo lo anterior conlleva a la necesidad de desarrollar herramientas para la evaluación de la calidad de las prácticas de manejo del agua y el fertilizante en los sistemas tecnificados.

Tradicionalmente la evaluación de equipos de riego apuntó a determinar la eficiencia de aplicación de agua. Sin embargo, las exigencias de los mercados internacionales están obligando a los productores a preocuparse de los aspectos ambientales de su actividad productiva. Esto es relevante, porque la agricultura es una reconocida fuente de contaminación difusa, especialmente en lo referente al uso de agroquímicos.

Dentro del marco anteriormente expuesto, el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción está trabajando en el proyecto FONDEF D02I-1146 “Tecnologías de Manejo de Agua para una Agricultura Intensiva Sustentable”. Dicho proyecto, que se desarrolla en el valle de Peumo (VI Región), apunta al desarrollo de tecnologías que permitan mantener una agricultura productiva con un mínimo impacto ambiental, de tal forma de asegurar que la producción sea aceptada por los mercados internacionales sin ningún tipo de restricción medioambiental.

Este trabajo presenta un estado de avance del desarrollo de metodologías de modelación para la evaluación del impacto ambiental que pueden tener las prácticas de riego y fertilización que son comúnmente utilizadas en la agricultura chilena.

2. MODELO UTILIZADO

Al inicio de este proyecto, se realizó un análisis de diferentes modelos que existen actualmente para la modelación de movimiento de agua y solutos en un medio poroso de saturación variable con la presencia de cultivos. Entre los modelos evaluados cabe destacar IPTM, VZM, EPIC, FEFLOW, HYDRUS y CROPSYST.

Inicialmente se seleccionó El modelo CROPSYST, desarrollado por la Universidad del Estado de Washington (WSU). Este es un modelo, de código libre, que ha sido desarrollado por WSU para el estudio del efecto que las diferentes prácticas de manejo agrícola pueden tener sobre la producción y el ambiente. Este modelo ha sido utilizado con éxito en cultivos anuales como maíz y remolacha. Sin embargo, la extensión del uso del modelo para frutales está en una etapa de desarrollo (De la Hoz, 2004).

Es importante destacar que a la fecha no existe en la literatura internacional ningún modelo de simulación de crecimiento de frutales, por lo que CROPSYST, a pesar de no estar completo es el estado del arte en este tema.

Como se necesita tener aproximaciones a la modelación del balance de agua y fertilizantes en frutales, se decidió utilizar el modelo Hydrus_2D. La razón de la selección de este modelo, radica en la confiabilidad, facilidad de uso y relativo bajo precio del modelo.

HYDRUS 2D (Simunek et., al. 1999), es un programa que resuelve numéricamente la ecuación de Richards para el movimiento de agua en el suelo con condiciones de saturación variable y la ecuación de advección dispersión para el transporte de solutos. Además, el modelo incluye el efecto de condiciones agrícolas como la extracción de agua por raíces.

2.1 Base teórica usada por HYDRUS_2D.

Considerando un dominio bidimensional, la ecuación que gobierna el movimiento de agua y extracción de agua por las raíces en dos dimensiones, está dada por la siguiente modificación a la ecuación de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right) - S(h) \quad (1)$$

Donde:

- θ : Contenido de humedad volumétrico del suelo [$L^3 L^{-3}$]
- t : Tiempo [T]
- C : Capacidad específica de agua en el suelo [L^{-1}], que corresponde a la pendiente de la curva de retención de agua en el suelo $d\theta/dh$.
- h : Presión matricial del suelo [L]
- z : Potencial gravitacional [L]
- K : Conductividad hidráulica del suelo [$L T^{-1}$]
- S : Tasa de extracción de agua por las plantas [$L^3 L^{-3} T^{-1}$]

El término S , representa el volumen de agua removida por unidad de tiempo desde una unidad de suelo debido a la extracción de agua por las plantas. La ecuación fue definida por Feddes et al., (1978) como sigue:

$$S(h) = a(h)S_p \quad (2)$$

Donde:

- $a(h)$: Función adimensional que describe la respuesta al estrés de agua relacionado con la presión matricial [$0 \leq a(h) \leq 1$]
- S_p : Tasa potencial de extracción de agua por las plantas [T^{-1}]

La Figura 1 muestra un esquema de la función de respuesta al estrés usada por Feddes et al., (1978). Se debe notar que la extracción de agua se asume cero cuando el suelo se encuentra cercano a saturación (“punto de anaerobiosis”, h_1), y cuando $h < h_4$ (Presión matricial a punto de marchitez permanente). La extracción de agua es considerada óptima cuando se encuentra entre h_2 y h_3 , además cuando la presión matricial se encuentra entre h_3 y h_4 (o h_1 y h_2) la extracción de agua decrece en forma lineal con h .

