



GeoQ: Automatización del procesamiento de cálculo de la escorrentía superficial bajo entorno QGis 3.18®.

Fabio Alejandro Montealegre Medina¹ - Fernanda Julia Gaspari².

Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata

Introducción

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada a explorarlos e identificar sus variables sociales, económicas y espaciales; con la capacidad de proyectar potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados y evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del territorio.

El propósito principal del modelado es identificar los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la presión para el cambio de uso de la tierra en la interfaz urbano-rural. El estudio y la evaluación de los patrones de crecimiento urbano/rural y las fuerzas que impulsan su transformación requieren la gestión y el uso de análisis espacial, estadísticas y técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estas técnicas son necesarias para comprender la compleja dinámica de estos procesos y sus múltiples factores causales (Aguayo et al., 2007).

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 SIG (Sandoval y Oyarzun, 2004; Rodríguez Vagaría et al., 2014; Gaspari et al., 2019, 2021). Según de Antueno et al. (2020), además, la modelización hidrológica es una herramienta clave para comparar los escenarios de gestión y el cambio de uso del suelo en cuencas hidrográficas.

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. Además, los modelos hidrológicos tradicionales que simulan el proceso de la precipitación- escorrentía pueden ser replicados con geoprocesos SIG.

¹ Ingeniero Catastral, Mg. Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Becario doctoral en Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAF-UNLP. CIPBA. - fabio.montealegre@agro.unlp.edu.ar

² Ingeniera Forestal, Mg. Conservación y Gestión del Medio Natural y Dra en Ingeniería. Subdirectora CEIDE. Profesora Titular de Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. FCAF-UNLP. - fgapari@agro.unlp.edu.ar

Dentro de los métodos utilizados para determinar la lámina de escorrentía, la metodología del número de curva (NC), elaborada por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, es la de mayor difusión cuando se desea tener una buena aproximación. Es una metodología empírica para el cálculo de la transformación de lluvia-escorrentía, que surgió de la observación del fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo en varios estados de cobertura vegetal y para distintas condiciones de humedad antecedente. ((Mockus, 1972; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Chow et al, 1994; López Cadenas de Llano, 1994).

El almacenamiento y procesamiento de información georreferenciada a través un SIG representa un gran avance en la planificación del uso y conservación los recursos, conformando una herramienta de geoprocursos 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.

Por ello, se ha generado la presente herramienta de procesamiento automático geoespacial **GeoQ** para el cálculo del escurrimiento superficial, bajo entorno QGIS®, aplicando el NC, que expresa la combinación del grupo hidrológico de suelo según clase textural (GH), los tipos de coberturas o vegetación y/o usos del suelo, según la condición de humedad antecedente del suelo (CHA).

A continuación, se presenta la descripción de la misma.

Método del Número de Curva (NC) para GeoQ.

El NC permite calcular la abstracción inicial en una tormenta (P), que por diferencia, establece el escurrimiento superficial. El NC se determina por medio de la definición de un complejo suelo-vegetación según sus condiciones hidrológicas, con el cual se establecen las pérdidas por infiltración – escorrentía (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; López Cadena de Llano, 1994; 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 estima la precipitación efectiva definiendo la escorrentía superficial (Q), según 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 con la expresión de la Ecuación 3 (Gaspari et al., 2013). La infiltración (F) se cuantifica como la proporción de la precipitación (P) que penetra 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 $P = Q + I_0 + F$, que expresa que del total de agua de lluvia que cae sobre la superficie de un terreno, una parte se evapotranspira, otra discurre por la superficie (escurrimiento) y otra penetra en el terreno (infiltración). Con base a conocer la proporción de cada uno, es útil conocer sus respectivos coeficientes porcentuales, como se muestra en la Ecuación 5, siendo el porcentaje total de precipitación P (%) la sumatoria de CE , CI_0 y CF (Gaspari et al., 2009, 2013).

$$CE = \frac{Q}{P} \quad CI_0 = \frac{I_0}{P} \quad CF = \frac{F}{P} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Siendo CE el coeficiente de escorrentía; CI_0 el coeficiente de abstracciones iniciales y CF el coeficiente de infiltración.

Los factores a tener en cuenta en el método NC están relacionados con el tipo de superficie en donde recae la lluvia para generar las variables hidrológicas, debiendo conocer el tipo de suelo y cobertura vegetal y/o uso del suelo.

La información del suelo a utilizar debe estar estructurada a partir de categorías texturales o de permeabilidad, denominadas Grupos Hidrológicos (GH) (Mintegui Aguirre y López Unzu, 1990; Chow et al., 1994; López Cadena de Llano, 1994; Neilsen y Hjelmfelt, 1998; Gaspari et al., 2009, 2019; Mishra y Singh, 2013). De esta manera se definen cuatro agrupaciones:

- Grupo A: Suelo con el potencial de escurrimiento mínimo. Incluye a las arenas profundas con poco limo y arcilla, así como a los loess muy permeables.
- Grupo B: Suelos en su mayor parte arenosos, menos profundos que los del grupo A, y los menos profundos y compactos que los del grupo anterior.
- Grupo C: Suelos poco profundos con abundante cantidad de arcilla y coloides.
- Grupo D: Potencial de escurrimiento máximo. Suelos con elevado contenido de arcillas, poco profundos, con sub-horizontes casi impermeables cerca de la superficie.

