

GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGis®.

GeoQ: Geospatial tool for runoff zoning in QGis®.

Fabio Alejandro Montealegre Medina¹, Fernanda Julia Gaspari².

¹Becario doctoral en Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAyF-UNLP. CICPBA, Ingeniero catastral, Mg. Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.

²Subdirectora CEIDE. Profesora de Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAyF-UNLP. Ingeniera Forestal, Mg. Conservación y Gestión del Medio Natural y Dra. en Ingeniería.

Cátedra de Manejo de Cuencas, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.

Universidad Nacional de La Plata

Diagonal 113 N°469, CP 1900, La Plata. Argentina

Tel:(0054 221)423 6616 Fax:(0054 221)425-2346

E mail:¹fabio.montealegre@agro.unlp.edu.ar²fgapari@agro.unlp.edu.ar

Montealegre Medina, F.A.; Gaspari, F.J. (2021). GeoQ: Herramienta geoespacial para la zonificación de la escorrentía en QGis®. *Revista Estudios Ambientales*, 9(2), 170-192.

Recibido: 28 de julio de 2021

Aceptado: 5 de diciembre de 2021

Publicado: 30 de diciembre de 2021

RESUMEN

La modelización de fenómenos hidrológicos por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfica y geoprocesos, permite calcular o cuantificar, para una determinada zona de estudio, la cantidad de precipitación de una tormenta que se infiltra o escurre superficialmente, teniendo en cuenta sus características de uso y cobertura del suelo y textura edáficas. Utilizando el software geográfico libre QGis, se logró desarrollar una herramienta denominada GeoQ, que por medio de modelización de cálculos y procesos espaciales representa este fenómeno, aplicando la metodología del Número de Curva (NC). En el presente trabajo se implementó esa herramienta en 4 cuencas hidrográficas testigo al interior de la provincia de Buenos Aires - Argentina, las cuales poseen diferentes características topográficas, edáficas, usos y cobertura del suelo, con el objetivo de determinar la escorrentía superficial originada por una tormenta modal de 80,1 mm. Se calcularon coeficientes de escorrentía, infiltración y abstracciones iniciales, con el fin de observar el comportamiento de estas variables hidrológicas al interior de cada cuenca testigo y analizar la efectividad del modelo. Se utilizaron como insumo de capas vectoriales con datos edáficos y cobertura del suelo, estructurándolos con base al NC, sobre 3 condiciones de humedad antecedente. La implementación del modelo arrojó información acertada del fenómeno precipitación-escorrentía en las zonas de estudio, permitiendo cartografiar las variables hidrológicas e interpretar los resultados de forma clara, tanto en cuencas de zonas de llanura como serranas, contribuyendo a un mejor entendimiento del fenómeno y aportando información relevante para la planificación del territorio.

Palabras clave: Modelación Hidrológica, Sistemas de Información Geográfica, Número de Curva, GeoQ.

ABSTRACT

The modeling of hydrological phenomena, by means of Geographic Information Systems tools and geoprocesses, allows calculating or quantifying, for a given study area, the amount of precipitation from a storm that infiltrates or runs off superficially, taking into account the characteristics of land use, land cover and soil texture. Using the free geographic software QGis, it was possible to develop a tool called GeoQ, which by means of modeling calculations and spatial processes represents this phenomenon, applying the Curve Number (CN) methodology. In the present work, this tool was implemented in 4 control watersheds

within the province of Buenos Aires, Argentina, which have different topographic, edaphic, land use and land cover characteristics, with the objective of determining the surface runoff originated by a modal storm of 80.1 mm. Runoff coefficients, infiltration and initial abstractions were calculated in order to observe the behavior of these hydrological variables within each control basin and to analyze the effectiveness of the model. Vector layers with soil cover and edaphic data were used as input, structuring them based on the NC, over 3 antecedent moisture conditions. The implementation of the model yielded accurate information on the rainfall-runoff phenomenon in the study areas, allowing the hydrological variables to be mapped and the results to be interpreted clearly, both in basins in plains and mountainous areas, contributing to a better understanding of the phenomenon and providing relevant information for land-use planning.

Keywords: Hydrologic Modeling, Geographic Information Systems, Curve Number, GeoQ.

INTRODUCCIÓN

La modelización hidrológica es una herramienta clave para comparar los escenarios de gestión y el cambio de uso del suelo en cuencas hidrográficas (de Antueno et al., 2020). La interacción entre modelos hidrológicos y de proyección cartográfica del uso del suelo es relativamente fiable, dada por la eficacia y exactitud espacial que le otorga el manejo de bases de datos geográficos, integrados a un Sistema de Información Geográfico (SIG) (Sandoval y Oyarzun, 2004; Rodríguez Vagaría et al., 2014; Gaspari et al., 2019, 2021). Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada a explorar los cambios de uso del suelo y sus variables sociales, económicas y espaciales; proyectar potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo; y evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo et al., 2007).

El cambio de uso del suelo genera una transformación importante en la dinámica del agua superficial y subterránea, debido al aumento del cubrimiento del suelo, eliminación de una cobertura vegetal absorbente, aumento de la extracción de agua de los acuíferos para riego, entre otros (Rodríguez Vagaría et al., 2014). La cuantificación del excedente superficial de una lluvia constituye la base en la planificación del recurso agua, sea para aumentar el proceso de infiltración en el suelo con el fin de mantenerla disponible para los cultivos, como

para disminuir los caudales pico generadores de inundaciones por desborde de los cauces (Rodríguez Vagaría y Gaspari, 2010).

Históricamente, la región pampeana argentina maneja los excesos hídricos a través de la implementación de obras de saneamiento y/o canalización, que comprenden el dragado y/o construcción de canales que desvían los cursos de agua o drenan el agua de áreas anegables, y hay la implementación de prácticas culturales de manejo y uso del suelo. En relación con este tipo de prácticas, las actuaciones en las cuencas hidrográficas pueden sintetizarse en dos líneas, totalmente compatibles y, en cierta medida, complementarias. Estas son, la utilización racional de las áreas de cultivo (que cubren las zonas de menores pendientes y suelos más fértiles) y el establecimiento de una cubierta vegetal protectora en el resto del territorio que puede adquirir distintas formas tales como praderas, landas, áreas de matorral o monte bajo y finalmente zonas de bosque, bien sean de repoblación o naturales (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990). La restauración agro-hidrológica trata de englobar, en un plan unificado de acción, la problemática común a suelos, agua y vegetación de las cuencas conduciendo a un auténtico proceso de ordenación (Rodríguez Vagaría y Gaspari, 2010). Para ello se combina al proceso espacial productivo con la modelización hidrológica que le otorga la variable hídrica.

