

EXPLOTACION DEL MODELO SHALL 3 PARA EVALUAR EFECTOS EN LA RESPUESTA HIDROLOGICA PROVOCADOS POR RIEGO GENERALIZADO

Dr. Ing, Erik Daniel Zimmermann
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales.
CONICET. Rosario. Argentina

RESUMEN

Se evalúan los efectos ambientales que provocaría un hipotético riego generalizado sobre el sistema hidrológico del Ao. Ludueña (Santa Fe, Argentina) mediante la explotación del modelo hidrológico cuasi 3D SHALL3 durante un período de 20 años, donde las series de entrada, precipitación y evapotranspiración, son generadas sintéticamente. El modelo, previamente calibrado, es explotado contemplando el escenario actual con agricultura extensiva y sin uso masivo del riego, el que fue tomado como referencia y escenarios hipotéticos de simulación con uso intensivo del riego. Este último es implementado bajo tres variantes que contemplan humedades óptimas del 60% (escenario # 1), 75% (escenario # 2) y 90% de la capacidad de campo (escenario # 3), respectivamente.

Se demuestra que el escenario # 1 no trae consecuencias importantes para los procesos hidrológicos del sistema real ni complica los procesos de contaminación que, eventualmente, puedan darse. El escenario # 2, presenta consecuencias importantes para los procesos hidrológicos del sistema real, principalmente aumentos en las recargas y en los niveles freáticos con mayor impacto en las áreas deprimidas. La vulnerabilidad frente a los procesos de contaminación se eleva considerablemente en los sectores de cabecera de cuenca. Para el escenario # 3, los procesos hidrológicos sufren variaciones muy significativas, tanto en los valores medios como en sus extremos así como en los patrones espaciales. Los niveles freáticos protagonizan aumentos de gran magnitud logrando que el acuífero freático presente una alta vulnerabilidad frente a procesos de contaminación. Todos estos impactos hacen que una hipótesis de riego como la analizada sea inviable desde el punto de vista ambiental.

ABSTRACT

The environmental effects that would cause a hypothetical irrigation on the Ludueña basin (Santa Fe, Argentina) are evaluated by means of the exploitation of the hydrological model SHALL3 during a 20-year period, where the input series are generated synthetically. The model, previously calibrated, is exploited contemplating the actual scenario with extensive agriculture and without irrigation actions, that was taken as reference, and hypothetical scenarios with intensive irrigations. This last was implemented under three variants, which contemplate optimum humidities of 60% (scenario #1), 75% (scenario #2) and 90% of the field capacity (scenario #3), respectively.

It is demonstrated that the scenario #1 do not show important consequences for the hydrological processes neither for the contamination processes. The scenario #2, presents important consequences for the hydrological processes, mainly increases of the phreatic recharges and of the water-table levels specially in the lowest areas. The vulnerability in front of the processes of contamination rises considerably in the headwaters of the basin. For the scenario #3, the hydrological processes present very significant variations, so much for the average values as for their extremes, and the space patterns, too. The phreatic levels play increases of great magnitude and the phreatic aquifer present a high vulnerability to contamination processes. All these impacts make this hypothesis of irrigation to be inadmissible from the environmental point of view.

INTRODUCCION

La cuantificación del impacto que provocaría un incremento generalizado del riego en una sistema típico de llanura, tanto en sus procesos hidrológicos naturales como en su vulnerabilidad ante acciones de contaminación, requirió del desarrollo del modelo matemático hidrológico cuasi-3D, SHALL3 (Zimmermann y Riccardi 2000)

Este modelo matemático, de parámetros distribuidos en el espacio y de operación continua en el tiempo, es apto para representar áreas de llanura, y permite contemplar las interacciones entre los procesos de superficie, en la zona no saturada y en la zona saturada.

A grandes rasgos discretiza el dominio espacial mediante dos capas de celdas (una superficial y otra subterránea) interconectadas mediante diferentes leyes de vinculación, sobre las cuales se cuantifican flujos y balances de agua. Ambas capas de celdas se vinculan a través de la zona no saturada mediante las ecuaciones de continuidad y momentum en el medio poroso no saturado. El conjunto de ecuaciones diferenciales es resuelto de manera desacoplada mediante técnicas de diferencias finitas.

El modelo puede cuantificar dinámicamente variables de estado, tales como almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo, así como flujos de humedad y vapor, tales como los envueltos en los procesos de evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo. Cada una de estas variables puede conocerse con una adecuada resolución espacial y temporal. Esta aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas en la meso-escala y en el largo plazo.

El SHALL3 fue puesto en operación y calibrado en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina, alcanzándose una identificación satisfactoria entre modelo y prototipo (Zimmermann 2000).

Garantizando que el modelo genera respuestas hidrológicas semejantes a las del sistema de estudio, se crean las condiciones para estudiar los escenarios generados ante hipotéticas acciones de riego que podrían aplicarse. El análisis se plantea en el largo plazo, simulando el comportamiento del sistema real mediante el SHALL3, a lo largo de veinte años, por lo cual hubo que construir series sintéticas de tormentas horarias y evapotranspiración diaria.

Se presentan aquí, los escenarios de riego contemplados y los cambios producidos en los diferentes procesos hidrológicos analizados, así como también su incidencia ante potenciales procesos contaminantes

SERIES DE ENTRADA SINTETICAS

El desarrollo del trabajo involucró la generación sintética de hietogramas de eventos lluviosos y de series de evapotranspiración potencial diarias, con una extensión de veinte años, dado que el análisis propuesto se planteó para el largo plazo.

Para el primer cometido se desarrolló un modelo probabilístico de tormentas, compuesto por cinco variables aleatorias: intervalo de tiempo entre tormentas, intensidad media, intensidad máxima, duración y coeficiente de avance. Los parámetros fueron ajustados a los datos observados (casi 600 eventos lluviosos) de la estación pluviográfica Sapucay (Santa Fe). Las intensidades medias, tiempos entre eventos y duraciones de tormentas se generaron mediante realizaciones de Monte Carlo sobre funciones de distribución de probabilidad ajustadas a éstas variables. Para las intensidades máximas y coeficientes de avance se ajustaron ecuaciones de regresión multiplicativas en función de las intensidades medias y duraciones, respectivamente. Se demostró que las series sintéticas presentan un comportamiento estadístico semejante a las reales (Zimmermann, Navarro y Silber 1996).

Se construyeron hietogramas horarios de tormentas para los veinte años englobando 1293 eventos de lluvia, totalizando unos 952,9 mm anuales de precipitación, datos ampliamente representativos de la casuística regional. La distribución temporal de las intensidades de lluvia se adoptó de forma triangular, ya que se ha probado que estadísticamente es la forma más frecuente (Zimmermann 1998d).

Respecto a la demanda atmosférica, se generaron sintéticamente valores de evaporación de tanque "A", afectados por un coeficiente de tanque. Se dispuso de datos meteorológicos, en intervalos diarios y con más de veinte años de extensión, de la estación agroexperimental de Zavalla operada por la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR (Figura 1).

Se optó por modelar la serie de evaporación de tanque mediante una componente *determinística* senoidal, de período anual, junto a otra componente *aleatoria* de "ruido blanco", es decir media nula y varianza no nula. Esta sencilla ecuación reprodujo la serie observada con errores de igual orden que modelos estocásticos autoregresivos AR(4) y de medias móviles ARMA (2,2) previamente planteados. La serie de evapotranspiración implicó la generación de 7300 valores diarios, con un promedio anual para los veinte años de 1014,9 mm.

ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

La explotación del modelo SHALL3 se realizó con los parámetros ajustados a la situación actual de uso del suelo y bajo escenarios diferentes: (a) escenario actual con agricultura extensiva, sin uso masivo del riego y (b) escenarios futuros con agricultura extensiva, uso intensivo del riego bajo explotación de un acuífero arenoso subyacente al freático. Este acuífero representa una fuente de buena calidad para riego, de muy buena transmisibilidad, permitiendo una explotación a elevados caudales, aptos para la fuerte demanda del riego.

Los cultivos típicos de la zona, en orden de importancia, son soja, trigo - soja de segunda y maíz. Se analizaron las áreas ocupadas por los diferentes cultivos y los días calendario e hidrológicos de temporada de riego, en donde se debe dar la humedad óptima.

La secuencia operativa adoptada consistió en: (a) verificar si el día de simulación es día de riego (lo será si hay cultivos presentes en el sistema hidrológico), de ser así qué coeficiente (tanto por uno) de área ocupa el cultivo a regar, (b) estipular la norma de riego, como la diferencia en mm de lámina de agua entre la humedad antecedente del perfil de suelo y la humedad óptima, fijada en un porcentaje de la capacidad de campo y (c) distribuir la norma de riego en intervalos horarios de un día, afectada por el coeficiente de cobertura, a manera de lámina de precipitación. Este procedimiento se llevó a cabo en todas y cada una de las celdas del sistema a lo largo del período de simulación. El coeficiente de cobertura será, de acuerdo al algoritmo adoptado para el modelo SHALL3, una función del espacio y del tiempo, acorde con el período vegetativo del cultivo (Zimmermann 2000). Las simulaciones se realizaron bajo tres escenarios ó hipótesis de riego (Tabla 1).

Tabla 1. Escenarios de riego considerados

Escenario	Humedad óptima sostenida durante períodos de riego
# 1	60 % de capacidad de campo
# 2	75 % de capacidad de campo
# 3	90 % de capacidad de campo

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fueron realizadas las corridas del modelo para los diferentes escenarios de simulación. El tiempo de máquina consumido para el escenario sin riego fue de unas cuatro horas. Para los escenarios con riego, debido a la operación adicional de la rutina de riego, las corridas demandaron unas seis horas por escenario. Se utilizó un procesador Pentium MMX 166 MHz. Se diseñaron rutinas computacionales para el análisis de la información generada por el modelo, que para algunas de las salidas, implicó la gestión de archivos con alrededor de 1500000 datos numéricos.

Análisis global

Para cada escenario de simulación los valores medios, a lo largo de los 20 años de la serie, para la evapotranspiración real ETR , percolación B , escurrimiento superficial Q y las normas de riego a suministrar anualmente NR , se documentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Promedios anuales para los 20 años de simulación.

	ETR (mm)	B (mm)	Q (mm)	NR (mm)	Q_G (mm)	ΔH_{ZNS} (mm)	ΔH_{ZS} (mm)
Escenario 0	820	-27	160	0	24	-54	3
Escenario 1	862	-52	160	102	33	-19	18
Escenario 2	917	-113	160	311	58	74	55
Escenario 3	947	-203	172	619	72	250	131

Puede observarse un incremento de la ETR a medida que se suministra mayores tasas de riego, acompañando la mayor oferta de agua para satisfacer la demanda potencial atmosférica. Teniendo presente que el módulo pluviométrico es de 952,9 mm, el escenario sin riego devuelve el 86% de la precipitación hacia la atmósfera; el escenario 1, el 90,4%, el escenario 2, el 96,2% y el escenario 3, el 99,4%. Las tasas medias de percolación indican un sentido predominante del flujo hacia el acuífero freático (para la recarga corresponde un signo negativo). Como consecuencia de las acciones de riego los volúmenes percolados aumentan considerablemente en la medida que aumentan las normas de riego. Los escurrimientos superficiales no experimentan variaciones, contrariamente a lo que se preveía al principio de la investigación, salvo para el escenario de mayor riego pero sin establecer un cambio en la magnitud del proceso hidrológico. Se pudo comprobar que los volúmenes de escurrimiento dependen esencialmente de las intensidades de la lluvia, más que de las condiciones precedentes al evento lluvioso. Esto demuestra un proceso de *impermeabilización* del sistema hidrológico, que se desentiende de los episodios climáticos anteriores, provocando respuestas rápidas dependiendo de la magnitud de las intensidades de lluvia (Zimmermann y Caamaño Nelli 1990, Zimmermann 1995).

Los caudales de descarga subterránea Q_G correspondientes a los contornos internos (arroyo Ludueña, canal Salvat y canal Ibarlucea) y externos (canal Candelaria, arroyos San Lorenzo y Saladillo, río Paraná), permitieron la estimación balances hidrológicos en la ZNS y en la ZS (Tabla 3).

Tabla 3. Destino (en mm. y en porcentajes) de los volúmenes de riego

	<i>NR</i> (mm)	<i>ETR</i> (mm)	<i>Q</i> (mm)	<i>Q_G</i> (mm)	ΔH_{ZNS} (mm)	ΔH_{ZS} (mm)
Escenario 1	102 (100%)	42 (41%)	0	9 (9%)	35 (35%)	15 (15%)
Escenario 2	311 (100%)	97 (31%)	0	34 (11%)	128 (41%)	52 (17%)
Escenario 3	619 (100%)	127 (21%)	12 (2%)	48 (8%)	304(49%)	128 (20%)

Un panorama general de los destinos alcanzados por el riego complementario indicaría que aproximadamente entre un 20% y 40% retorna a la atmósfera como *ETR*, un 10% escurre subterráneamente y entre un 70% y un 50% restante se distribuiría en almacenamientos de la *ZNS* y la *ZS*. A mayor tasa de riego mayor es el aporte hacia los almacenamientos subsuperficiales, en detrimento de los aportes hacia la atmósfera (*ETR*). Los escurrimientos superficiales poco se ven afectados.

Los resultados alcanzados con el modelo SHALL3 concuerdan con aplicaciones previas de balances hidrológicos en base a la metodología de Thornthwaite y Matter (Zimmermann 1994a) y el modelo Temez (Zimmermann 1994b) como así también a los resultados logrados con la versión anterior del modelo implementada como balance vertical de parámetros concentrados, SHPLAN2 (Zimmermann 1998a, 1998b, 1998c, 1999).

Cambios estadísticos en la respuesta hidrológica del sistema

La estadística que se utiliza en el diseño hidrológico parte de la premisa de que una muestra histórica de una variable aleatoria sirve para inferir propiedades estadísticas de una población. Cuando el sistema hidrológico cambia su configuración las muestras de la variable extractadas con anterioridad no serán representativas de los procesos futuros.

