

## DESARROLLO DE MODELOS HIDROLÓGICOS CON HERRAMIENTAS SIG

SILVINA BELMONTE<sup>1</sup> Y VIRGILIO NÚÑEZ<sup>2</sup>

Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo – Facultad de Ciencias Naturales

Universidad Nacional de Salta - CONICET

Avda. Bolivia 5150 – CP 4400 – Salta – Argentina

<sup>1</sup>[silvibel@unsa.edu.ar](mailto:silvibel@unsa.edu.ar)   <sup>2</sup>[nunezv@unsa.edu.ar](mailto:nunezv@unsa.edu.ar)

### RESUMEN

El desarrollo de modelos hidrológicos digitales en aproximaciones raster resulta una alternativa interesante para superar la escasez de datos hidrológicos y climáticos en la región del valle de Lerma, Argentina. Se ensayaron diferentes metodologías en un contexto SIG para definir, en espacios territoriales continuos, las variables: precipitación, temperatura, caudales máximos y pérdida de suelos. Los modelos que resultaron con mayor ajuste, fueron: regresiones con altitud y latitud para las variables climáticas; el método de Curva Número para el cálculo de caudales máximos, con nivel de detalle al 'píxel' y acumulación raster del escurrimiento; aplicación de la RUSLE para la estimación de la pérdida de suelos, incorporando cada factor como una capa temática. Los mapas generados resultan de interés para diversas aplicaciones: estudios de impacto ambiental, ordenación territorial, manejo de cuencas y recursos naturales y predicción de riesgos.

Palabras claves: SIG, modelos digitales, hidrología, estimación de caudales máximos, parámetros climáticos, RUSLE.

### DEVELOPMENT OF HIDROLOGICAL MODELS WITH GIS TOOLS

#### ABSTRACT

The development of raster-based hydrologic models is an interesting alternative to overcome the scarcity of hydrologic and climatic data in places like the valley of Lerma, Argentina. Different methods were tested in a GIS context to define the following continuous variables: rainfall, maximum water volume and soil loss. The models showing the best adjustments were: regressions between altitude and latitude for climatic variables; the method of the Curve Number to calculate maximum flows, with detail level to the 'pixel' and raster accumulation of runoff; application of the RUSLE for the estimation of soil loss, incorporating each factor as a thematic layer. The maps generated are of interest for various applications: environmental impact studies, territorial planning, catchment management and natural resources and risk prediction.

calculate maximum water volumes at pixel level (e.g. 625 sq m), including water runoff accumulation; and the application of the RUSLE to estimate soil loss. The output thematic maps can be applied to a variety of: studies ranging from environmental impact analysis, territorial planning and hazard predictions.

Keywords: GIS, digital models, hydrology, maximum water volumes estimations, climatic parameters, RUSLE.

## 1. Introducción

La caracterización hidrológica de las cuencas de nuestra región (NO argentino) resulta compleja, principalmente por las siguientes causas: registros climáticos y de aforo escasos y con series incompletas; variabilidad topográfica; diversidad de unidades ambientales; inaccesibilidad.

Cada microcuenca presenta características únicas que la identifican y diferencian de su entorno. Sin embargo, los procesos hidrológicos que en ellas se desarrollan son similares: precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento. En este contexto, la predicción y el modelado digital representan una alternativa interesante para la generación de información hidrológica de variables dinámicas como las precipitaciones, los caudales y la pérdida de suelos.

Existen numerosos métodos teóricos científicamente reconocidos que permiten estimar estas variables a nivel de cuencas hidrográficas. Por ejemplo, para la estimación de precipitaciones se utilizan interpolaciones, triángulos de Thiessen, entre otros. Para la predicción de caudales máximos, suelen emplearse los métodos de: Curva Número, García Nájera, Método Racional con adaptaciones de diversos autores (Ramser, Frevert, Charnier, Cook), etc. Para la estimación de pérdida de suelos comúnmente son utilizados: USLE, RUSLE, modelo de Fournier, fórmula de Fleming, Modelo de Gravišovic y Djorovic, entre otros. (Carballeira, 1987; Bianchi *et al.*, 1994; Mármol, 1999; Porta Casanellas *et al.*, 1999; Vich, 1999; Felicísimo Perez, 2001; Villanueva *et al.*, 2002).

Sin embargo, cuando se necesita información de los parámetros hidrológicos a nivel de detalle de muchas subcuencas, para sitios específicos o para la totalidad de un territorio, el cálculo y la aplicación tradicional de las fórmulas resulta muy complejo e incluso impracticable. El trabajo con capas temáticas en el marco de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite resolver este problema.