Los métodos hidrológicos tradicionales que simulen el proceso de la precipitación-escorrentía son difíciles de implementar debido a que los datos meteorológicos son generalmente escasos. Actualmente, muchos de estos datos son generados con SIG, como base de entrada a modelos hidrológicos tradicionales, pero presentan incompatibilidades entre la estructura y las características geográficas y digitales (Rango, 1985; Shi et al., 2007). Zhan y Huang, (2004) han desarrollado una herramienta informática denominada ArcCN-Runoff, una extensión del programa ESRI ArcGIS® que determina que calcula la relación escorrentía-infiltración para una precipitación a nivel de cuenca hidrográfica. Otro ejemplo, es la herramienta GeoQ para Idrisi Andes®, generada por Rodríguez Vagaría y Gaspari (2010), que permite estimar descargas y predecir la respuesta hidrológica de una cuenca hidrográfica según se asocie a posibles cambios de uso del suelo, por ejemplo, implementación de medidas de conservación de suelo (que inducen a modificaciones sobre la topografía, cubierta vegetal, grado de ocupación del terreno), el desarrollo de una urbanización, entre otros. Como menciona (Eastman, 2006) estas herramientas constituyen modelos geoespaciales automatizados y utilizados para la obtención de nueva información útil para el análisis de la hidrología de superficie

En la actualidad, el software libre QGIS® es una aplicación profesional de SIG de Código Abierto (FOSS) licenciado bajo GNU - General Public License, que proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos, para visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas. Los complementos permiten extender la funcionalidad de QGIS utilizando Python, comprendiendo un entorno gráfico para la construcción y ejecución de modelos de pasos múltiples, para procesar mapas temáticos a través de modelos matemáticos. Estas capas temáticas pueden ser expresadas como una base de datos tabular, vectorial y/o en grilla.

El objetivo del trabajo fue generar la herramienta de procesamiento automático geoespacial GeoQ para el cálculo del escurrimiento superficial, bajo entorno QGIS®.

MATERIALES Y MÉTODOS

La precipitación constituye la principal fuente de agua para el desarrollo de las actividades productivas de una cuenca hidrográfica. El exceso de precipitación, también denominado precipitación efectiva-escorrentía superficial, es la lluvia que no se retiene ni se infiltra en el suelo. La abstracción inicial consiste, principalmente, en la interceptación, la infiltración durante los primeros momentos de la tormenta, y el almacenaje superficial de pequeñas depresiones del terreno (Mockus, 1972; Kent, 1973; Chow et al., 1994; Mishra y Singh, 2013).

El Número de curva (NC) mencionado por el Soil Conservation Service (SCS) (Mockus, 1972), es un método empírico para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo y para distintas condiciones de humedad antecedente (Chow et al., 1994). Este permite calcular la abstracción inicial en una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento superficial. El NC determina un complejo suelo-vegetación que define sus condiciones hidrológicas, y las pérdidas por infiltración – escorrentía (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Marek, 2011). El NC presenta valores entre 0-100, donde a mayor valor, la escorrentía es predominante, y disminuye infiltración (López Cadena de Llano, 1994; Gaspari et al., 2009).

El método de NC permite estimar la precipitación efectiva definiendo la escorrentía superficial (Q), que se expresa en la Ecuación 1. El procedimiento se inicia con la cuantificación de las abstracciones iniciales (I_0) según la Ecuación 2, a partir de la retención potencial máxima (S). Para la obtención del valor de S se utiliza el NC y la expresión de la Ecuación 3 (Gaspari et al., 2013). Siendo el NC, la combinación del grupo hidrológico de

suelo según clase textural (GH), las clases de coberturas y usos del suelo, según la condición de humedad antecedente del suelo (CHA). La infiltración (F) es la proporción de P que se infiltra al interior del suelo, considerándose como una abstracción continuada, representada por la Ecuación 4 (Mockus, 1972; Kent, 1973; Gaspari et al., 2013, 2015).

$$Q = \frac{(P - I_0)^2}{P + 4 * I_0}$$

Ecuación 1.

$$S = 254 * \left(\frac{100}{NC} - 1 \right)$$

Ecuación 2.

$$I_0 = 0,2 * S$$

Ecuación 3.

$$F = \frac{S * (P - I_0)}{P - I_0 + S}$$

Ecuación 4.

Donde P es la precipitación efectiva; I_0 Abstracciones iniciales; S Retención potencial máxima; F Infiltración.

Integrando los conceptos anteriores se puede establecer una ecuación básica, la cual la suma de sus componentes es el total del valor de lluvia precipitada, siendo esta $P = Q + I_0 + F$. Del total de agua de lluvia que cae sobre la superficie de un terreno, una parte se evapora, otra discurre por la superficie (escurrimiento) y otra penetra en el terreno (infiltración), con base en esto también es útil conocer sus respectivos coeficientes, los cuales son sus respectivos valores respecto al total precipitado P, como se muestra en la Ecuación 5 (Mockus, 1972; Kent, 1973; Gaspari et al., 2009, 2013).

$$CE = \frac{Q}{P} \quad Cl_0 = \frac{I_0}{P} \quad CF = \frac{F}{P} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Siendo CE el coeficiente de escurrimiento; Cl_0 el coeficiente de abstracciones iniciales y CF el coeficiente de infiltración.

Por ende el porcentaje total de precipitación está dado por P (%) siendo la sumatoria de CE, Cl_0 y CF (Gaspari et al., 2013).

El NC se presenta en tablas que integra complejos GH-vegetación de características semejantes, que responden de manera análoga bajo el efecto de una tormenta de intensidad variable aplicado para diferentes condiciones de humedad antecedente (CHA) al momento de producirse una precipitación. Si la lluvia total antecedente a 5 días es menor a 12,7 mm y el suelo se presenta seco, CHA se denomina I. Si la lluvia es entre 12,7 y 38,1 mm, es decir en condiciones normales, se denomina CHA II. Por último, si el suelo se encuentra húmedo, por una lluvia antecedente mayor a 38,1 mm, CHA es III (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Chow et al., 1994; López Cadena de Llano, 1994; Gaspari et al., 2009, 2013).

La cuantificación de la escorrentía se determinó a través del método de NC y la generación de un modelo cartográfico para su representación geográfica automática, se utilizó el diseñador de modelos del QGIS 3.18.Zurich®, desarrollando el modelo denominado GeoQ como un nuevo complemento para la construcción y procesamiento analíticos, basados en archivos vectoriales, estableciendo un potente sistema de modelización hidrológica, generando como resultado final un mapa de distribución espacial de la lámina de escorrentía, en milímetros.

La zonificación y modelización de la escorrentía bajo entorno SIG con GeoQ, se estableció por medio de la creación del modelo matemático que responde a las tres CHA (I, II, III).

Como ejemplo de aplicabilidad del procesamiento automático de GeoQ, se procedió al estudio de caso de cuatro áreas testigo en la provincia de Buenos Aires, Argentina, siendo: una al noroeste con la subcuenca A1 del Río Salado y las cuencas altas del Río Sauce Grande y del A°. Pillahuinco Grande en el Sistema de Ventania y la del A°. Napaleofú en el Sistema de Tandilia (Figura 1). Para ejemplificar el cálculo de la escorrentía con GeoQ se aplicó una lluvia modal regional de 80,1 mm para las tres CHA, a partir de datos del Servicio Meteorológico Nacional, en el período 1990 – 2020.