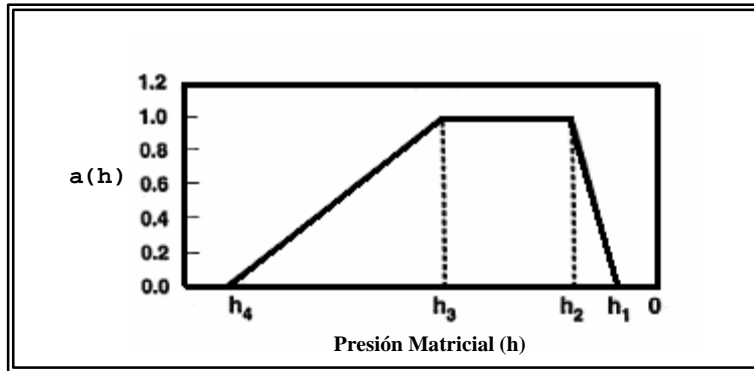


Figura 1. Esquema de la función respuesta al estrés de agua por la planta, $a(h)$, usada por Feddes et al.(1978).

El transporte de soluto está descrito por la ecuación de advección dispersión (Simunek et al., 1999) que está dada por:

$$\frac{\partial qc}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(qD_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial q_i c}{\partial x_i} - NU(c, r, z, t) \tag{3}$$

Donde:

- c : Concentración de nitrato en el suelo [$M L^{-3}$]
- $\frac{\partial}{\partial x_i} \left(qD_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right)$: Este término representa el flujo de soluto debido al proceso de dispersión.
- $\frac{\partial q_i c}{\partial x_i}$: Representa el flujo de soluto por convección debido al movimiento del agua.
- q : Flujo de agua [$L T^{-1}$]
- D_{ij} : Coeficiente de dispersión [$L^2 T^{-1}$]
- NU : Extracción pasiva de nitrato por las raíces de las plantas [$M L^{-3} T^{-1}$]

3. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio que se presenta en este documento corresponde a la evaluación de las prácticas de fertirrigación que se realizan en una plantación de paltas Hass. Específicamente, interesa evaluar el impacto de una práctica denominada fertilización postcosecha, que consiste en la aplicación de una fuerte dosis de fertilizante al inicio de la temporada invernal.

3.1 Toma de datos en terreno

En el marco del proyecto Fondef D02I-1146, se han instrumentado cuatro parcelas experimentales en el Valle de Peumo, VI Región. En cada parcela se ha establecido un completo sistema de instrumentación donde se miden variables relativas a la aplicación de agua y fertilizantes, crecimiento de frutales (uvas de mesa, viníferas, naranjos y paltos), humedad en el suelo, condiciones hídricas en los árboles y calidad de agua superficial y subterránea.

En lo referente al monitoreo relacionado con el balance de agua y fertilizante en la zona radicular, se realizan mediciones de humedad en el suelo realizadas utilizando neutrometría y sondas FDR. Para el monitoreo de la concentración de nitrato en el suelo no saturado se utilizan tasas de cerámica lisimétricas (Foto 1) y muestreo directo del suelo; la calidad de las aguas subterráneas se obtiene extrayendo muestras desde una red de punteras de control.

Para este proyecto fue necesario desarrollar métodos constructivos que permitieran la implementación de la instrumentación a un costo razonable. Esto no fue un problema menos, pues la presencia de un suelo gravoso dificulta enormemente la construcción de pozos de observación. Las soluciones existentes en la literatura eran muy costosas y escapaban del presupuesto del proyecto, por lo que se debieron desarrollar sistemas manuales de hincado de punteras.