La investigación fue realizada en el marco de un proyecto de Ordenación Territorial para el Valle de Lerma – Salta, Argentina (Núñez, V. et. al., 2005-2008) - y de un Estudio de Impacto Ambiental y Social para el Gasoducto Macueta – Piquirenda - Dpto. San Martín, Salta, Argentina (IRNED, 2005).

## 2. Metodología y área de trabajo

Los SIG constituyen la plataforma de trabajo para el modelado espacial hidrológico planteado. Los software utilizados en el modelado fueron Idrisi 3.2 e Idrisi Kilimanjaro 14.02, aunque para diversos cálculos, la generación de las capas temáticas básicas, confección de bases de datos y presentación de cartografía se complementó con InfoStat 2005p.1, BricsCad IntelliCAD 4.1.0019, Carta Link 1.2 y la familia de Arc Gis 9.0.

Se definieron las siguientes variables hidrológicas para su estudio: precipitaciones, escurrimiento, caudales máximos y pérdida de suelos. Para cada una de estas variables, se seleccionaron y ensayaron diferentes metodologías y procesos a fin de generar modelos cartográficos digitales.

Los modelos climáticos fueron generados para el Valle de Lerma, sector productivo de la provincia de Salta de creciente desarrollo socio-económico, mientras que el área de ensayo para los modelos de caudales y pérdida de suelos se circunscribió a las altas cuencas de los ríos Caraparí-Itiyuro (sector argentino), Río Seco y Arroyo Yacuy, zona con recurrentes problemas de erosión hídrica y eventos naturales catastróficos asociados a las variables hidrológicas (remociones en masa, cortes en vías de comunicación).

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Modelos climáticos

Para el modelado se ensayaron diferentes métodos:

- ✓ Interpolación de datos de estaciones climatológicas: Sistema utilizado usualmente para la generación de mapas climáticos (Carballeira *et al.*, 1987; Mármol, 1999; García Bes, 1999).
- ✓ Obtención de modelos de temperaturas a partir del análisis y correlación con datos de temperatura del suelo, obtenidos a partir de la banda 6 de imágenes satelitales.
- ✓ Estudio de correlación de las variables climáticas entre sí y con variables topográficas, de ubicación y cobertura del suelo.

Si bien la variable temperatura no está directamente relacionada con los procesos hidrológicos, aquélla es incorporada en el modelado por su influencia en el balance hídrico y su posible interrelación con otras variables climáticas como la precipitación.

El desarrollo de modelos climáticos a partir de análisis estadísticos de correlación y regresión resultaron los más adecuados para aplicar en el Valle de Lerma (Salta – Argentina), donde la situación topográfica condiciona fuertemente las variables climáticas (la altitud varía desde 1000 a 4500 msnm aproximadamente) y los datos de estaciones son puntuales y escasos.

Se desarrollaron y evaluaron regresiones lineales y no lineales, simples y múltiples, para las variables: temperatura y precipitaciones (registros continuos > 10 años, para 33 estaciones de la

zona de valle y 12 puntos de control en áreas montañosas y periferia) versus altitud, orientación, latitud y vegetación - Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas – (NDVI), correspondientes a los mismos puntos de las estaciones en los modelos desarrollados.

Las temperaturas fueron estimadas mediante un modelo de regresión potencial simple a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE), resultando una relación inversa entre la temperatura y la altitud ([figura 1a](#)).

El mapa digital de precipitaciones fue obtenido a partir de un modelo más complejo, ya que el comportamiento de esta variable para el área de estudio es diferente a partir de los 1615 msnm. Por debajo de esta cota, el modelo ajusta a una regresión lineal múltiple con la altitud y la latitud. A partir de los 1615 msnm, el modelo es desarrollado mediante una regresión polinomial inversa simple con la altitud y correcciones de ajuste con las variables: orientación, latitud y vegetación (NDVI). El Modelo Digital de Precipitación Media Anual para el Valle de Lerma ([figura 1b](#)) surge finalmente de unir los modelos parciales generados para las dos series de datos (por encima y por debajo de 1615msnm).

### 3.2. Esguerrimiento

El esguerrimiento fue calculado como paso intermedio de las fórmulas de caudales y directamente con el módulo "runoff" de Idrisi Kilimanjaro, incorporando los factores: MDE, precipitaciones, permeabilidad del suelo y pit removal (remoción de depresiones inexistentes en el terreno generados por la interpolación de datos de altitud).