Tras la cuantificación de los efectos de realizar a gran escala un riego intensivo en el sistema del Ludueña, puede estimarse la influencia en las estadísticas de eventos extremos. Se extractaron los diarios máximos anuales de la evapotranspiración real, ascenso capilar, percolación y láminas de escurrimiento para cada uno de los escenarios de simulación, ajustándolos a un conjunto de leyes de distribución de probabilidad. El primer escenario de riego no refleja cambios estadísticos apreciables para ninguna de las variables analizadas (Figuras 2 a 5). No ocurre lo mismo para el escenario 3, en donde se pone de manifiesto un incremento importante de los máximos anuales de los ascensos capilares y las tasas de percolación y evapotranspiración. En el escenario 2 se establece una situación intermedia para las tasas de evapotranspiración y precolación. En términos generales, no se evidencian grandes cambios en el comportamiento estadístico del escurrimiento del sistema frente a la acción de riego.

Análisis sectorial por celdas de simulación

Los **niveles freáticos**, como una medida del almacenamiento subterráneo, presentan una fuerte dependencia con la evolución de las variables de entrada, *ETR* y *P*, en el sistema hidrológico. Los mismos decrecen, para todas las celdas y en todos los escenarios de simulación, durante el primer semi-período (aproximadamente 10 años), donde *ETP* supera a la precipitación (período seco). La segunda mitad del período de simulación, los niveles freáticos se recuperan retomando los valores iniciales, debido a la supremacía de las precipitaciones por sobre la *ETP*.

En el sistema natural se diferencia un sector de profundidades mayores en la cabecera, dos sectores de aguas poco profundas que podrían caracterizarse por profundidades inferiores a los 4 m ubicados en el centro-oeste y noreste y un sector intermedio, que separa los a anteriores, ubicado en el centro-este de la cuenca. El sector de mayores profundidades se ubica en la zona de mayores cotas topográficas. Los sectores de niveles someros se ubican en las partes deprimidas del sistema hidrológico: área de los bañados del Ludueña y área deprimida del canal Ibarlucea. El sector intermedio de mayores profundidades se corresponde con una elevación topográfica natural denominada *Morro de Funes*.

Los máximos aumentos de niveles freáticos, con respecto al escenario 0, para los tres escenarios de riego se dan en el sector de la cabecera de cuenca, aunque esto se ve atenuado por la gran profundidad que inicialmente se encontraban (Figuras 6 a 8). El mayor impacto se verifica en los sectores deprimidos del sistema hidrológico, en donde los incrementos de niveles son del orden de 1,5 m para el escenario 1, de 2,5 m para el escenario 2 y de 3 m para el escenario 3. El análisis de los niveles freáticos también se realizó para los valores medios en todo el período de simulación (Tabla 4).

Tabla 4. Aumentos medios en los niveles freáticos para las celdas representativas del sistema.

CELDAS	510	516	528	530	604	608
Escenario 1	0.40	0.60	0.60	0.10	0.50	0.30
Escenario 2	1.60	2.00	1.20	0.80	1.70	1.20
Escenario 3	2.30	2.50	1.80	1.50	2.60	2.00

En el escenario de riego N° 1, las celdas experimentan aumentos de pequeña magnitud. Las celdas deprimidas como las 530 (bañados del Ludueña) y 608 (canal Ibarlucea) ven controlados sus aumentos debido a que sus niveles freáticos están cercanos a la superficie y la demanda de humedad atmosférica ejerce un fuerte control sobre los mismos.

Para analizar un comportamiento medio del sistema en los diferentes escenarios de simulación se identificó el **año típico** de la serie para cada variable analizada. Este se determinó seleccionando el que produjo el menor desvío entre los valores anuales y el promedio estipulado para la serie total. Se extractaron importantes conclusiones relativas al funcionamiento del sistema hidrológico.

Para el escenario 0, los sectores de la cabecera de cuenca, el sector urbanizado de Rosario al SE y el sector del Morro de Funes, producen tasas de evapotranspiración inferiores al promedio (Figura 9). Los sectores deprimidos con niveles freáticos someros, ubicados en el centro-oeste y al NE, producen tasas de evapotranspiración superiores al promedio areal. Este patrón espacial no se vio afectado en los escenarios de riego 1 y 2. Para el escenario 3 (Figura 10) los niveles freáticos someros aparecen en casi la totalidad del sistema provocando una uniformidad en las tasas de evapotranspiración.

La percolación para el escenario 0 muestra comportamientos notablemente disímiles para los sectores de cabecera y distal, divididos por la isolínea de percolación nula (Figura 11). El sector oeste, por presentar las mayores profundidades freáticas y los suelos mejor drenados, constituye el área de recarga por excelencia. El sector este, que incluye las partes deprimidas del sistema hidrológico (bañados del Ludueña e Ibarlucea) constituye la zona de descarga freática por ascenso capilar. Las acciones de riego van alterando este esquema de funcionamiento, provocando manchones aislados en donde se dan procesos de ascenso de humedad y recargas acorde a los volúmenes suministrados por riego. En el escenario 3, salvo el sector de los bañados del Ludueña, en el resto del sistema se dan procesos de recarga debido a las elevadas normas de riego (Figura 12).

Para el escenario 0, pudo observarse que el sector distal del sistema produce los mayores volúmenes de escorrentía, superando los medios del sistema (Figura 13). Los patrones de distribución espacial de las tasas de escurrimiento prácticamente no se alteran ante las acciones de riego. El escenario 3, provoca un aumento de los volúmenes de escurrimiento aunque no es tan significativo como los cambios puestos en evidencia para los otros procesos hidrológicos.

El análisis por sectores y para las variables mencionadas también se realizó para los años seco y húmedo, detectándose variaciones significativas en los totales anuales (Tabla 5) pero sin alterar el funcionamiento básico de las áreas del sistema.

Tabla 5. Valores anuales para los años seco, típico y húmedo de la serie sintética de precipitación.

Esce- narios	ETR (mm)			B (mm)			Q (mm)		
	Año seco.	Año Típico	Año húm.	Año seco.	Año Típico	Año húm.	Año seco.	Año Típico	Año húm.
0	692	808	904	+98	-29	-143	24	152	385
1	721	853	954	+107	-50	-164	28	152	385
2	764	918	1003	+33	-109	-206	19	155	388
3	793	946	1034	-84	-204	-276	21	181	402

Impacto de las acciones en procesos de contaminación.

El sistema hidrológico bajo estudio, como la mayoría de los sistemas emplazados en la llanura santafecina, está sujeto a actividades potencialmente generadoras de carga contaminante al subsuelo. La intensa actividad agrícola-ganadera a la que se ven sometidos, genera procesos de contaminación difusa en áreas rurales. En este marco, la irrigación posibilita un acceso más rápido de compuestos químicos por lixiviación, mayormente cuando las normas de riego no son controladas. El riesgo de contaminación, es un factor que depende de la vulnerabilidad de los

acuíferos y de la carga contaminante. La vulnerabilidad de un acuífero representa la sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster y Hirata 1988).

Las cartografías de vulnerabilidad del acuífero freático, constituyen una medida del riesgo de contaminación en cada uno de los escenarios ante la falta de información de los patrones de consumo de fertilizantes y pesticidas. Para la evaluación de índices de vulnerabilidad del acuífero se aplicó el sistema **DRASTIC** (Vrba y Zaporozec 1994), considerando profundidades y recargas medias del acuífero en el período de simulación para cada una de las 48 celdas internas del modelo y para cada escenario de simulación.