**Foto 1. Tasas de cerámica a profundidades de 30, 60, 90 y 120 cm.
Instaladas sobre los camellones de paltos.**

La plantación en estudio se encuentra ubicada cerca del pueblo de Peumo (VI Región) y es representativa de las prácticas agrícolas que se realizan en el Valle Central. Los árboles están plantados en hileras sobre camellones, que corresponden a acumulaciones de suelo extraído desde los caminos que separan las hileras. El uso de camellones es una práctica común en la producción de paltos, pues genera una mejor relación agua – aire en la zona radicular. Los paltos son regados con dos micro-jet de 30 L h⁻¹. Los datos necesarios para el estudio (tiempos de riego, precipitación, evapotranspiración y cantidad de fertilizante aplicado) fueron obtenidos a través del proyecto Fondef D02I-1146 pues estos paltos corresponden a una de las parcelas experimentales que se implementaron dentro del proyecto.

La plantación de paltos se encuentra en una zona cercana al río Cachapoal, razón por la cual la columna representativa del suelo (Tabla 1) es predominante gravo-arenosa (Foto 2). El nivel freático se encuentra a una profundidad de 2,7 a 3,0 metros.



Foto 2. Calicata efectuada para conocer las características del suelo en la zona del Proyecto Fondef D02I-1146.

Tabla 1. Características de cada estrata de suelo.

Estrata	Profundidad Estrata (cm)	Clasificación de suelo
1	30	Loamy Sand
2	30	Sandy Clay Loam
3	30	Sandy Loam
4	170	Sand

4. MODELACIÓN

Se modelaron las características de retención de humedad del suelo y la conductividad hidráulica no saturada usando las ecuaciones propuestas por Van Genuchten (1980), puestos que esas relaciones son las utilizadas por Hydrus_2D.

Tabla2. Parámetros del suelo para cada estrata, usando los modelos de Van Genuchten.

	Qr	Qs	Qa	Qm	Alpha	n	Ks	Kk	Qk
1	0.057	0.41	0.057	0.41	0.124	2.28	350.2	350.2	0.41
2	0.1	0.39	0.1	0.39	0.059	1.48	31.44	31.44	0.39
3	0.065	0.41	0.065	0.41	0.075	1.89	106.1	106.1	0.41
4	0.045	0.43	0.045	0.43	0.145	2.68	712.8	712.8	0.43

En la Tabla 2 se tienen los siguientes parámetros: Qr: contenido de humedad residual del suelo ($L^3 L^{-3}$); Qs: Contenido de humedad del suelo a saturación ($L^3 L^{-3}$); Qa y Qm: parámetro en la función de retención de agua en el suelo; alpha: parámetro en la función de retención de agua en el suelo (L^{-1}); n: parámetro en la función de retención de agua en el suelo; Ks: Conductividad hidráulica saturada ($L T^{-1}$) y Qk: Valor medido de conductividad hidráulica ($L T^{-1}$).

Como la idea principal de este estudio es visualizar y analizar la lixiviación de nitrato al sistema de agua subterránea durante toda una temporada agrícola, se utilizó una simulación diaria con una duración total de 365 días.

El modelo geométrico generado para la simulación (Figura 2a), correspondió a un corte transversal del camellón que contiene las cuatro estratas definidas anteriormente, en la parte superior central el micro-jet y en los extremos el área de mojadura del mismo (2 metros). El dominio de la simulación se definió usando la distancia entre las hileras de árboles, la geometría de los camellones y la profundidad del nivel freático

Una vez definido el modelo geométrico se generó una malla de elementos finitos (malla triangular no estructurada) definida en forma automática por el programa (Figura 2b).

Las condiciones de borde para el flujo de agua fueron definidas como se aprecia en la Figura 2d. La condición de borde atmosférica implica que existe un flujo de humedad entre la atmósfera y el suelo que es variable en función del tiempo (riego, lluvia y evapotranspiración), La condición de libre afloramiento (seepage face) permite simular las filtraciones hacia fuera del camellón. Finalmente, el drenaje libre se define para estimar la recarga de agua y lixiviación de nitratos al sistema de agua subterránea que se encuentra a mayor profundidad.

Las condiciones de borde para el transporte de soluto son definidas en la Figura 2e. Se utilizó una condición de borde que permite simular el ingreso de fertilizante junto con el riego. Para efectos de la simulación, se consideró que el contenido inicial de nitrato en el suelo era despreciable.