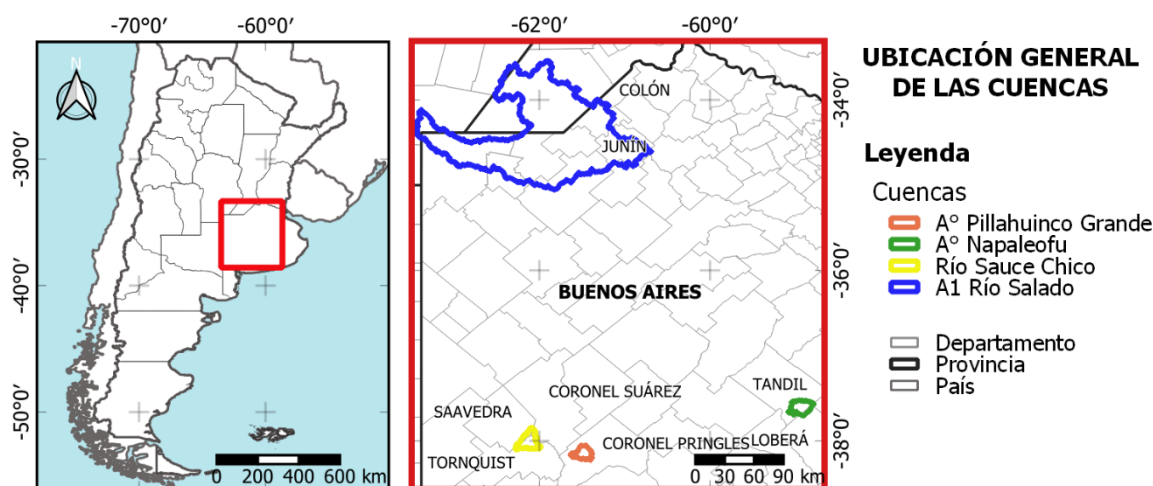


Figura 1. Distribución geográfica de las cuencas hidrográficas testigo para la aplicación de GeoQ.

Construcción y procesamiento de GeoQ

El GeoQ genera mapas intermedios que conforman los archivos de entrada durante las múltiples secuencias para la obtención de la zonificación de la escorrentía superficial en la cuenca(Q). La Figura 2 expresa el flujo de la secuencia del procesamiento bajo el entorno gráfico de pasos múltiples, de archivos vectoriales, asignación automática de valores, operaciones matemáticas entre mapas y reclasificación de categorías para el procedimiento interconectado dinámico. Este flujo está basado en geoprocesos, inicialmente con la intersección de las capas vectoriales, para establecer zonas del complejo suelo vegetación, cuyo resultado es una base cartográfica, a la cual se le define el valor de precipitación a modelar, por medio de generación de nuevos campos y cálculos matemáticos. Posteriormente, se realiza una unión de tablas a dicha base para incorporar los valores de NC de las tablas de consulta, estructuradas previamente. Por último, se generan nuevos campos con consultas por la aplicación de las ecuaciones 1,2,3 y 4, para dar como resultado el mapa de abstracciones, escorrentía e infiltración en archivos vectoriales. Como producto final de la herramienta GeoQ se generan los mapas de coeficiente de abstracciones, escorrentía e infiltración, al aplicar la ecuación 5.

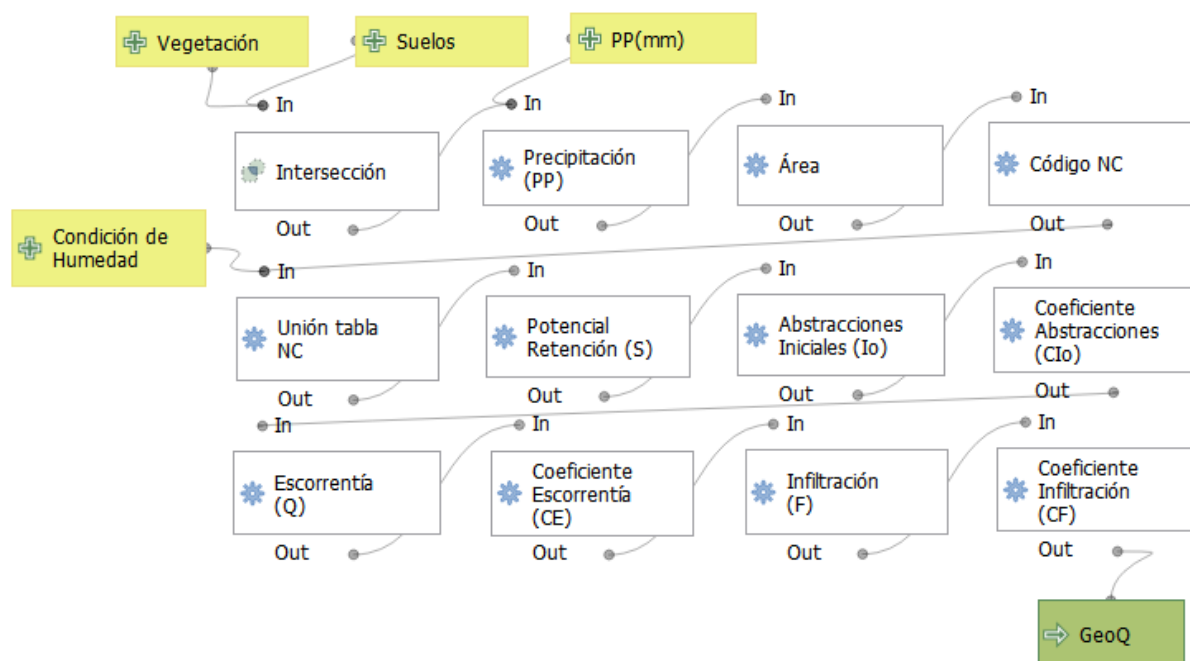


Figura 2. Entorno gráfico de la modelación espacial de GeoQ.

El GeoQ requiere de tres grupos de datos de inicio (Figura 3), según:

1. El valor de la cantidad de precipitación (en milímetros) de la tormenta a modelar (**PP (mm)**).
2. Dos archivos vectoriales de tipo polígono: la zonificación del grupo hidrológico (GH) y la distribución de la vegetación y/o uso del suelo (VU) en la cuenca modelada (**Suelos, Vegetación**, respectivamente).
3. Un archivo tabular (archivo delimitado por comas (csv)) que expresa la condición de Humedad antecedente (**Condición de Humedad**), aportado por el GeoQ.

Para finalizar se pedirá el nombre y ruta del archivo resultante, en la casilla denominada **GeoQ**. Si el usuario no escoge un nombre y ubicación específica, el complemento genera una capa temporal denominada GeoQ con los resultados del modelo, la cual puede ser visualizada para guardar posteriormente, antes de cerrar el programa QGis.

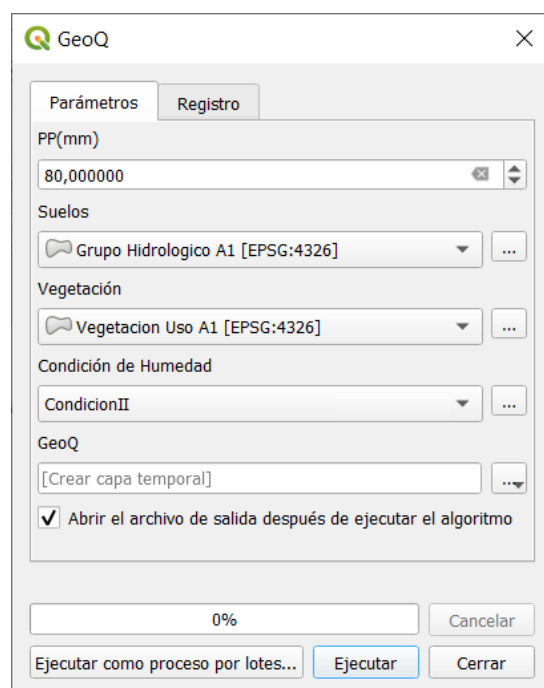


Figura 3. Interfaz gráfica del modelo cartográfico de GeoQ.