Analizando procesos de contaminación debido al empleo de pesticidas, para el escenario sin riego, la zona potencialmente vulnerable a los pesticidas es la cabecera de cuenca (celeste), con peores condiciones para el subsector norte (amarillo) en donde la vulnerabilidad puede considerarse elevada (Figura 14). El escenario de riego 1, nuevamente no involucra cambios importantes en la vulnerabilidad del acuífero freático (Figura 15), dado que el patrón espacial del mapa de vulnerabilidad no se altera significativamente. El escenario 2, cambia profundamente la distribución espacial de la vulnerabilidad, generando un sector de grado moderado a alto en casi la totalidad del sistema y un sector de vulnerabilidad elevada en casi la cabecera de cuenca (Figura 16). El escenario 3, aumenta aún más la vulnerabilidad del acuífero freático, prácticamente subdividiendo al sistema hidrológico en dos sectores: una zona de elevada vulnerabilidad ubicada en la cabecera de cuenca y otra de moderada a alta vulnerabilidad en el resto del sistema (Figura 17).

CONCLUSIONES

El modelo hidrológico cuasi-3D SHALL3 ha permitido una evaluación detallada del impacto generado por una hipotética irrigación masiva en el sistema hidrológico del Ao. Ludueña.

El escenario de riego 1 no traería consecuencias importantes para los procesos hidrológicos del sistema real ni complicaría los procesos de contaminación que, eventualmente, puedan darse.

Para el escenario de riego 2, no existen variaciones en los comportamientos estadísticos de los máximos anuales de los ascensos de humedad en la ZNS y del escurrimiento superficial aunque se observan aumentos moderados de los máximos anuales de la evapotranspiración real y de las recargas freáticas. Un escenario de riego como el planteado traería consecuencias importantes para los procesos hidrológicos del sistema real, principalmente aumentos en las recargas y en los niveles freáticos con mayor impacto en las áreas deprimidas. La vulnerabilidad frente a los procesos de contaminación se eleva considerablemente en los sectores de cabecera de cuenca.

Para el escenario de riego 3, los procesos hidrológicos sufren variaciones muy significativas, tanto en los valores medios como en sus extremos así como en los patrones espaciales. Los niveles freáticos protagonizan aumentos de gran magnitud. En síntesis, este escenario de riego traería consecuencias de gran magnitud tanto para los procesos hidrológicos del sistema real, que abarcan la totalidad de la superficie colectora, como para la vulnerabilidad frente a los procesos de contaminación. Todos estos impactos hacen que una hipótesis de riego como la analizada sea inviable desde el punto de vista ambiental.

Se concluye en la gran importancia de realizar acciones de riego optimizando las dosis a suministrar acorde al uso consuntivo del cultivo.

Contrariamente a lo sospechado en los albores de la investigación, el escurrimiento superficial no refleja cambios significativos tanto en sus tasas medias como en las máximas anuales frente a las acciones de riego, lo cual refleja un síntoma de impermeabilización de la cuenca, dado que la escorrentía se independiza de la condición de humedad antecedente y sólo depende de la intensidad de la precipitación.

BIBLIOGRAFIA

- Foster S, Hirata R (1988) "*Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*". CEPIS – OPS – OMS. Lima. Perú.
- Vrba J, Zaporozec A (1994) "*Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*". IAH International Contribution to Hydrogeology. Vol 16. Hannover. Germany.
- Zimmermann E, Caamaño Nelli G (1990) "*Estimación del Coeficiente CN del Método del S.C.S. a partir de Información Pluviográfica, en la Cuenca del Arroyo Ludueña*"; XIV Congreso Nacional del Agua; Córdoba.
- Zimmermann, E(1994a) "*Evolución Temporal de Niveles Freáticos y de las Zonas de Interacción con la Hidrología Superficial en un Área de Llanura*", II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Sgo. de Chile, Chile.
- Zimmermann, E(1994b) "*Estimación de la Recarga Hidrogeológica mediante la Aplicación del Modelo de Balance TEMEZ*", II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Sgo. de Chile, Chile.

- Zimmermann E(1995) “*Implicancias Antrópicas en los Procesos de Inundaciones de Areas Llanas*”, Jornadas Regionales Interdisciplinarias sobre Ambiente, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe, Argentina.
- Zimmermann E, Navarro R, Silber M(1996) “*Un Modelo Probabilístico para la Generación Sintética de Tormentas*”, XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica; IAHR; Guayaquil; Ecuador.
- Zimmermann E.(1998a) “*Un esquema numérico alternativo para la resolución de la ecuación de Richards*”. XVII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe. Argentina.
- Zimmermann E. (1998b) “*Un modelo de parámetros concentrados para la simulación de la interacción suelo-vegetación y atmósfera*”. XVII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe. Argentina.
- Zimmermann E (1998c) “*Modificaciones en los procesos hidrológicos provocados por el riego complementario en un área de llanura*”. XVII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe. Argentina.
- Zimmermann E (1998d) “*Synthetic Storm Generation in a Flatland Region (Santa Fe, Argentina)*”. Journal of Environmental Hydrology. Vol. 6. N° 2. IAEH.
- Zimmermann E (1999) “*Assessment of Hydrological Changes Associated to Irrigation Projects in a Flatland Area (Santa Fe, Argentina)*”, Journal of Environmental Hydrology, IAEH, Vol 7, N° 1.
- Zimmermann E, Riccardi G. (2000) “*Modelo de simulación hidrológica superficial y subterránea para áreas de llanura*”. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba. Argentina.
- Zimmermann E (2000) “*Aplicación y calibración del modelo SHALL3 en el sistema hidrológico del Arroyo Ludueña, Santa Fe, Argentina*”. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba. Argentina.