La distribución radicular se definió según Michelakis et al.,(1993) que señalan que en huertos de paltos regados por microaspersión un 72% de las raíces se concentran en los primeros 60cm de

suelo y dentro de los 2 m en la línea de riego. Por lo tanto, la zona radicular definida en el dominio correspondió a todo el camellón (Figura 2c).

Además es importante señalar que para condición inicial de humedad, se supuso que el suelo estaba a capacidad de campo, situación que se produce normalmente al término de la temporada de lluvias.

Finalmente, para el estudio del balance de masas en el modelo, se definieron cinco zonas considerando las tres primeras estratas de suelo y dividiendo la última estrata en dos zonas.

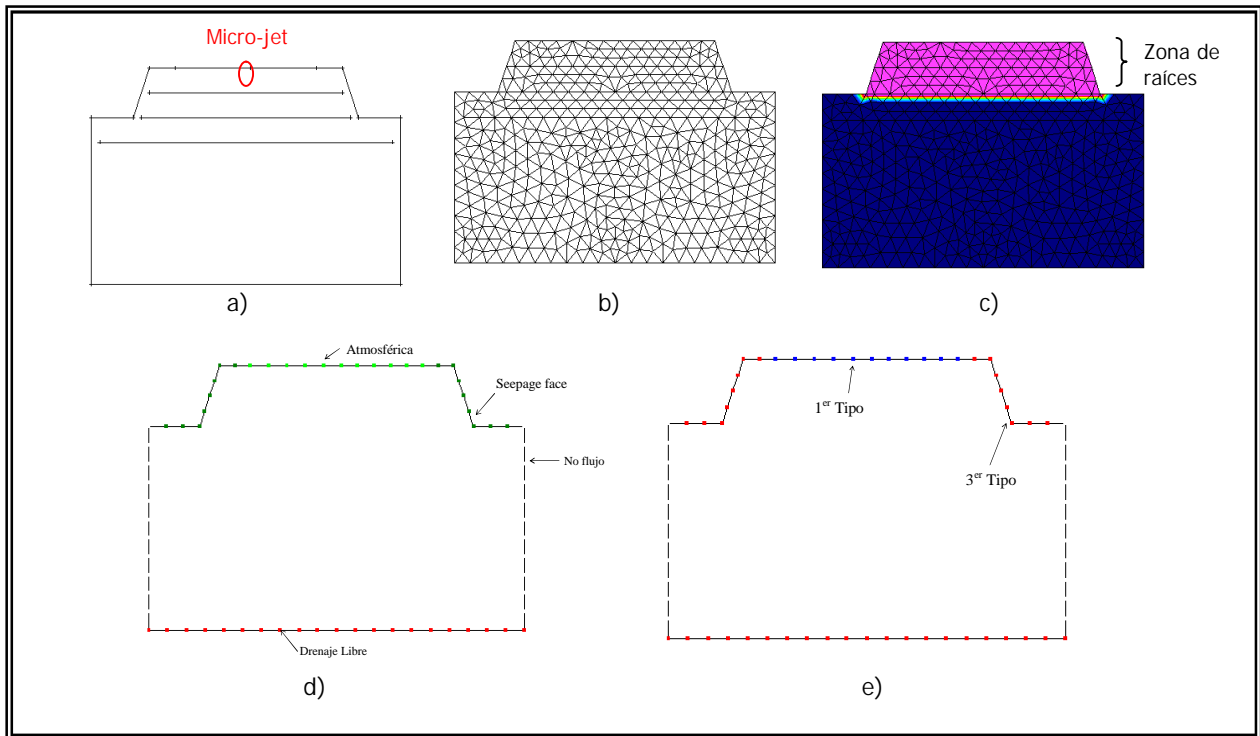


Figura 2. a) Modelo geométrico, b) Malla triangular no estructurada, c) Dominio de extracción radicular en patos d) Condiciones de borde para el flujo de agua, e) Condiciones de borde de transporte de soluto.

5. RESULTADOS.

De la información que puede ser obtenida de la simulación realizada, se presentan el contenido de humedad en el suelo y la concentración de soluto, que para este caso corresponde al ion nitrato.