Estudios de caso para aplicación de GeoQ

La caracterización particular de la vegetación y/o uso del suelo (VU) se basó en clases según cartografía antecedente de Cobertura del Suelo de la República Argentina (Volante, 2006), Proyecto PNECO 1643 (INTA, 2009) y cartografía de clases definidas según Vegetación y/o uso del suelo de la clasificación Mintegui Aguirre y López Unzú (1990). Ésta fue aplicada en el estudio de caso de las cuatro áreas testigo, siendo las clases expresadas con los códigos de la Tabla 1 y se representan en la Figura 4.

Los datos de inicio para cada caso de estudio se identificaron y zonificaron según:

1. El dato de atributos de la lluvia aplicada (Figura 4c) se coloca en forma manual al ejecutar el modelo GeoQ.
2. La distribución del grupo hidrológico de suelo (GH) se adaptó según denominación del SCS, a los que asignó una capacidad de infiltración según la textura, y se aplicó el código requerido por GeoQ: A=1, B=2, C=3 y D=4, (Figura 4b) (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Chow et al., 1994; López Cadena de Llano, 1994; Neilsen y Hjelmfelt, 1998; Gaspari et al., 2009, 2019; Mishra y Singh, 2013).

3. El mapa de caracterización y zonificación de la cobertura vegetal y uso del suelo (VU) (Figura 4a). El archivo de VU debe ser expresado según los códigos de las Tablas 1.
4. Además, en el modelo se debe incorporar el CHA según necesidad del usuario.

Tabla 1. Códigos de vegetación y/o uso del suelo asignados al mapa vegetación y su correspondiente NC según GH en CHA II.

Código	Cobertura del Suelo de la República Argentina. Proyecto PNECO 1643. Año 2006-2007 (2009)	Vegetación y/o uso del suelo según clasificación Mintegui Aguirre y López Unzu (1990)	NC II GH A	NC II GH B	NC II GH C	NC II GH D
20	Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Cultivos alineados R P	72	81	88	91
30	Cultivos de herbáceas graminoideas	Cultivos alineados R B	67	78	85	89
50		Cultivos alineados C B	65	75	82	86
110		Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
150	Cultivos de herbáceas no graminoideas	Cultivo denso leguminosa R B	58	72	81	85
170		Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
220		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73
250	Arbustal cerrado	Montes con pastos B	25	55	70	77
280	Bosques abiertos, con arbustos	Bosques R	36	60	70	76
300	Bosques cerrados	Bosques MB	15	44	54	61
310	Áreas terrestres cultivadas y/o manejadas	Prados permanentes	30	58	71	78
320	Pastizal abierto (herbáceas graminoideas)	Pastizal P	68	79	86	89
330	Pastizal disperso	Pastizal R	49	69	79	84
390	Áreas urbanas densamente pobladas	Residencial alta densidad	77	85	90	92
410	Cuerpos de agua en movimiento - cañadas	Espejos de agua - humedales	100	100	100	100
450	Áreas urbanas dispersas - semiurbanas		57	72	81	86
490	Cultivos de especies arbóreas (no determinado)		49	65	75	79
550	Suelos pedregosos		91	91	91	91
580	Vegas de ríos en condiciones óptimas		30	58	71	78

Referencias: **R** Laboreo sin prácticas de conservación; **C** Curvas denivel; **C-T** Curvas de nivel y Terrazas abiertas; **MP** Condición de infiltración muy pobre; **P** Condición de infiltración pobre; **M** Condición de infiltración mala; **B** Condición de infiltración buena; **MB** Condición de infiltración muy buena.

Conociendo el GH al que corresponden los diferentes suelos y la distribución de VU, el complemento GeoQ establece automáticamente el valor del NC en las diferentes zonas de intercepción de la cuenca, por un procesamiento de tabulación cruzada.

El NC se define según la Tabla 1, que corresponde a la situación de humedad antecedente del suelo media (condición II) establecido de documentación de referencia (Kent, 1968; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1994; Gaspari, 2002; Gaspari y Senisterra, 2006).

Los valores del NC generados por el modelo GeoQ para los cuatro casos de estudio variaron entre 15, representando Bosques cerrados, hasta alcanzar máximos de 100, indicando Cuerpos de agua en movimiento - cañadas, como se muestra en la Figura 4. La modelización con GeoQ se realizó para las tres CHA.

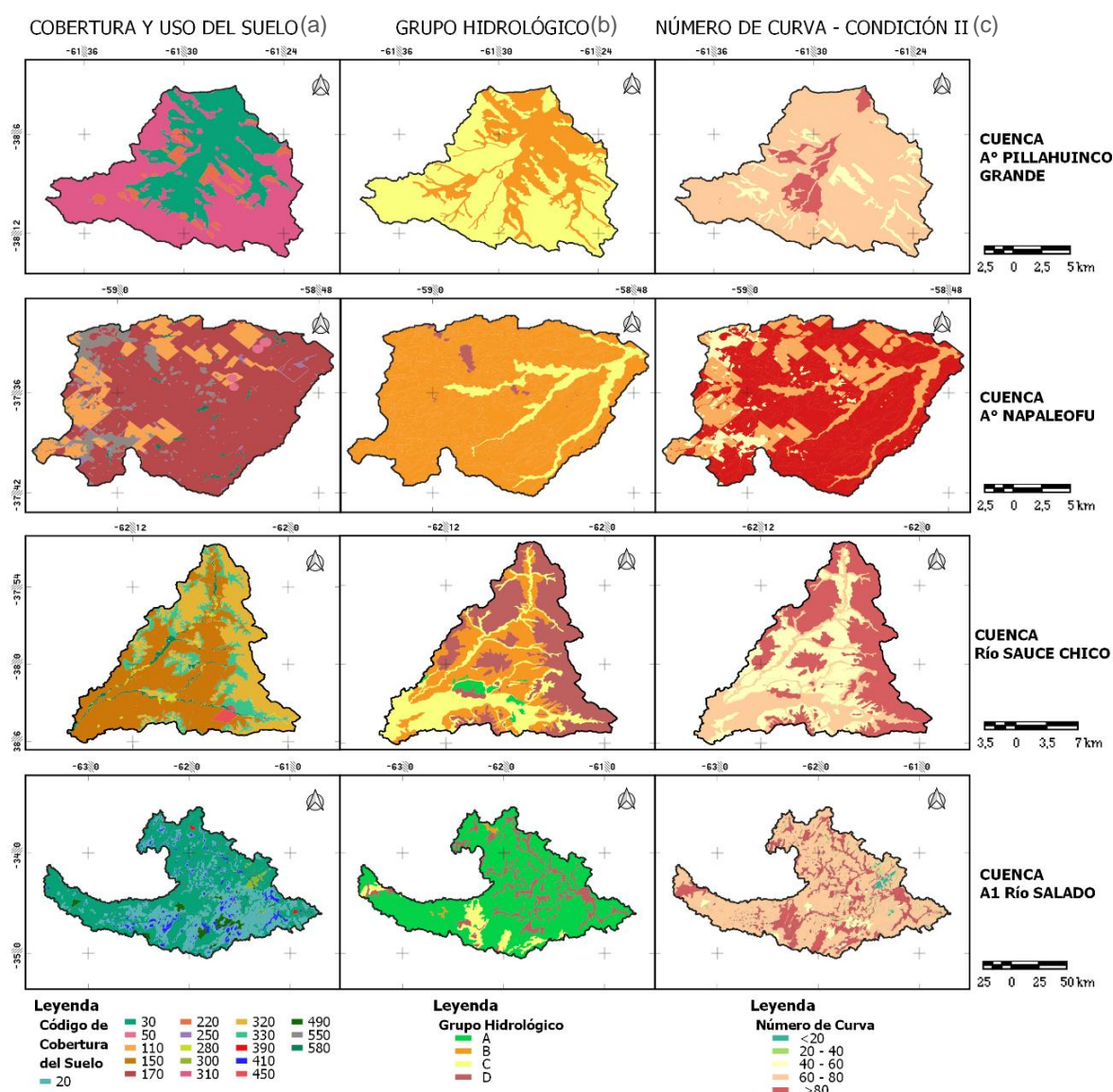


Figura 4. Base de datos cartográfica de las cuencas en estudio.