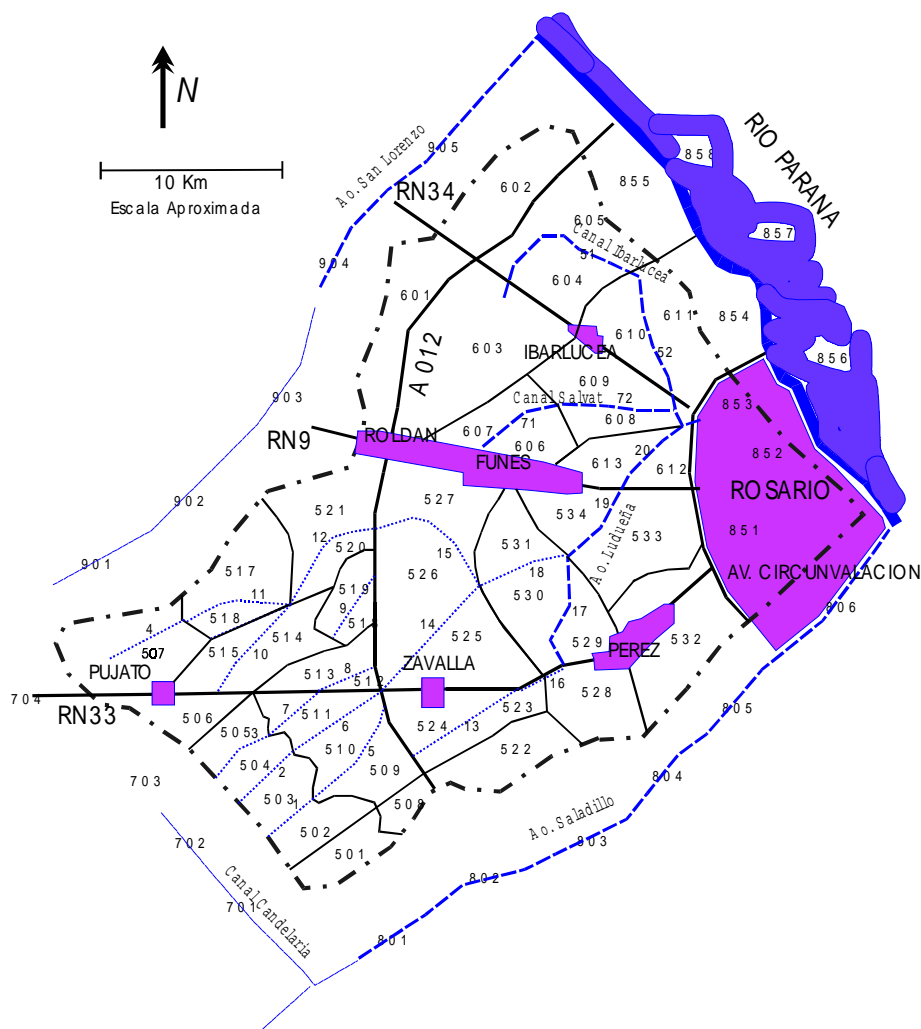


Figura 1. Esquematación de la topología adoptada

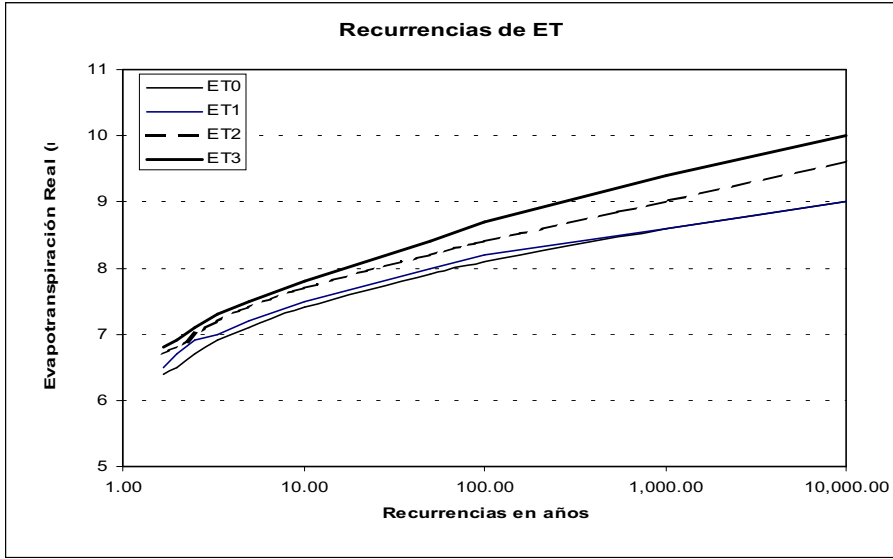


Figura 2 Estadísticas de evapotranspiración diaria

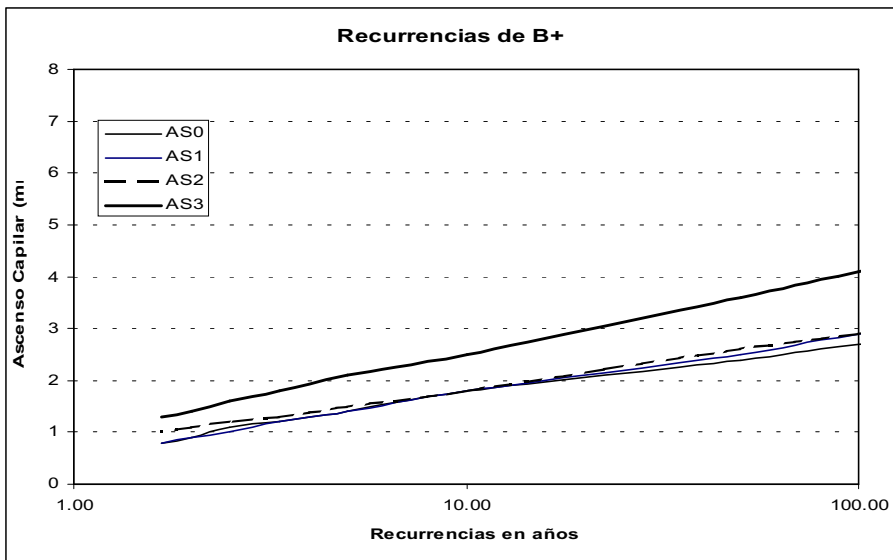


Figura 3. Estadísticas de Ascensos capilares diarios

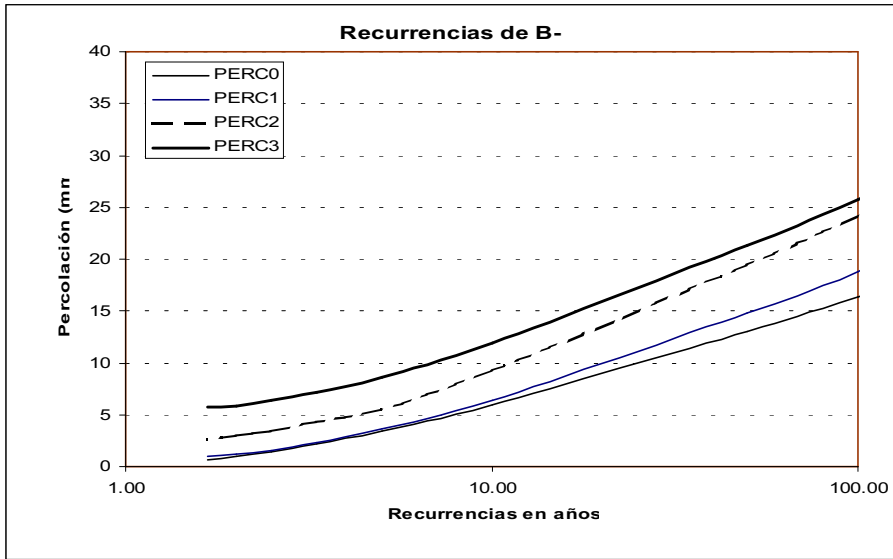


Figura 4. Estadísticas de percolación diaria

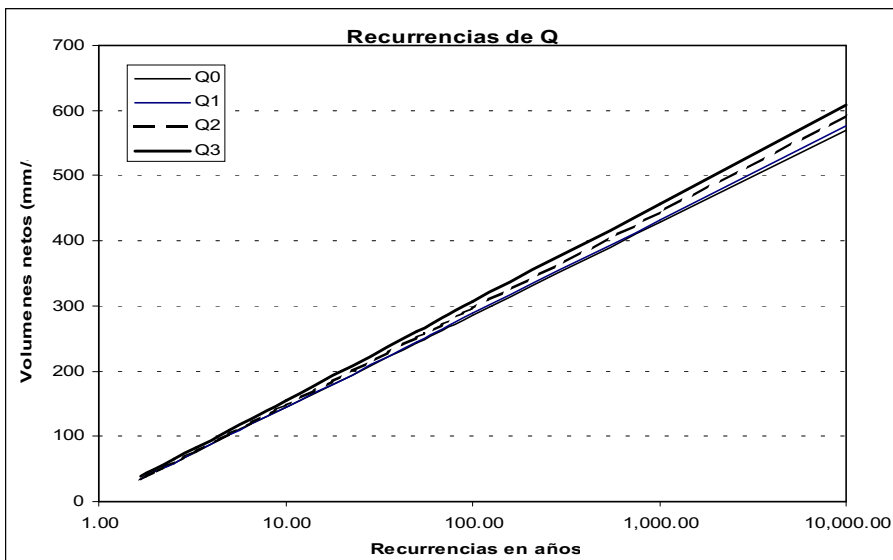