El modelo generado por "runoff", aplicado sobre el MDE y sin incorporar especificaciones, resulta adecuado para la definición en detalle de la red de drenaje superficial. La incorporación de las variables precipitación y permeabilidad del suelo, permite obtener un valor estimado de lámina de agua esguerrida. Sin embargo, deben tenerse en cuenta que pequeñas variaciones en la entrada de agua y/o en el proceso de infiltración, modifican los valores de esguerrimiento obtenidos por el modelo. Los datos de entrada deberán ajustarse pues a los requerimientos, objetivos y nivel de detalle esperados para cada aplicación (intensidades de lluvia máximas para condiciones extremas, precipitaciones medias para esguerrimientos normales, mediciones de infiltración a campo para trabajos detallados o estimaciones de permeabilidad a partir de textura de suelo para escalas más generales, etc.). Un problema detectado para la estimación de los esguerrimientos reales con la aplicación de la función "runoff", es que ésta no considera el factor cobertura vegetal en el modelo. Esto podría salvarse, incorporando como factor permeabilidad del suelo, una imagen reclasificada que refleje los efectos combinados del suelo y la cobertura vegetal en el proceso de infiltración.

### 3.3. Caudales máximos

Los modelos de caudales máximos fueron desarrollados mediante la aplicación de métodos tradicionalmente utilizados para el cálculo de caudales, realizando adaptaciones para su manejo en aproximaciones raster.

A los fines de comparar los resultados, probar las metodologías y discernir cuáles presentan el mejor ajuste, se trabajó en tres niveles: cuencas generales, subcuencas y píxel (como mínima unidad de cuenca). A nivel de subcuencas se aplicaron los métodos de García Nájera, Curva Número (CN) y Método Racional (Frevert y Charnier). Para el cálculo de caudales, considerando como unidad de análisis el píxel y las cuencas generales, sólo se aplicó el método de CN, por presentar valores más adecuados, teniendo en cuenta un margen de seguridad para proyectos de obras de arte.

A nivel de píxel ( $625 \text{ m}^2 < \text{Área real del píxel en el terreno (IFOV)} < 1400 \text{ m}^2$  – valor corregido por la pendiente -) se observaron caudales máximos variables para el área de las altas cuencas de los ríos Caraparí-Itiyuro, Río Seco y Arroyo Yacuy, entre  $0.00023$  y  $0.00576 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los caudales mayores corresponden a sitios con fuertes pendientes, cobertura escasa y/o suelos poco permeables.

Introduciendo la imagen de  $Q_p$  (caudal por píxel), calculado por el método de CN, en cuenta del parámetro de PP (precipitación) en el módulo runoff (entrada de agua en el modelo), se obtuvo un valor de caudal acumulado por píxel. Con este modelo es posible calcular el valor de caudal máximo concentrado sobre los cursos de agua y sobre cualquier punto del espacio analizado (traza, camino, parcela, cierre de subcuenca, cuenca general).

En la [figura 2](#) se presenta un modelo digital de caudal máximo acumulado obtenido por el método de CN para duración de la tormenta =  $T_c$  (Tiempo de concentración), nivel de detalle píxel = unidad de cuenca. El modelo permite identificar áreas con fuertes escurrimientos (Ej.: alta cuenca de los ríos Caraparí-Itiyuro) y predecir sitios conflictivos para la realización de obras de infraestructura.

El análisis comparativo de los caudales máximos obtenidos a nivel de subcuencas, permite observar que el método de la CN calcula un caudal pico más elevado que los otros métodos, mientras que García Nájera presenta los caudales más bajos y el método racional valores intermedios a altos según el caso. Estas variaciones concuerdan con observaciones y cálculos para diversas cuencas, citadas en la bibliografía, y se fundamentan principalmente en la variabilidad de parámetros y supuestos asumidos en los diversos modelos. La CN incorpora mayor cantidad de variables en el cálculo: diferencias de cobertura, pendiente, textura y humedad antecedente de los suelos, intensidad de la lluvia y tiempo de concentración, por lo que los resultados podrían ajustarse más a la realidad.

Comparativamente, los caudales calculados por el método de CN considerando cada píxel como la mínima unidad de representación de la cuenca (y, las subcuencas como los caudales acumulados píxel a píxel dentro de las mismas), presentan resultados diferentes en relación al cálculo directo a nivel de subcuencas. Por el contrario, los valores calculados para las cuencas generales resultan similares a los caudales acumulados por píxel (Tabla 1). Respecto a estas diferencias y similitudes, es preciso realizar algunas aclaraciones que confirman la mayor confiabilidad y precisión del método de CN con base en el píxel como la mínima unidad de representación de la cuenca:

- ✓ Los valores de caudal máximo obtenidos directamente por subcuencas no consideran los aportes externos a esas unidades, mientras que los caudales estimados por píxel acumulados (runoff) para

las mismas subcuencas incluyen el aporte de todos los píxeles que drenan hasta el punto de salida considerado, por lo que en muchos casos los caudales resultan superiores.