La Figura 3 muestra visualizaciones gráficas de la simulación del contenido de humedad del suelo a lo largo del año. El día 1 corresponde al inicio de la temporada de riego (01- septiembre-2004) y el día 240 al término del riego, el resto de los días pertenecen al periodo invernal hasta el día 365 (31-agosto-2005). De la Figura 3, se puede señalar que los valores de contenido de humedad del suelo se mantienen bajos para los días 1 y 2, luego al día 15 comienza la aplicación del riego lo cual hace notar claramente la entrada del frente húmedo. Siguiendo con el análisis de los días restantes y tomando en cuenta que las aplicaciones del riego continúan, se puede mencionar que entre los 30 y 60 cm., el suelo se mantiene siempre más húmedo debido a las características del suelo presente a esa profundidad (más arcilloso). Otro punto importante de indicar, es que existe un flujo constante de agua que percola desde la zona de extracción de las raíces, lo que se traduce en recarga al sistema de agua subterránea.

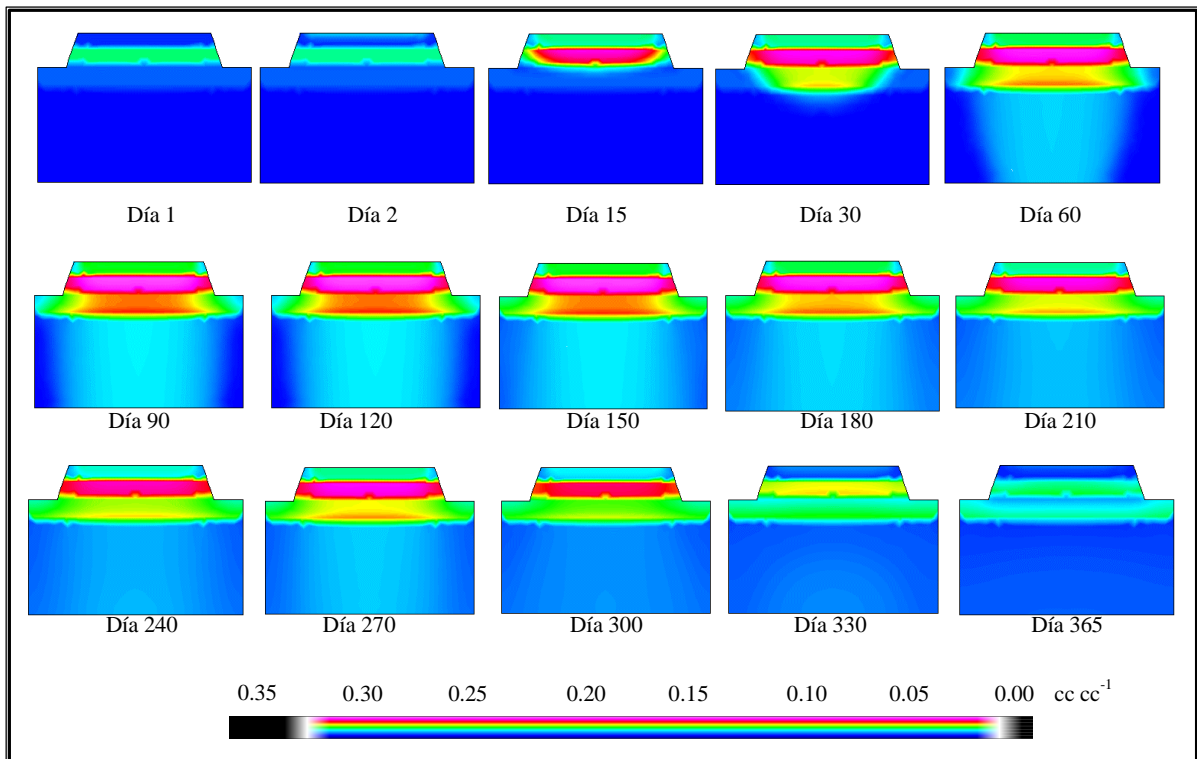


Figura 3. Variación anual del contenido de humedad del suelo en el dominio bidimensional simulado.