Figura 5. Estadísticas de escurrimientos

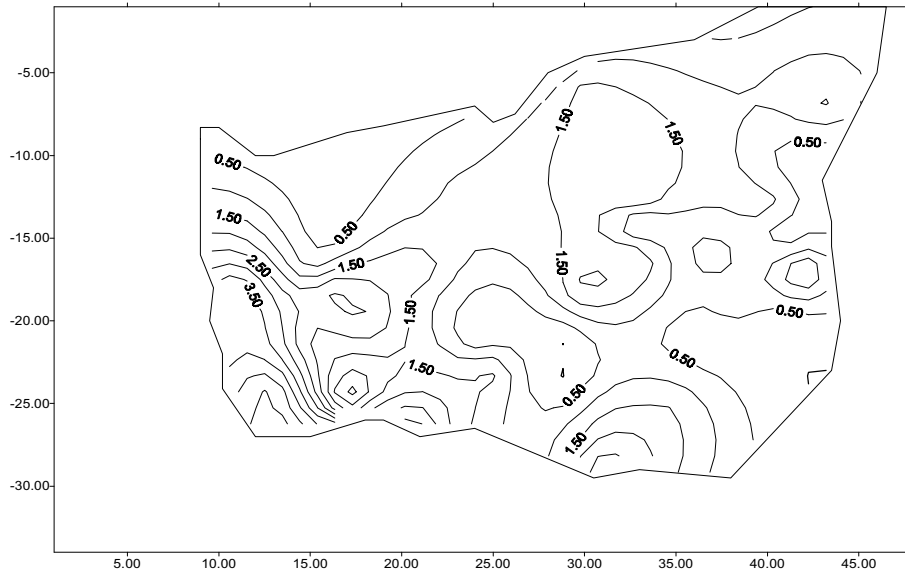


Figura 6. Aumentos de niveles freáticos. Esc. # 1

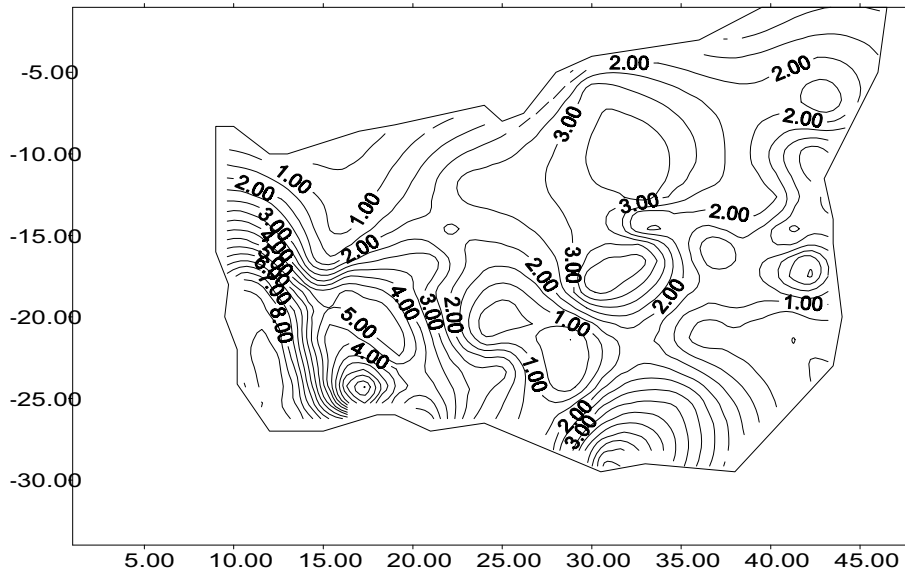


Figura 7. Aumentos de niveles freáticos. Esc. # 2

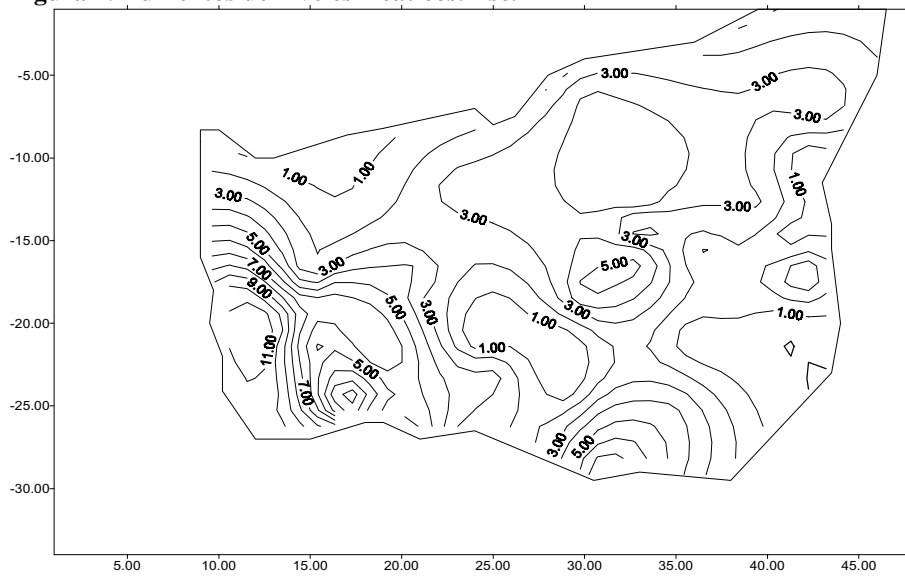


Figura 8. Aumentos de niveles freáticos. Esc. # 3

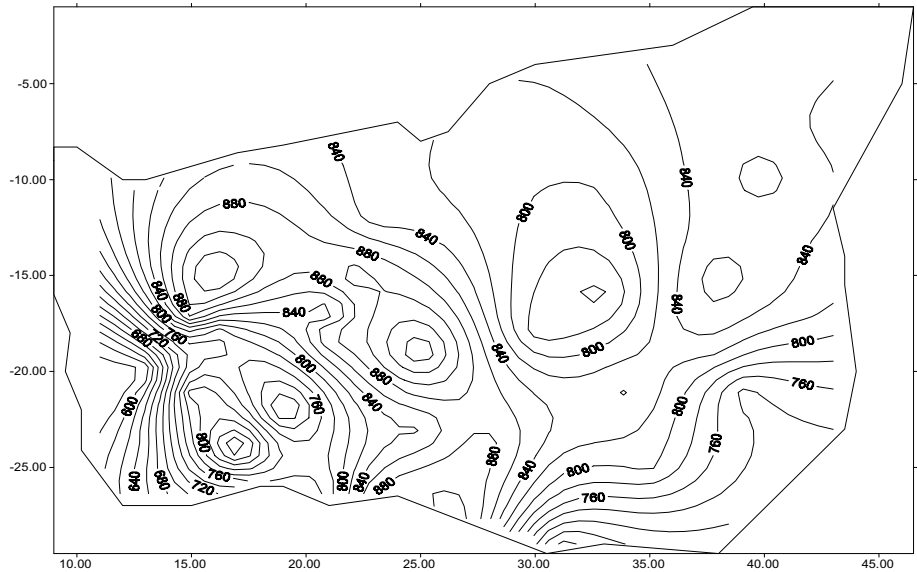