- ✓ Los caudales estimados directamente para las subcuencas toman como base tiempos de concentración diferentes, derivados de tamaños y características de superficie diversos, por lo que estrictamente no son comparables. Por la misma razón, no resulta válido considerar la sumatoria de los caudales directos por subcuencas, para estimar el caudal de cuencas más grandes (se estarían sumando tiempos diferentes).
- ✓ Si bien los valores directos estimados por subcuencas no permiten dimensionar con exactitud los caudales reales en cada punto, básicamente por considerar  $T_c$  diferentes, resultaron valiosos para comparar los distintos métodos y validar el supuesto de que el método de la CN es el más conservador y ajusta mejor a las condiciones particulares del medio, por incorporar variables de suelo, cobertura, además del  $T_c$ .
- ✓ El cálculo de caudal para las cuencas generales considera el  $T_c$  de la cuenca grande y coincide por lo tanto con la estimación del caudal final acumulado por píxel. Sin embargo, los valores internos en cada cuenca (estimaciones de caudal en cruces o subcuencas) son sobreestimados al considerar un  $T_c$  mayor correspondiente a la cuenca general.
- ✓ Si bien a nivel de píxel, los tiempos de concentración también difieren, estas variaciones son mínimas y para unidades de análisis mayores (cuenca total y subcuencas), el aporte máximo de agua al sistema se mantiene constante una vez superado dicho  $T_c$ . La sumatoria de los  $T_c$  de los píxeles, siguiendo el camino más largo hasta la salida o cierre de una unidad de cuenca superior, es igual al  $T_c$  de esa unidad mayor. El modelo de acumulación espacial de los caudales máximos estimados para los píxeles, desarrollado a partir del módulo "runoff", incorpora este concepto.
- ✓ Sólo el método de CN, con base en el píxel, permite obtener valores estimativos de caudales máximos sobre cauces naturales, para analizar cualquier sitio de interés.

### 3.4. Estimación de la pérdida de suelos

Para la estimación de la pérdida de suelo se aplicó la RUSLE, modelo matemático de tipo paramétrico, que integra variables reconocidas como de singular significación en el fenómeno de la erosión hídrica. La ventaja principal de la RUSLE es requerir información más accesible que la USLE, lo que hace más factible su aplicación (Villanueva, Osinaga y Chávez, 2002).

El modelado raster fue realizado directamente con el módulo RUSLE del programa Idrisi Kilimanjaro. Los factores que intervienen en la pérdida de suelos, insumos de base para la aplicación del modelo, fueron:

- ✓ Factor Erosividad de las lluvias (R): Dado que no se cuenta con registros de Intensidad Máxima en 30 minutos para el área de estudio, se obtuvo una aproximación del factor R para la RUSLE con datos de precipitaciones medias de localidades ubicadas dentro y/o cerca de las cuencas analizadas (FAO, 1978, aceptada en 1992 por USDA; en Villanueva, Osinaga y Chávez, 2002).

- ✓ Factor Erodabilidad del suelo (K): Debido a que no se dispone de información detallada para los parámetros que condicionan la erodabilidad del suelo (textura, estructura, materia orgánica del horizonte expuesto y la permeabilidad del perfil), se realizó una aproximación a los valores de K en base a las texturas de los suelos (Aplicaciones de RUSLE, SWCS, 1995 en Villanueva, Osinaga y Chávez, 2002).
- ✓ Factor Topográfico (LS): Representa el efecto interaccionado del largo (L) y el grado de la pendiente (S). En Idrisi Kilimanjaro, el módulo RUSLE calcula automáticamente este factor, introduciendo el MDE y especificaciones sobre el largo máximo de la pendiente, intervalos para el grado de la pendiente y para el aspecto (orientación de laderas). Si no se dispone de este módulo, es posible estimar el factor LS por medios gráficos o analógicos a nivel de cuencas y subcuencas (Mármol, 1999) o por medio de operadores de superficie y funciones trigonométricas en aproximaciones raster (nivel de detalle: píxel).
- ✓ Factores Cobertura (C) y Prácticas de Manejo o Conservación (P): Los valores de C se obtienen de tablas de diversos autores que consideran tanto el tipo como el porcentaje de cobertura (citadas por Porta Casanellas, López Acevedo Reguerín y Roquero De Laburu, 1999; Vich, 1999; Mármol, 1999; Villanueva, Osinaga y Chávez, 2002). El factor P es considerado 1, cuando no existen o no es posible espacializar, prácticas de control de erosión ni de manejo de las actividades productivas.

En la [Figura 3](#) se presenta una capa temática resultante del modelo, con la estimación de la pérdida de suelos promedio a nivel de sub-cuencas, para el área de los ríos Caraparí – Itiyuro, Río Seco y A° Yacuy. Vale aclarar que la RUSLE aplicada a las sub-cuencas, homogeniza la pérdida de suelos en dichas unidades, no resultando aplicable para valorar procesos erosivos puntuales de gran magnitud, como son las cárcavas.