RESULTADOS

Los resultados alcanzados de la modelación con GeoQ, sobre los ejemplos de aplicación en cuencas testigo, arrojan un único archivo, donde se encuentran los valores de Q , I_0 y F , con sus correspondientes coeficientes CE , CF y CI_0 .

Los resultados de la modelación con GeoQ en las cuencas en estudio para las tres CHA, de los diferentes coeficientes hidrológicos, permite la comparación de cada uno, y su representación cartográfica se expone en: la CI_0 en la Figura 5, CE en la Figura 6, CF en la Figura 7.

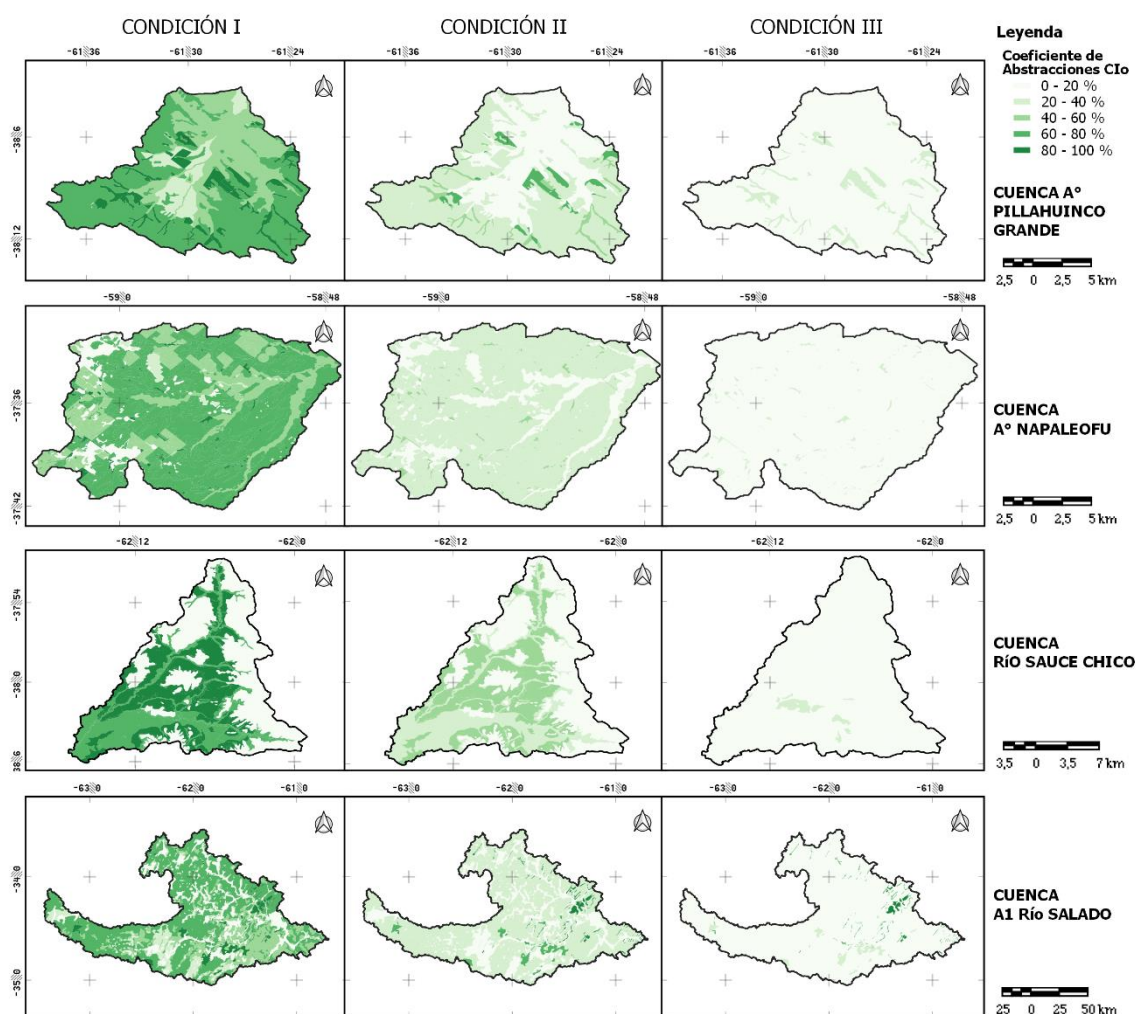


Figura 5. CI_0 de GeoQ según la condición de humedad antecedente.

Las abstracciones iniciales (I_0) (Figura 5) están ligadas fuertemente a las características de la cobertura vegetal y la tipo del suelo para cada cuenca, las cuales se ven reflejadas en los valores de NC. Se observó que los CI_0 más altos se encuentran en la CHA I, >60 %, donde hay presencia de vegetación densa o agricultura extensiva, con el suelo inicialmente seco. En la CHA II el CI_0 se reduce a valores <40 %, lo cual es considerable respecto a la condición anterior, debido a que la capacidad de las plantas para retención de agua se encuentra en condiciones normales. En la CHA III disminuyen a valores <20%, conforme a que el complejo suelo-vegetación está totalmente saturado, generando así la leve a nulidad de las abstracciones.