Figura 9. Isolíneas de Evapotranspiración. Esc. # 0

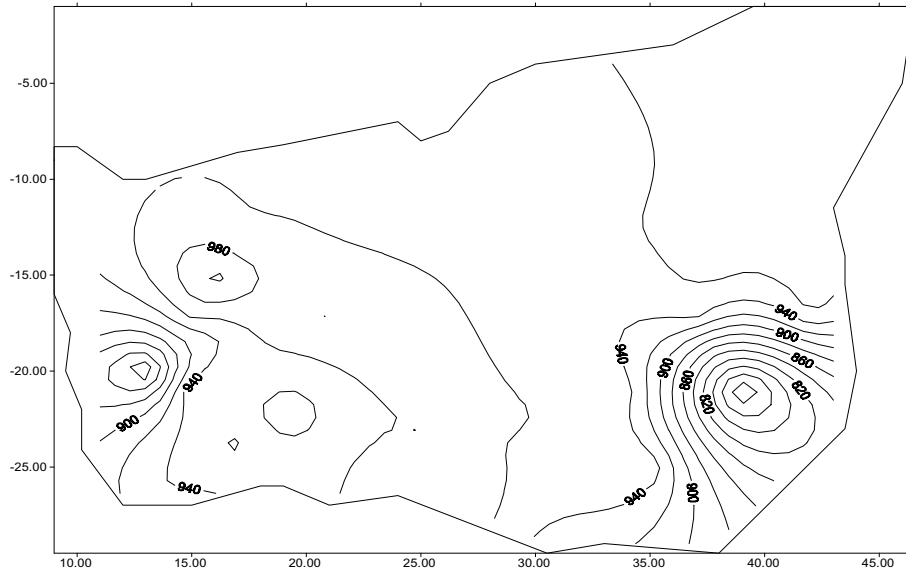


Figura 10. Isolíneas de Evapotranspiración. Esc. # 3

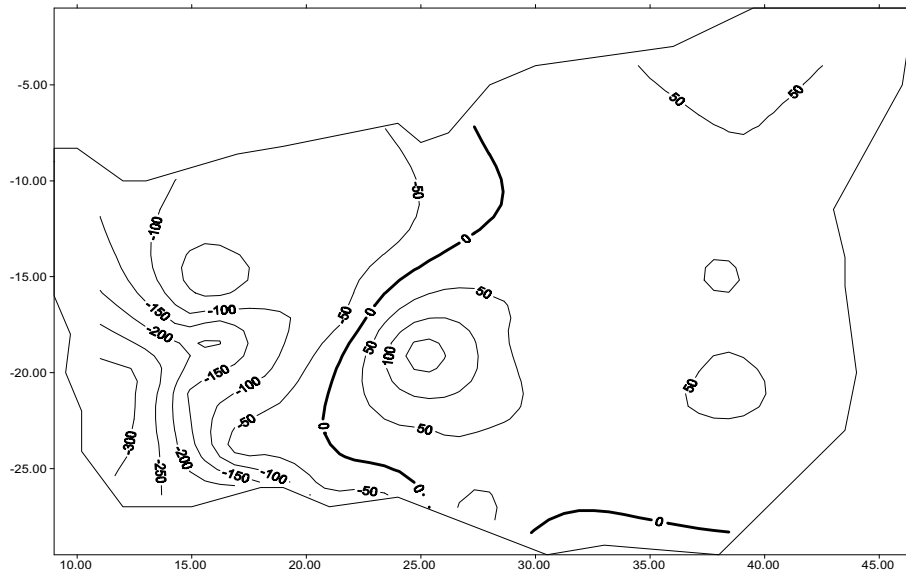


Figura 11. Isolíneas de Percolación. Esc. # 0

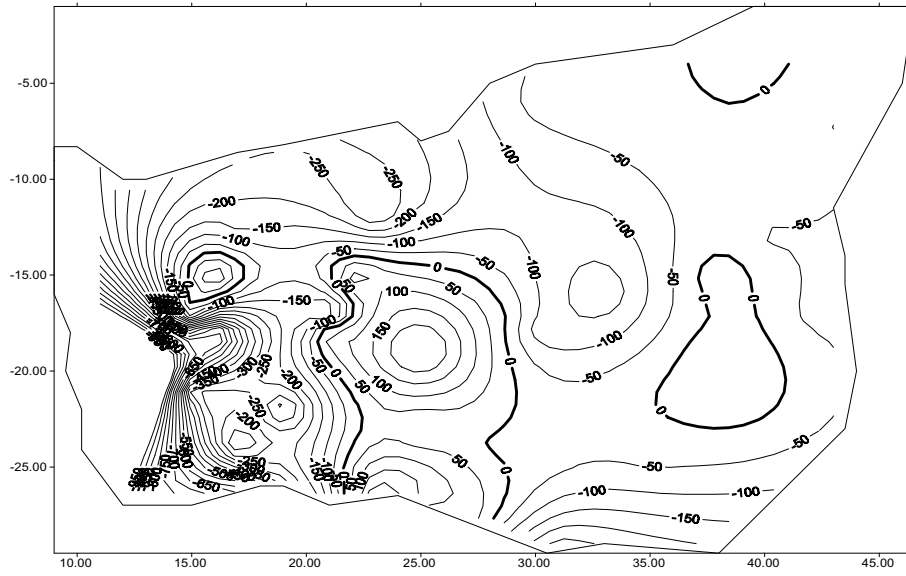


Figura 12. Isolneas de Percolación. Esc. # 3

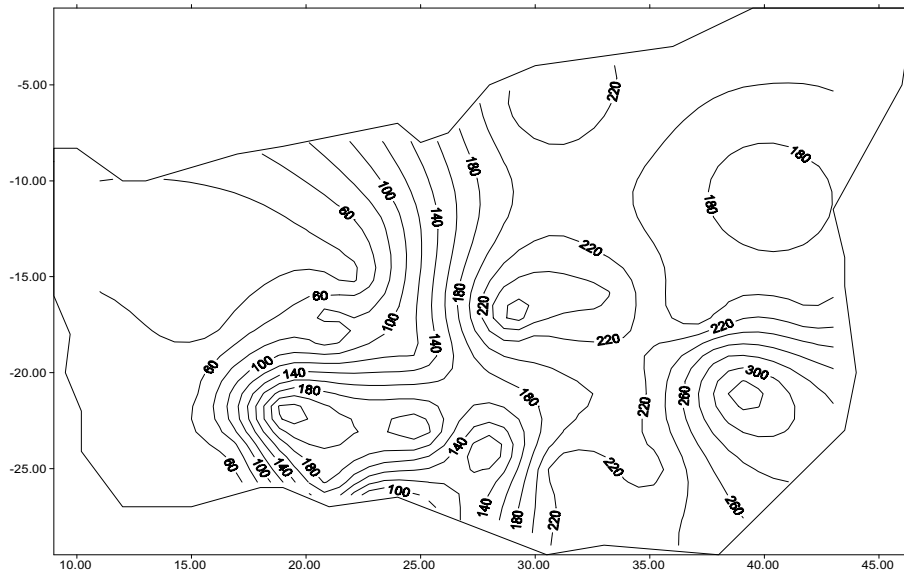


Figura 13. Isolneas de Escorrimento. Esc. # 0.