#### 4. Conclusiones

El modelado hidrológico resulta una herramienta digital altamente eficiente para el trabajo con aproximaciones raster de los SIG. Los métodos que pueden ser aplicados para la estimación de las diferentes variables hidrológicas son diversos, pero en todos los casos pueden ser planteados como procesos integradores de capas temáticas para el modelado.

Los modelos que resultaron con mejores ajustes para la región del NO argentino, en el marco de nuestras investigaciones, fueron:

- ✓ **Modelos climáticos:** regresiones simples y múltiples entre variables climáticas y topográficas (altitud y latitud), con ajustes parciales por orientación del relieve y vegetación.
- ✓ **Estimación de escurrimiento y caudales máximos:** aplicación del método de CN con adaptaciones para trabajo a nivel de píxel (como mínima unidad de cuenca), en contexto SIG. Acumulación de los valores de escurrimiento y caudal calculados para los píxeles, con módulo runoff de Idrisi Kilimanjaro.

- ✓ **Predicción de pérdida de suelos:** aplicación de la RUSLE, en sistemas de aproximación raster (cada factor representado por una capa temática).

La principal ventaja de trabajar con modelos digitales, es la posibilidad de generar mapas raster confiables para las variables hidrológicas, con fines y aplicaciones diversas (estudios de impacto ambiental, simulaciones espacio-temporales, ordenación territorial, modelos de capacidad de acogida para alternativas de uso, gestión de los recursos naturales, predicción de riesgos naturales -inundaciones, procesos de remoción-, cálculo general de obras de arte, planes de control de erosión, etc.). Vale aclarar que, si bien es posible acceder a aproximaciones puntuales con estos modelos hidrológicos, los mismos están basados en métodos generales, desarrollados a nivel de cuencas hidrográficas. Para la proyección de infraestructuras, por ejemplo, deberán complementarse con la aplicación de métodos más rigurosos basados en series temporales y registros puntuales de campo.

### Referencias bibliográficas

- Belmonte, S., Núñez, V. y J. Viramonte (2004): *Modelos Digitales Climáticos para el Valle de Lerma – Salta – Argentina*. I Reunión de Imágenes Satelitarias y SIG aplicada a la Gestión de los Recursos Naturales, Culturales y Medio Ambiente. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
- Bianchi A. R., Yañez, C. E. (1992): *Las precipitaciones en el Noroeste Argentino*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Estación Experimental Agropecuaria Salta. Segunda edición. Salta. Argentina.
- Bianchi, A. R., Nieva, I. J. y Yañez, C. E. (1994): *Un modelo simple de regresión lineal para la estimación de temperaturas medias mensuales regionales*. INTA. Salta. Argentina.
- Carballeira, A. et. al. (1987): *Bioclimatología de Galicia*. Fundación Pedro Barrié de la Maza. Conde de FENOSA. La Coruña. España.
- Chuvieco, E. (1990): *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones RIALP, S.A. Madrid. España.
- Felicísimo Pérez, A. M. et. al. (2001): "Elaboración del atlas climático de Extremadura mediante un sistema de información geográfica", *GeoFocus (Artículos)*, n°1, p.17-23.
- García Bes, P. (1999): *Riesgo Hidrológico en el Alta Cuenca del Río Mojotoro*. Tesis Profesional. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Naturales. U.N.Sa. Salta. Argentina.
- Idrisi Kilimanjaro (2004): *Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Manual en español. Clark Labs University. Worcester MA. USA.
- Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo –IRNED- (2005): *Estudio de Impacto Ambiental y Social Gasoducto Macueta – Piquirenda*. Empresa Pan American Energy – Universidad Nacional de Salta. Argentina
- Mármol, L. A. y L. C. Mármol de Ferretti (2004): *Las lluvias en el sector Noroeste del Valle de Lerma. Provincia de Salta*. X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata. Argentina.
- Mármol, L. A. (1999): *Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes*. Tomos I y II . FCN. Universidad Nacional de Salta. Argentina.



Belmonte, S. y Núñez, V (2006): “Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG”, *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 6, p.15 -27. ISSN: 1578-5157