En la Figura 4, se presenta la variación temporal de cinco puntos de observación ubicados en el centro de cada zona de control de balance de masa. En esta figura, se aprecia claramente que en

la segunda capa (coincidente con la segunda estrata de suelo), el contenido de humedad siempre es mayor, esto se debe al tipo de suelo definido que es de textura más densa. Esta condición restringe el flujo de agua que puede percolar hacia capas más profundas de suelo, lo que es comprobado por el hecho de que las capas inferiores siempre están más secas.

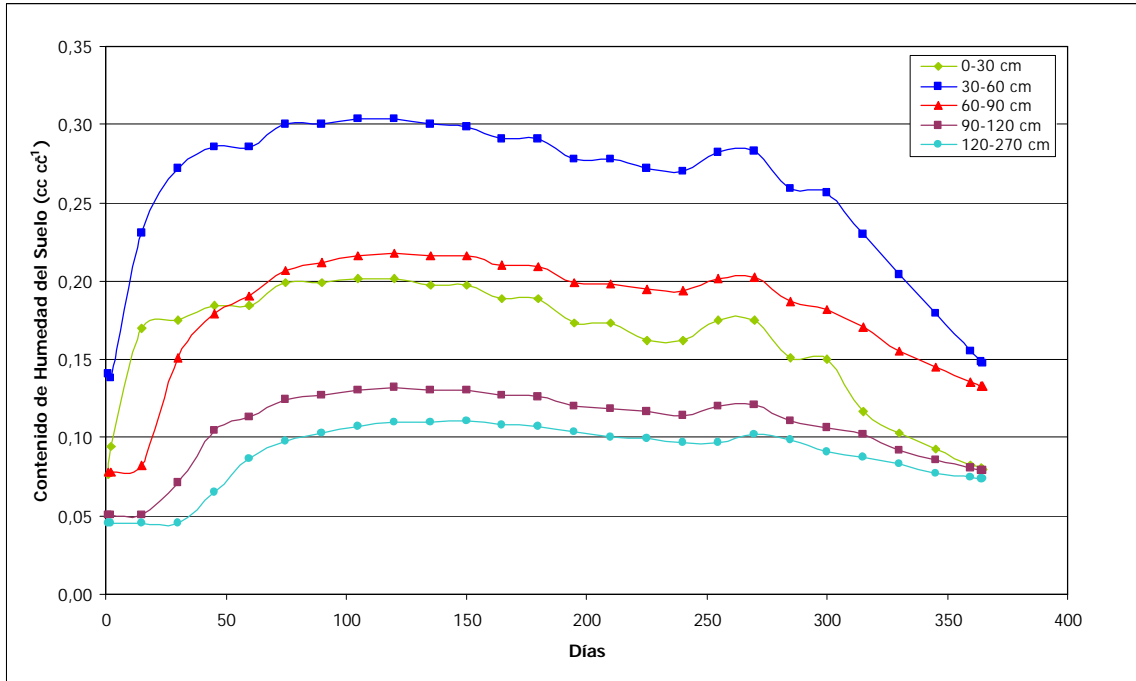


Figura 4. Variación del contenido de humedad del suelo en las cinco zonas de control durante el período de simulación de un año.

Los resultados gráficos en el camellón sobre la concentración de nitrato en el perfil de suelo se muestran en la Figura 5. Según ésta, se observa claramente que el día 45 es cuando comienza la fertilización, luego hay un movimiento de nitrato en el perfil con una clara tendencia a un aumento de éste. El día 234 es la última fertilización aplicada, notándose una diferencia de color el día 240, lo que refleja que el riego se detuvo después de la aplicación del fertilizante, si a esto se le agrega el hecho de que hubo una precipitación de gran magnitud (80 mm), se ve claramente que el perfil de suelo es lavado producto de estos eventos, produciéndose finalmente una lixiviación de nitrato al sistema de agua subterránea.