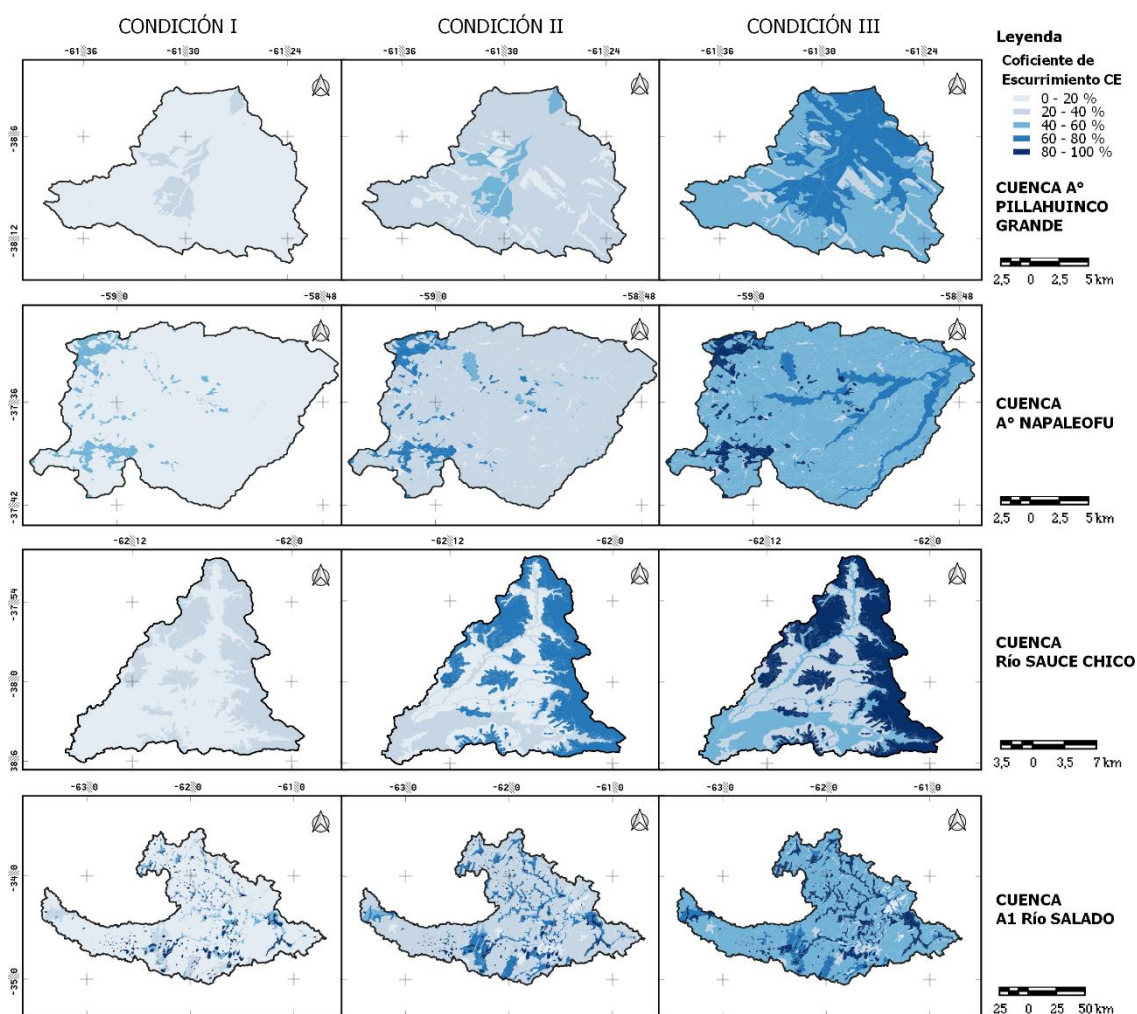


Figura 6. CE de GeoQ según la condición de humedad antecedente.

Respecto al CE (Figura 6), se observa que en la CHAI, se presenta poco escurrimiento, mostrando que en la mayor superficie de las cuencas estudiadas se encuentran valores de $<20\%$, y aumenta en zonas donde hay presencia de agua permanente o vegas de drenaje, siendo representativo de que en la CHA I el suelo se encuentra seco y no se genera una escorrentía considerable.

A medida que incrementa la CHA, mayor es Q, ya que existe una saturación teórica previa que origina que la precipitación colmate el suelo y la cobertura vegetal más fácilmente, y se genere escorrentía superficial. En las CHA II se observa CE entre el 40 y 60 % en la mayor superficie de todas las cuencas y en las CHA III se observa que CE predomina con valores >60 y 80 %.

La infiltración representada por el CF en la Figura 7, presenta un mayor valor en el CHA II, y disminuye considerablemente en la CHA III, debido a que, en esta última condición el mayor porcentaje de la precipitación se refleja en la escorrentía (CE), y la saturación del suelo que es alta.

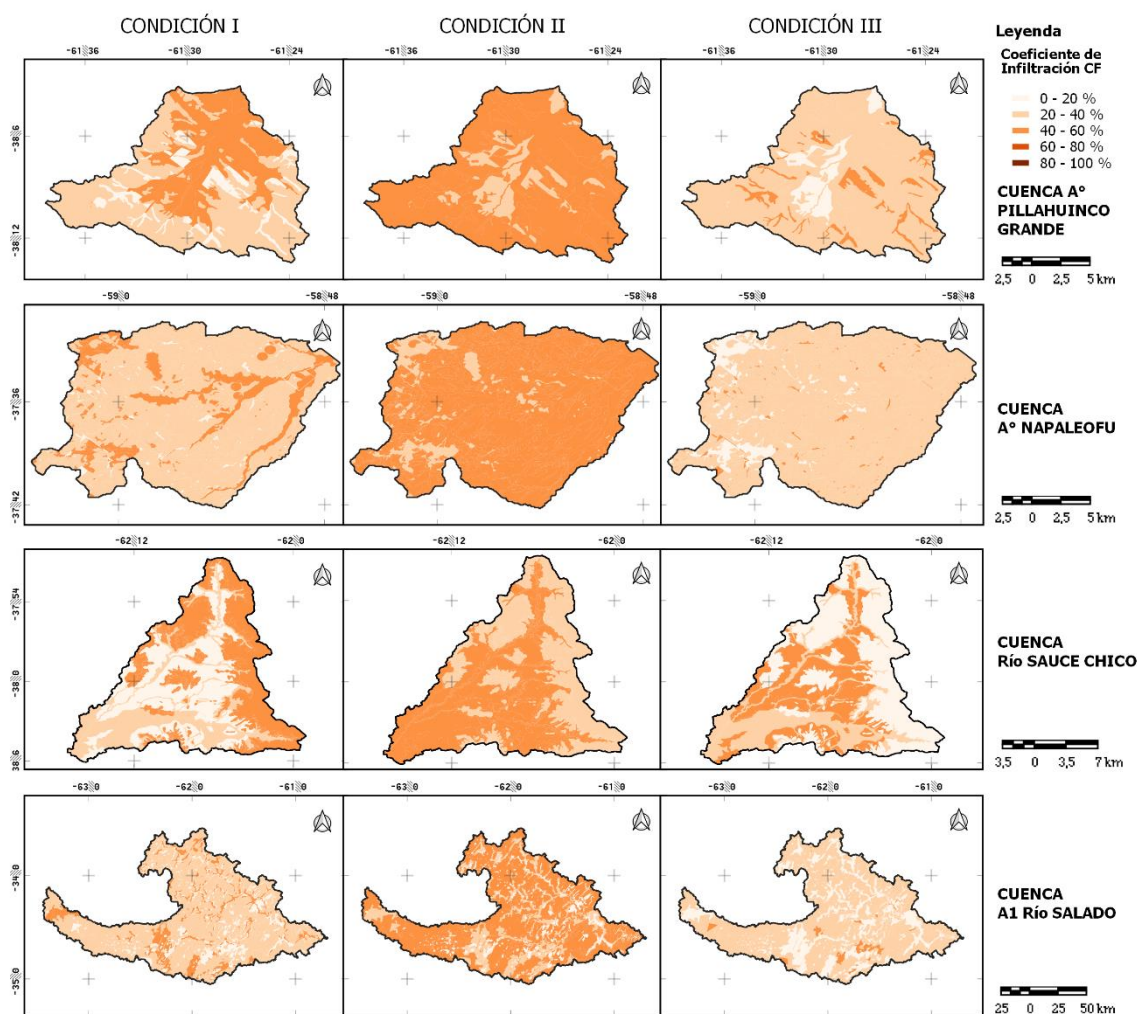


Figura 7. CF de GeoQ según la condición de humedad antecedente.