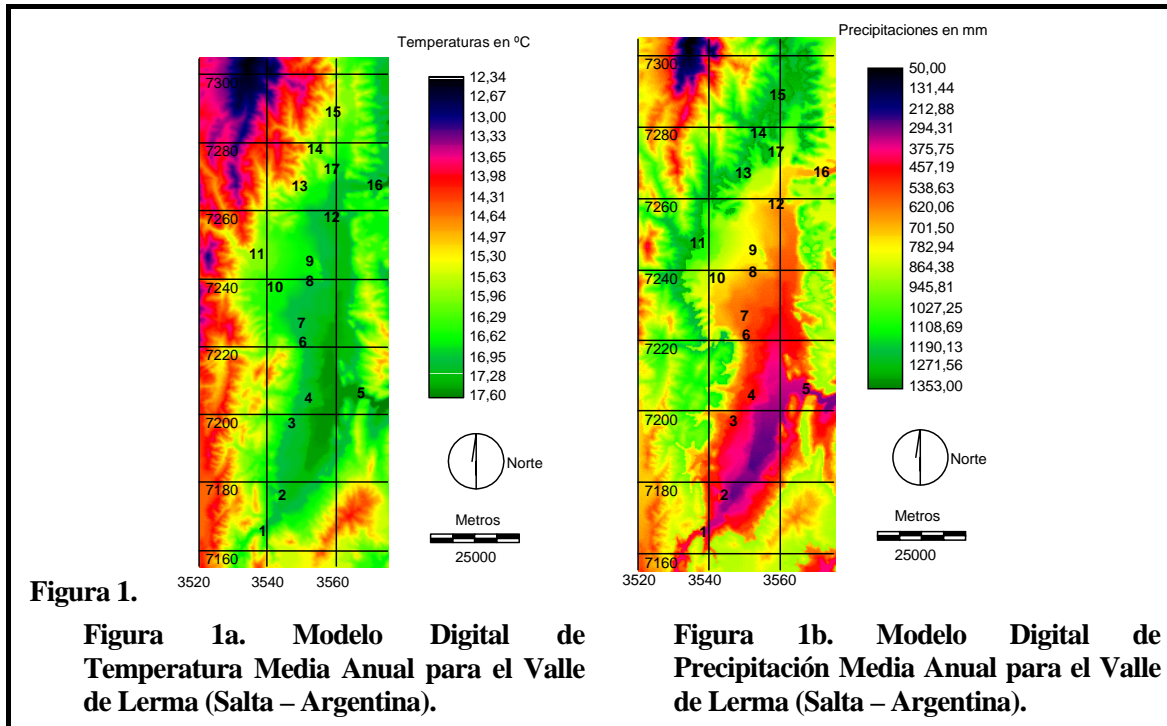
- Menéndez, M. A., R. Moreno y V. Núñez (2002): *Clasificación de la Vegetación del Valle de Lerma a partir de Imágenes Landsat*. Informe final – Proyecto N° 697. CIUNSA. Salta. Argentina.
- Núñez, V. et al. (2005): *Ordenación Territorial del Valle de Lerma*. Informe final. Proyecto N° 1001. CIUNSA. Salta. Argentina.
- Núñez, V. et al. (2005-2008): *Ordenación Territorial del Valle de Lerma. Parte II. Pautas para la Planificación*. Proyecto N° 1345. CIUNSA. Salta. Argentina. Beca de Postgrado Tipo I (2004-2006). CONICET. Becaria: Silvina Belmonte.
- Peña Sánchez de Rivera, D. (1999): *Estadística. Modelos y Métodos 2. Modelos lineales y series temporales*. 2ª Edición revisada. Alianza Universidad Textos. Madrid. España.
- Perfiles 102710 y 9912. USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Universidad de Granada. España. <http://edafologia.ugr.es/alumnos/u102710.htm>.
- Porta Casanellas J., López Acevedo Reguerín, M. y C. Roquero De Laburu (1999): *Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. España.
- Vich, A. I. J. (1999): *Aguas continentales. Formas y Procesos*. Manual de aplicaciones prácticas. CONICET. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza.
- Villanueva, G., Osinaga R. y A. Chávez (2002): *Manual de tecnología de los suelos agrícolas (El uso sustentable de los suelos)*. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Argentina.

## TABLAS

**Tabla 1. Comparación entre los caudales máximos (m<sup>3</sup>/s) calculados para las cuencas generales por el método de Curva Número.**

Cuencas Generales	Q m <sup>3</sup> /seg (nivel cuencas generales)	Q m <sup>3</sup> /seg (píxel acumulado)
Cuenca Río Caraparí – Itiyuro (sector argentino)	1486.05	1517.80
Cuenca Río Seco	697.61	621.15
Cuenca A° Yacuy	293.32	211.25
Afluente A° Yacuy – Flanco oriental	204.89	137.28
Cuenca Río Itau	229.21	136.67