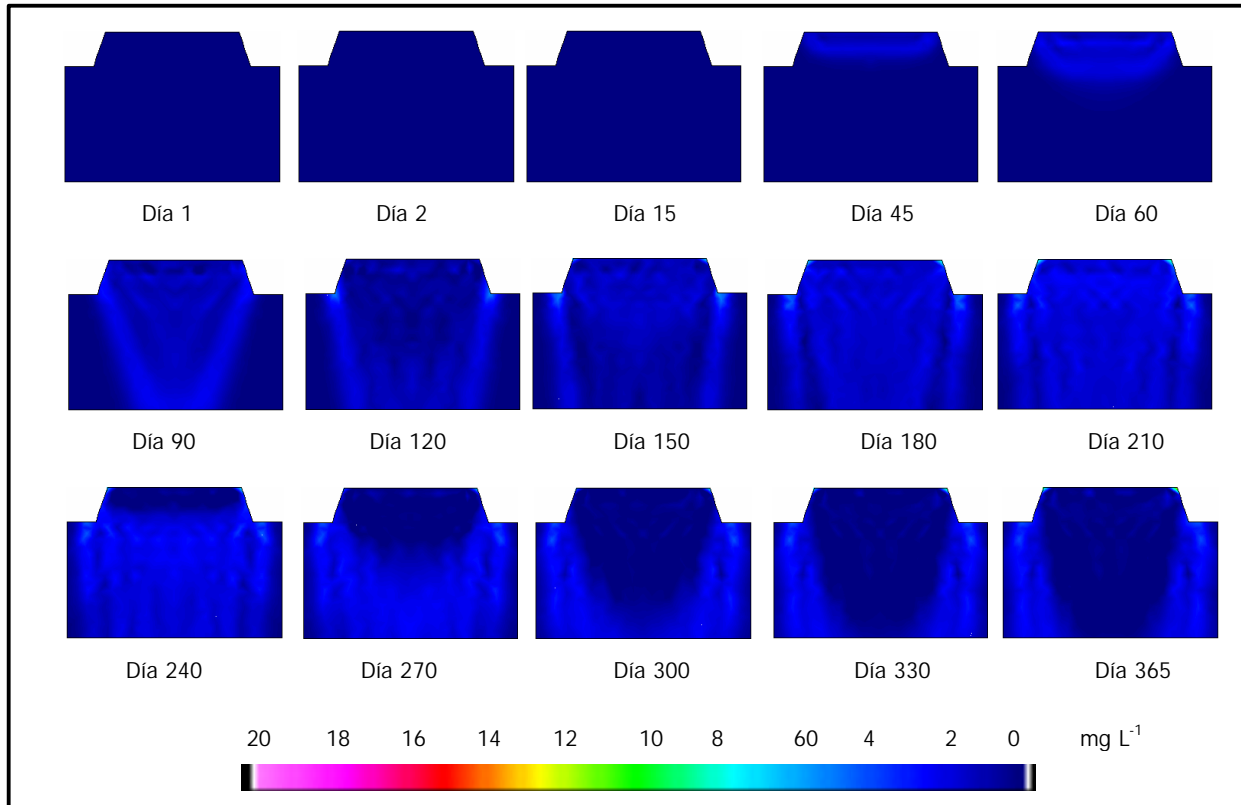


Figura 5: Variación anual de la concentración de nitrato (mg L^{-1}) en el dominio bidimensional de la simulación.

Lo comentado anteriormente se puede corroborar a través de la Figura 6, ésta fue realizada con la información del balance de masa y se ve claramente la extracción de fertilizante en las primeras capas, además del máximo de concentración de nitrato existente cuando termina la temporada de riego. Si se observa con atención la evolución de la concentración de nitrato a lo largo del año para cada capa, se ve un desfase en los máximos, lo que se debe fundamentalmente al movimiento vertical del soluto con un avance según las propiedades hidráulicas del suelo. Otro punto importante, es la brusca disminución de nitrato (entre los días 100 y 150) en las capas más superficiales, dejando en evidencia que la extracción de soluto en la ecuación de transporte simula de forma correcta este mecanismo. Además es relevante mencionar que este periodo corresponde a los meses de máxima demanda hídrica, concordando a la vez con la máxima tasa de extracción de agua por las raíces.