En el proceso de modelación con GeoQ se identificó que las fórmulas de I_0 originaban como resultado valores superiores al total de P , lo cual no es razonable, debido a que no es posible que se genere mayores abstracciones iniciales respecto a la precipitación. Se observó que estos valores dependen del NC, y el aumento de la cobertura del suelo con texturas edáficas del tipo arenoso-franco lo permiten teóricamente, disminuyendo el NC y generando una mayor abstracción. Esta singularidad, en el caso de $P = 80,1$ mm, se presenta en valores de

NC iguales o inferiores a 40, que muestran anomalías entre el valor de I_0 respecto a P , originando que los parámetros Q y F , que también dependen de I_0 en su cálculo, generen inconsistencias. Por tal razón, el modelo GeoQ, al detectar que $I_0 > P$, para un determinado NC, le asigna un coeficiente del 100% a I_0 y 0 a los otros parámetros (Q y F), significando que para esos complejos suelo-vegetación hay una mayor absorción o abstracción de la precipitación en la superficie y no genera escorrentía.

La interpretación de estos resultados para cada coeficiente, en la aplicación del modelo GeoQ para la P propuesta, se expresa en la Figura 5, donde se visualiza el cambio de respuesta según NC.

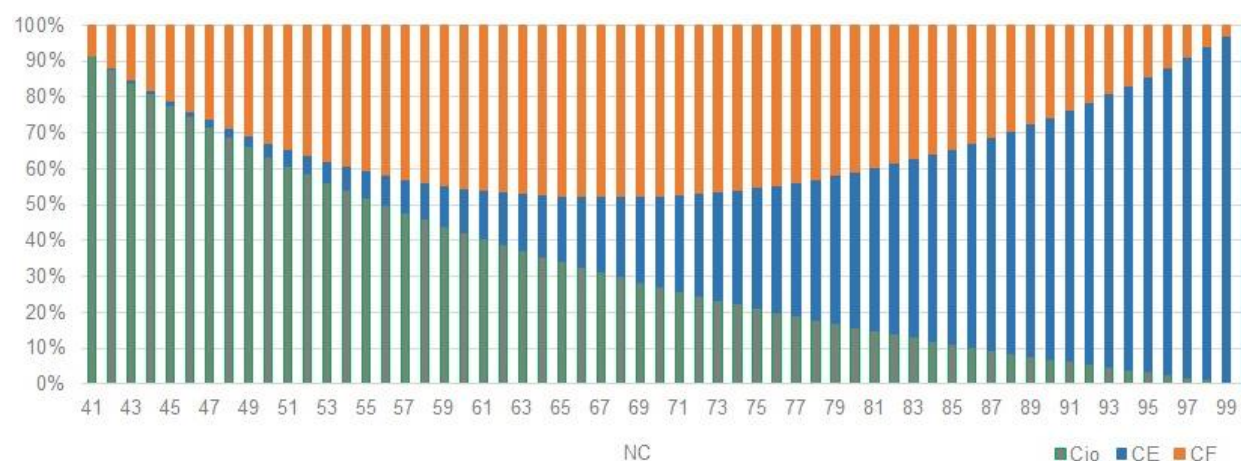


Figura 8. Representación de CE, CF, Cl_0 en los NC de estudio para una tormenta de 80,1mm

DISCUSIÓN

Diferentes autores (Triviño Pérez y Ortiz Rojas, 2004; Henríquez y Azócar, 2006) resaltan que el uso de nuevas herramientas de análisis espacial para la evaluación ambiental de los procesos de desarrollo territorial, a través de la aplicación de modelos de simulación espacial para evaluar y simular el cambio en los valores del coeficiente de escorrentía superficial, es una interesante perspectiva de investigación y una aproximación metodológica útil para el entendimiento del comportamiento de variables hidrológicas, lo que mejora considerablemente la gestión y el análisis de la información espacial.

El modelo GeoQ, con aplicación del método del NC es una herramienta útil para el cálculo de la escorrentía a nivel geoespacial, a partir de datos de suelo y vegetación y/o uso del

suelo que, generalmente, son de fácil disponibilidad. Como mencionó Rodríguez Vagaría et al. (2012) debido a su base, GeoQ en la herramienta Idrisi, se puede utilizar para gestionar y manejar cuencas hidrográficas y proyectos ambientales, sociales e hidrológicos; para estimar descargas, y para predecir la respuesta según se asocie a posibles cambios.

El análisis espacial de la cobertura y uso del suelo permiten evaluar las variaciones de la escorrentía al interior de una cuenca hidrográfica. Resultados encontrados por Antueno et al. (2020) exponen que esta interacción permite proyectar y pronosticar la influencia sobre la escorrentía superficial según el uso del suelo a nivel geoespacial. Encontrando también que, dependiendo de la topografía de la zona de estudio, es posible determinar un volumen mayor de escorrentía en áreas serranas con presencia de tormentas extremas, mientras que en eventos modales de precipitación se registran mayores cantidades de escorrentía en zonas de lomadas. En el presente trabajo con GeoQ, se encontraron respuestas similares al comparar las 4 cuencas testigo, las cuales poseen características topográficas diferentes, identificando zonas planas y serranas predominantes en ellas, lo cual refleja la variación de precipitación escurrida en estas características topográficas.

La modelización de las variables hidrológicas tratadas en este estudio permitió aproximar una cuantificación de las mismas en una cuenca hidrográfica, según una precipitación establecida. Estos datos pueden ser utilizados para la planificación territorial como indicadores del recurso hídrico. Coincidiendo con Laterra et al. (2011), se propone como indicador de regulación hídrica, la proporción de agua de lluvia infiltrada frente a tormentas modales o con una recurrencia dada, a través del método de la curva-número del SCS. De igual forma Montico et al. (2019) enfatiza que los espacios verdes y su influencia no sólo en la infiltración y almacenamiento, sino también en la ralentización del escurrimiento, mitiga los efectos de las precipitaciones intensas, aspecto que puede relacionarse con la gestión del riesgo hídrico. Las variables analizadas son de interés para realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos, ya que debería tener en cuenta el aprovechamiento conjunto o coordinado de las aguas superficiales y subterráneas (Montico et al., 2019).

CONCLUSIONES

La utilización de GeoQ permitió determinar, cuantificar y zonificar la escorrentía para una tormenta modal, según las CHA I, II y III sobre las cuencas testigo.

Es necesario estandarizar previamente la información de cobertura y tipo de suelos a la metodología del NC, por ello, se propone en este trabajo, una clasificación acorde a las características de las cuencas de estudio con base en tipologías existentes y en fuentes de datos oficiales para República Argentina.

Se utiliza una lluvia modal para toda la superficie de las cuencas de estudio, basadas en datos oficiales del SMN, en estaciones cercanas a las mismas. Sin embargo, las características orográficas y zonales pueden hacer variar la cantidad de precipitación en cada una. No obstante, el análisis de la lluvia modal establecida genera un escenario adecuado para el análisis de la escorrentía superficial y el comportamiento variable hidrológicas.

La herramienta GeoQ permite una zonificación adecuada de los parámetros estudiados en el presente trabajo, estructurando y codificando los datos de entrada según la tipología del método de NC.

La sistematización de procesos geoespaciales del GeoQ, por medio de herramientas SIG, permitió agilizar y estandarizar procesos, al igual que manipular y analizar con información vectorial, generando una base de datos geoespacial que contienen información sobre la zonificación de los componentes hidrológicos, como I_0 , Q y F , contribuyendo a generar cartografía que describa este fenómeno. Además, conformaría material actualizado para apoyar proyectos de planificación territorial.