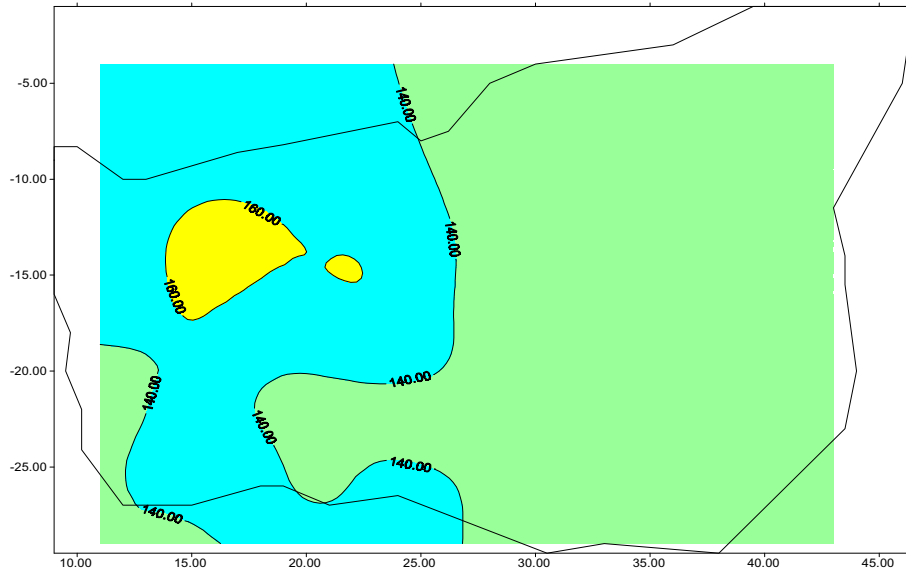


Figura 14. Vulnerabilidad del acuífero. Esc. # 0

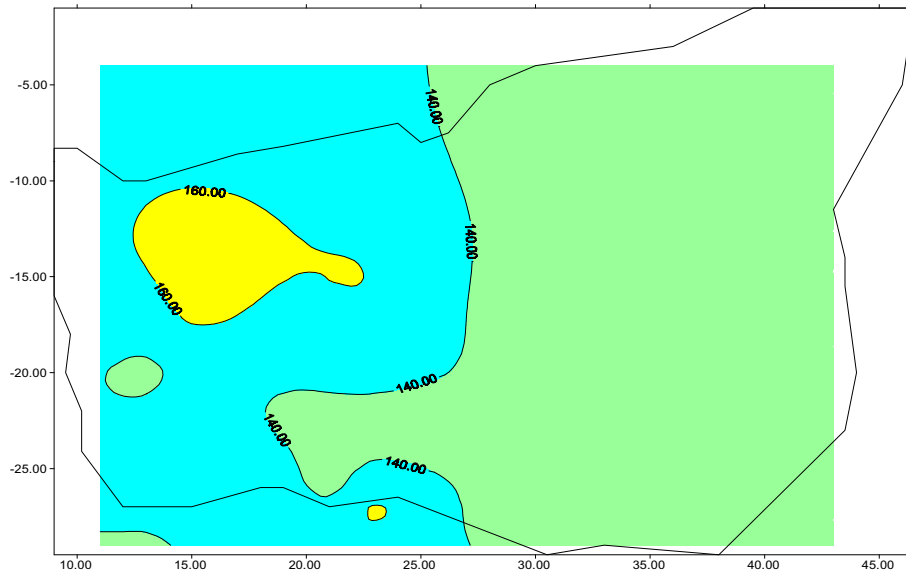


Figura 15. Vulnerabilidad del acuífero. Esc. # 1

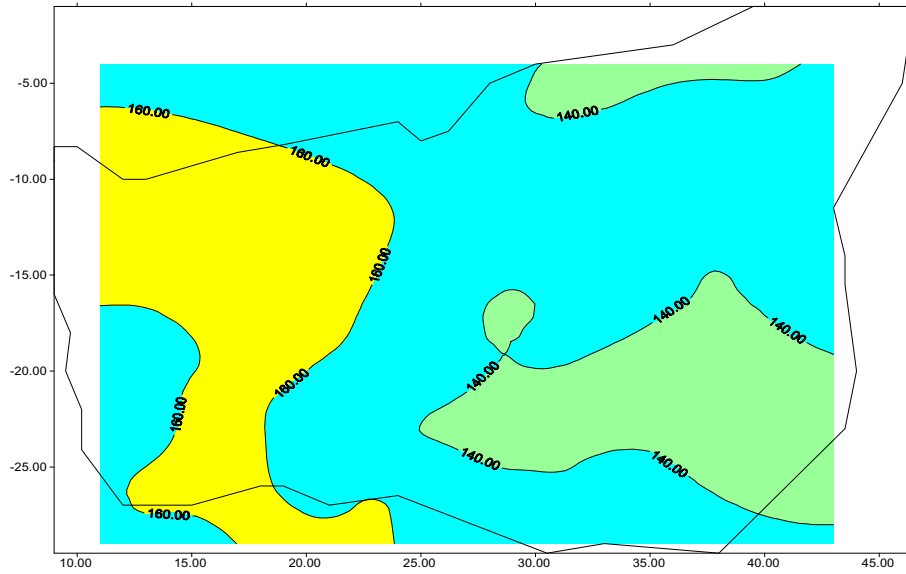


Figura 16. Vulnerabilidad del acuífero. Esc. # 2

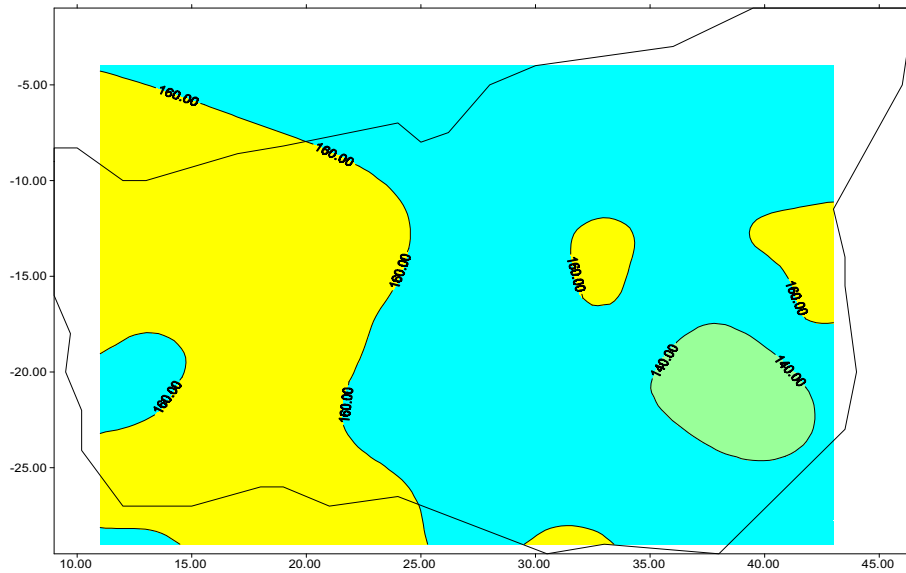


Figura 17. Vulnerabilidad del acuífero. Esc. # 3