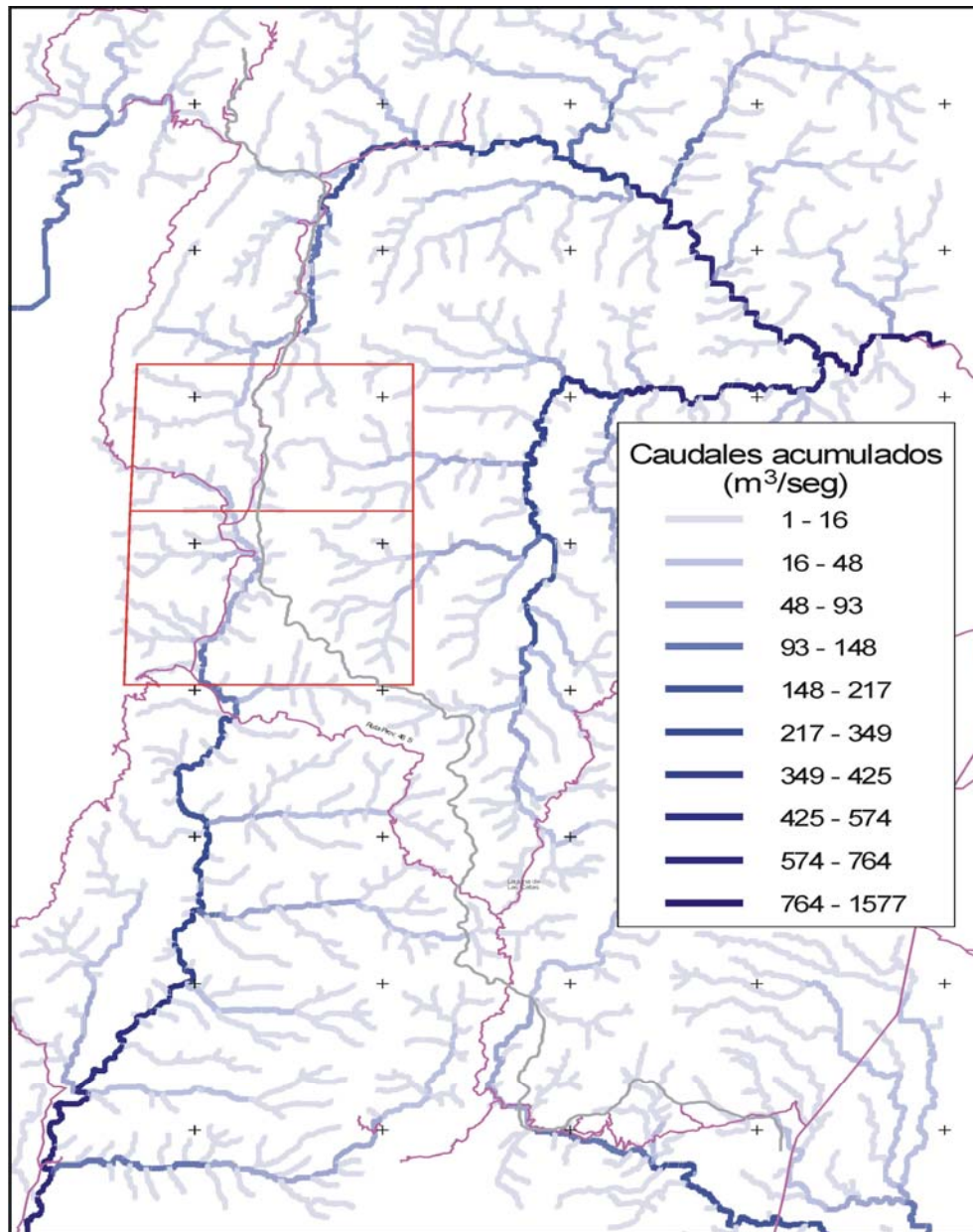
## FIGURAS



**Referencia localidades:** 1. Alemania – 2. Talapampa – 3. Ampascachi – 4. Coronel Moldes – 5. Cabra Corral – 6. Chicoana – 7. El Carril – 8. La Merced – 9. Cerrillos – 10. Rosario de Lerma – 11. Campo Quijano – 12. Salta – 13. San Lorenzo – 14. Los Yacones – 15. Santa Rufina – 16. Mojotoro – 17. Vaqueros.