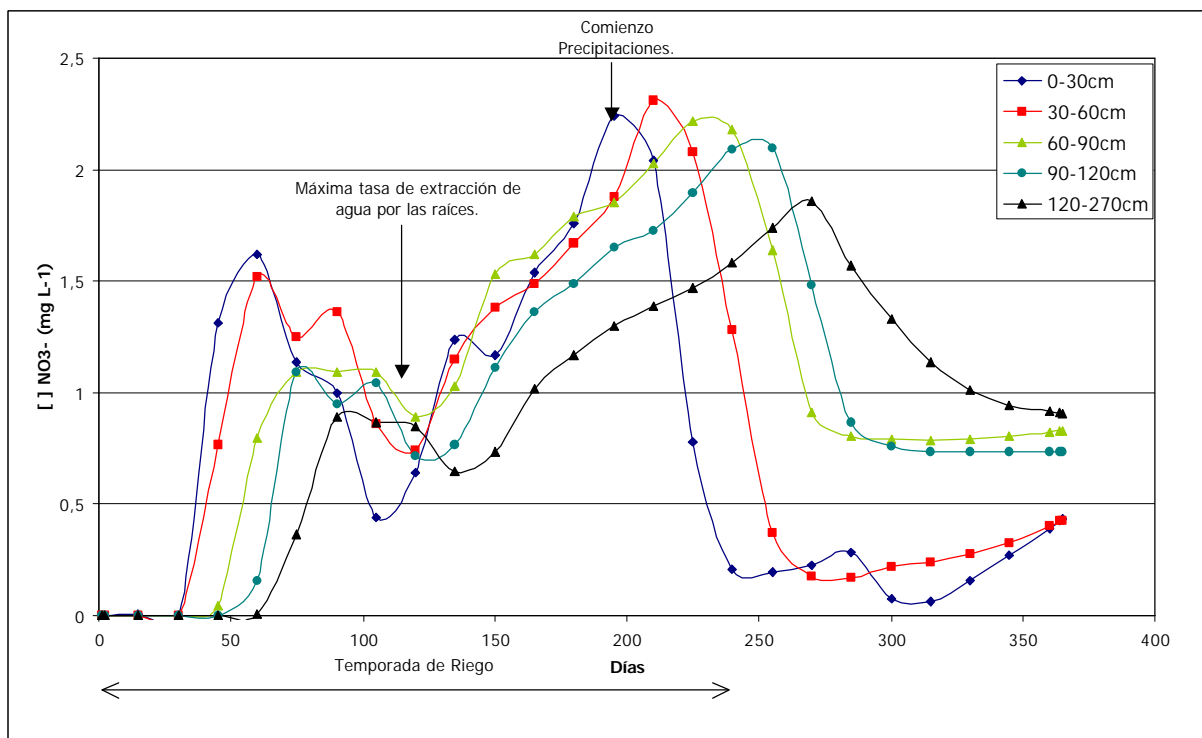


Figura 6: Variación anual de la concentración de nitrato (mg L⁻¹) en cinco puntos definidos en el perfil de suelo.

6. CONCLUSIONES

Los resultados presentados en este documento corresponden a resultados preliminares obtenidos durante la segunda temporada de ejecución del proyecto Fondef D02I-1146. La primera conclusión apunta a que el uso de modelos de simulación permite evaluar en forma eficiente el impacto de las prácticas de manejo de agua y fertilizante en los recursos hídricos. Sin embargo para que el uso de modelos sea válido, es imprescindible el contar con programas de medición de parámetros y monitoreo de variables que apoyen los resultados obtenidos con los modelos.

Durante la tercera temporada del proyecto Fondef D02I-1146 se realizará una instrumentación más detallada en algunos sectores de las parcelas experimentales ya existentes con el fin de perfeccionar el uso de modelos.

Es preocupante la práctica de fertilización de postcosecha que se recomienda en forma regular. Tanto este ejercicio de simulación, como los resultados obtenidos con las tasas de cerámica lisimétricas, indican que existe una importante lixiviación de nitratos temporada de lluvias.

BIBLIOGRAFÍA.

De la Hoz (2004). Evaluación del Modelo Cropsyst en Viñas. Proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción.

Feddes R. A., Kowalik P. J., and Zaradny H. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, Jhon Wiley & Sons, New York, NY.

Michelakis, R, Vougioucalou, E. And Clapaki, G. 1993. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. Agricultural Water Management 24: 119-131.

Simunek J., M. Sejna and van Genuchten M.Th. 1999. The HYDRUS-2D, Software Package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variable-saturated media. U. S. Salinity Laboratory, Agricultural Research Service. U.S. Department of Agriculture, Riverside California. Pp. 227.

Van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. Vol. 44. Pp. 892-898.