Además, esta herramienta se pretende divulgar para su uso a nivel de cuencas hidrográficas bajo el software libre QGis, con el fin de que sea utilizada por la comunidad académica y de gestión de los recursos suelo-agua-vegetación, y la protección y conservación de recursos, su disponibilidad y gestión ambiental.

Actualmente, GeoQ está diseñada para evaluar la escorrentía con un único valor de precipitación para toda el área de una cuenca. Sin embargo, el grupo de investigación está trabajando en actualizaciones, para capturar datos de precipitación de forma heterogénea por medio de imágenes satelitales. Por ello, para futuros estudios se generará una nueva versión de GeoQ para la modelización hidrológica, a partir de productos de sensores remotos satelitales, como los son imágenes de precipitación, que brindará una mayor aproximación y distribución del fenómeno de lluvia-escorrentía en una cuenca hidrográfica, y Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) para establecer la influencia de la pendiente a partir de datos con valores de cota.

La herramienta GeoQ actual se encuentra a disposición del público en general / usuarios SIG, en el repositorio GitHub <https://github.com/fabalmon/GeoQ.git> en donde se almacena el código del complemento, junto con la documentación necesaria para su instalación y funcionamiento, lo cual incluye un manual para este propósito. Este repositorio está abierto para realizar comentarios y sugerencias sobre la construcción del código y a su desarrollo, planteado en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por los Proyectos del Programa de Incentivos a los Docentes e investigadores de la Secretaría de Política Universitaria, del Ministerio de Educación de la Nación, denominados “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, al Proyecto I+D 2016 N° 11/A286. Período 2016-2019, y “Lineamiento sgenerales para la planificación en cuencas hidrográficas preservando los servicios hidrológicos ambientales”. Proyecto I + D 2019 N° 11/A347 Período 2020-2024, ambos dirigidos por la Dra. Fernanda Gaspari.

Apoyo de una Beca doctoral Científico-Tecnológica suministrada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, otorgada para el periodo 2018-2022.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, M. I., Wiegand, T., Azócar, G. D., Wiegand, K., & Vega, C. E. (2007). Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*, 12(1).
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., & Santos G., G. R. (1994). Hidrología Aplicada. In *Bogotá, Colombia*. McGraw-Hill.
- de Antueno, L., Gaspari, F. J., & Guaraca, A. G. (2020). Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista Estudios Ambientales-Environmental Studies Journal*, 8(1), 20–42.
- Eastman, J. R. (2006). IDRISI Andes guide to GIS and image processing. *Clark University*,

Worcester, 328.

Gaspari, F J, & Senisterra, G. E. (2006). Zonificación del número de la curva (CN) en la Cuenca del Arroyo Pillahuincó Grande. *Coronel Pringles. Tercer Congreso de La Ciencia Cartográfica*, 26.

Gaspari, Fernanda Julia. (2002). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (SIG)*. Universidad Internacional de Andalucía.

Gaspari, Fernanda Julia, Díaz, A. R., Delgado, M. I., & Senisterra, G. E. (2015). Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense . Argentina. *Rev. Fac. Agron. La Plata*, 114(1), 214–221.

Gaspari, Fernanda Julia, Díaz Gómez, A. R., & Montealegre Medina, F. A. (2021). Variabilidad espacial del rendimiento hídrico ante el cambio de uso del suelo y escenarios pluviales en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, ISSN-e 2007-2422, Vol. 12, N°. 1, 2021 (Ejemplar Dedicado a: Enero-Febrero), Págs. 74-112, 12(1), 74–112.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7708827&info=resumen&idioma=SPA>

Gaspari, Fernanda Julia, Rodríguez Vagaría, A. M., & Montealegre Medina, F. A. (2019). *Manejo de cuencas hidrográficas: Herramientas de sistemas de información geográfica* (U. N. de La Plata (ed.)). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/87641>

Gaspari, Fernanda Julia, Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (Universidad Nacional de La Plata (ed.)). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).

Gaspari, Fernanda Julia, Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., & Besteiro, S. (2009). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas* (1st ed.).

Henríquez, C., & Azócar, G. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 36, 61–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>

INTA. (2009). *Proyecto PNECO 1643. Monitoreo de la cobertura y el uso del suelo a partir*

de sensores remotos.

Kent, K. M. (1968). *method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds*. SCS- TP-149. 63.

Kent, K. M. (1973). *method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds* (SCS-TP-149 (ed.)). USA Soil Conservation Service.

Lattera, P., Castellarini, F., & Orúe, M. E. (2011). ECOSER: Un protocolo para la evaluación biofísica de servicios ecosistémicos y la integración con su valor social. *Valoración de Servicios Ecosistémicos: Conceptos, Herramientas y Aplicaciones Para El Ordenamiento Territorial*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 359–389.

López Cadena de Llano, F. (1994). *Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión*. TRAGSA, TRAGSATEC, Mundi-Prensa.

Marek, M. A. (2011). Hydraulic Design Manual, Texas Department of Transportation (TxDOT). In *Design Division (DES), Texas, USA*.

Mintegui Aguirre, J. A., & López Unzu, F. (1990). La ordenación agrohidrológica en la planificación. In Departamento de Agricultura y Pesca (Ed.), *Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco*.

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2013). *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology* (Vol. 42). Springer Science & Business Media.

Mockus, V. (1972). Section 4. Hidrology. In Soil Conservation Service SCS (Ed.), *National Engineering Handbook* (p. 127). US Department of Agriculture, Washington.

Montico, A., Zapperi, P. A., Zilio, M. I., & Gil, V. (2019). Identificación de servicios ecosistémicos urbanos en la ciudad de Bahía Blanca y su aplicación al análisis de la seguridad hídrica. *Revista Estudios Ambientales*, 7(1), 56–78.

Neilsen, R. D., & Hjelmfelt, A. T. (1998). Hydrologic soil group assignment. *Proceedings of Water Resources Engineering*, 1297–1302.

QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
<http://www.qgis.org>

Rango, A. (1985). Assessment of Remote Sensing Input to Hydrologic Models 1. *JAWRA*

Journal of the American Water Resources Association, 21(3), 423–432.

Rodríguez Vagaría, A. M., & Gaspari, F. J. (2010). Herramienta para la determinación del número de curva y escorrentía bajo entorno SIG. Idrisi Andes®. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 10, 11–26.

Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F. J., & Kruse, E. E. (2014). Simulación espacio-temporal del escurrimiento por la interacción entre los cambios del uso del suelo y evolución pluvial. *Revista de Tecnología. Journal of Technology*, 13, 38 – 48.
<http://revistas.unbosque.edu.co/RevTec/article/view/1839>

Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2012). Evaluación del efecto de la restauración agro-hidrológica mediante la aplicación del modelo hidrológico GeoQ. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38(2), 171–181.

Sandoval, V., & Oyarzun, V. (2004). Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 11, 9–21.

Shi, P.-J., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J.-A., Ge, Y., & Qiu, G.-Y. (2007). The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 69(1), 31–35.

Triviño Pérez, A., & Ortiz Rojas, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones Geográficas*, 35, 67.
<https://doi.org/10.14198/INGEO2004.35.08>

Volante, J. (2006). *Cobertura del suelo de la República Argentina*. Año.

Zhan, X., & Huang, M.-L. (2004). ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling & Software*, 19(10), 875–879.