**Proyección Conforme de Gauss - Krüger Faja 3, unidades en Km. Datum: Campo Inchauspe.**

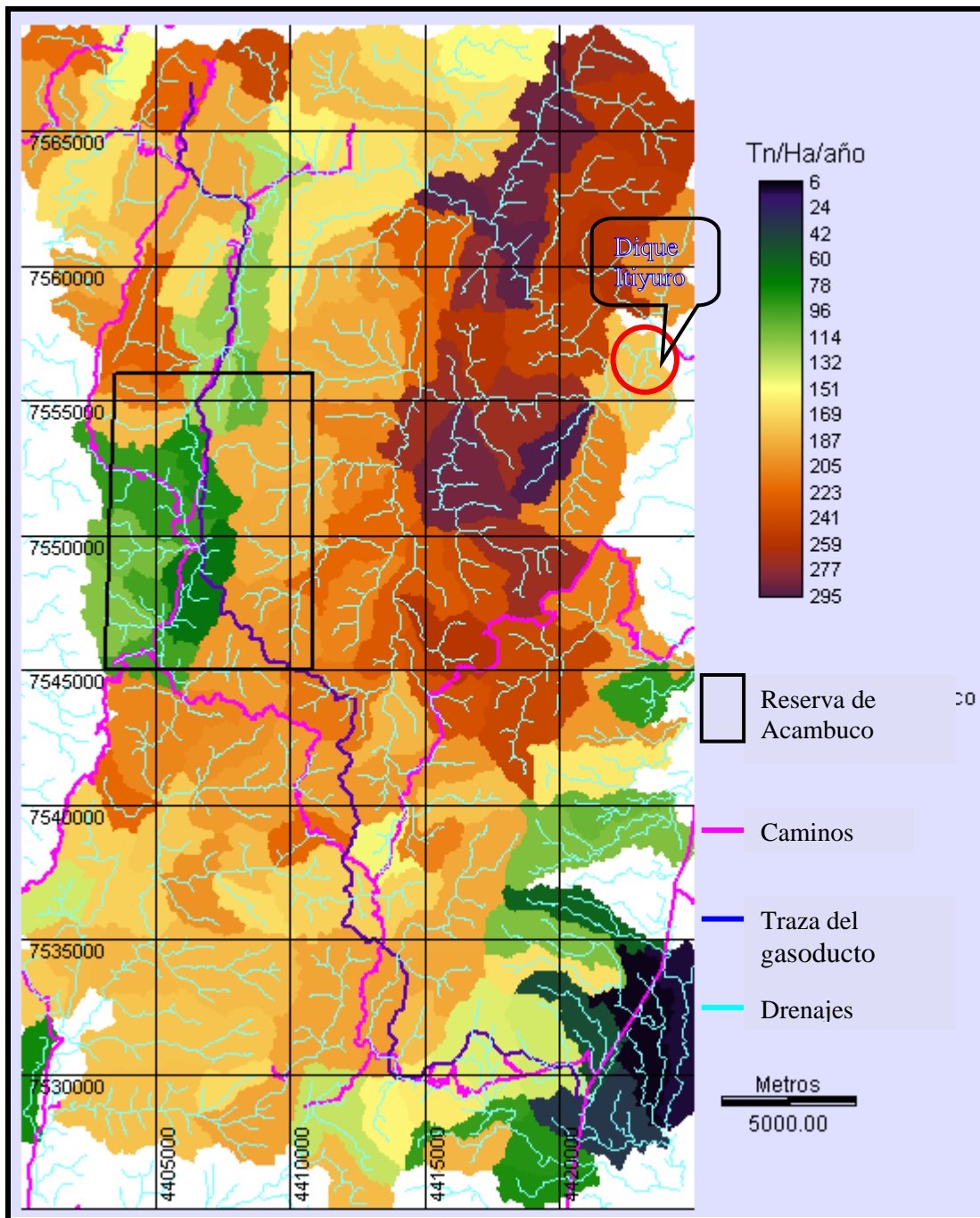
Fuente: Belmonte, S., Núñez, V. y J. Viramonte (2004).



**Figura 2.** Caudal máximo acumulado sobre la red principal de drenaje (runoff para Q, método CN, para D = Tc). Vector proveniente de un modelo digital de caudales máximos acumulados para el área de las altas cuencas de los ríos Caraparí-Itiyuro, Seco y Arroyo Yacuy (NO argentino).

Fuente: IRNED (2005).

Belmonte, S. y Núñez, V (2006): "Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG", *GeoFocus (Informes y comentarios)*, n° 6, p.15 -27. ISSN: 1578-5157



**Figura 3. Pérdidas promedio de suelos en condiciones naturales y por sub-cuenca para el área de las altas cuencas de los ríos Carapari-Itiyuro, Río Seco y Arroyo Yacuy (NO argentino). El círculo rojo representa el emplazamiento aproximado del Dique Itiyuro.**

Fuente: IRNED (2005).

*Belmonte, S. y Núñez, V (2006): "Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG", GeoFocus (Informes y comentarios), n° 6, p.15 -27. ISSN: 1578-5157*

---

Agradecimientos: Este trabajo se realizó en el marco y con el apoyo financiero del CIUNSa (Proyecto 1345 y Programa 1080) y del CONICET (Beca de Postgrado tipo I). Se agradece además a: el Ing. Luis Mármol por sus comentarios y aportes respecto a precipitaciones, a la Prof. Silvia Shüiring por su asesoramiento en la interpretación estadística de los resultados y la sugerencia de bibliografías específica en lo referente a regresiones lineales simples y múltiples y a la CONAE por el aporte de las imágenes satelitales (Proyecto AO 45).