La información vectorial necesaria como entrada al GeoQ, referida a los GH debe estar codificada según sus atributos y la numeración que se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Códigos referidos a la información de suelos según GH

GH	Textura	Código
A	Arenoso	1
	Arenoso franco	
	Franco arenoso	
B	Franco arenoso	2
	Franco	
	Limoso	
C	Franco arcillo arenoso	3
	Franco arcillo limoso	
	Franco arcilloso	
D	Arcillo arenoso	4
	Arcillo limoso	
	Arcilloso	

Fuente: Gaspari et al., 2009.

Conociendo las características del suelo por su GH, también se necesita la información del uso del suelo en el área en estudio, es decir la vegetación que sustentan, incluyendo el tratamiento cultural que reciben (Gaspari y Senisterra, 2006), los cuales son necesarios para establecer el NC para los resultados de la modelación geoespacial. Para ello se debe tener una capa de información vectorial relacionada a la vegetación y/o uso del suelo, la cual debe estar codificada según la Tabla 2. Esta codificación fue adaptada para el GeoQ según cartografía antecedente de Cobertura del Suelo de la República Argentina (Volante, 2006), Proyecto PNECO 1643 (INTA, 2009) y de las clases de uso definidas de Vegetación y/o uso del suelo según clasificación Mintegui Aguirre y López Unzu (1990).

Tabla 2. Códigos de vegetación y/o uso del suelo asignados a la capa de vegetación

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)
10	Áreas naturales desnudas consolidadas	Barbecho
20	Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Cultivos alineados R P
30	Cultivos de herbáceas graminoideas	Cultivos alineados R B
40		Cultivos alineados C P
50		Cultivos alineados C B
60		Cultivos alineados C-T P
70		Cultivos alineados C-T B
80		Cultivos no alineados o surcos pequeños R P
90	Cultivos de herbáceas (no determinado)	Cultivos no alineados o surcos pequeños R B
100		Cultivos no alineados o surcos pequeños C P
110		Cultivos no alineados o surcos pequeños C B
120		Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P
130		Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B
140		Cultivos densos leguminosas R P
150	Cultivos de herbáceas no gramínoideas	Cultivos densos leguminosas R B
160		Cultivos densos leguminosas C P
170		Cultivos densos leguminosas C B
180		Cultivos densos leguminosas C-T P

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)
190		Cultivos densos leguminosas C-T B
200		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%
210		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%
220		Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%
230	Arbustal abierto	Montes con pastos P
240	Arbustal disperso	Montes con pastos R
250	Arbustal cerrado	Montes con pastos B
260	Bosques abiertos en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Bosques MP
270	Bosques abiertos	Bosques P
280	Bosques abiertos, con arbustos	Bosques R
290	Bosques cerrados en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	Bosques B
300	Bosques cerrados	Bosques MB
310	Áreas terrestres cultivadas y/o manejadas	Prados permanentes
320	Pastizal abierto (herbáceas graminoideas)	Pastizal P
330	Pastizal disperso	Pastizal R
340	Pastizal cerrado (herbáceas graminoideas)	Pastizal B
350		Pastizal C P
360		Pastizal C R
370		Pastizal C B
380	Áreas urbanas de baja densidad	Residencial baja densidad
390	Áreas urbanas densamente pobladas	Residencial alta densidad
400	Rocas, fragmentos	Superficies impermeables
410	Cuerpos de agua en movimiento - cañadas	Espejos de agua - humedales
	Cuerpos de agua estacionario - bañado	
	Nieve o hielo	
420	Árboles dispersos en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	
430	Arbustal cerrado a abierto en áreas regularmente inundadas/anegadas o acuáticas	
440	Áreas urbanas de densidad media	
450	Áreas urbanas dispersas - semiurbanas	
460	Áreas urbanas vegetadas	
470	Cultivos de arbustos bajo riego	
480	Cultivos de arbustos en secano	
490	Cultivos de especies arbóreas (no determinado)	
500	Cultivos de especies arbóreas bajo riego	
510	Cultivos de especies arbóreas en secano	
520	Dunas / desiertos naturales	
530	Salares (GH D - áreas/rocas impermeables)	
540	Salinas (GH D - áreas/rocas impermeables)	
550	Suelos pedregosos	
560	Superficies artificiales y áreas asociadas. Superficies construidas (no determinado) - Distritos urbanos comerciales	
570	Superficies no construidas	
580	Vegas de ríos en condiciones óptimas	

Referencias: R Laboreo sin prácticas de conservación; C Curvas de nivel; 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.

Por último, hay que considerar la respuesta hidrológica que depende de la Condición de Humedad Antecedentes (CHA) del suelo del método de NC, al momento de generarse una precipitación determinada, como se expresa en la Tabla 3 (Mintegui Aguirre y López Unzu, 1990; Chow et al., 1994; López Cadena de Llano, 1994; Gaspari et al., 2009, 2013).

Tabla 3. CHA en función de la precipitación.

Condición	Humedad antecedente del suelo	Lluvia antecedente total de 5 días
I	Suelo seco	0 – 12,7
II	Suelo medio	12,7 – 38,1
III	Suelo húmedo (saturado debido a lluvias antecedentes)	> 38,1

Los valores de NC pueden variar según CHA, como se muestra en la Tabla 4 (Gaspari et al., 2013).

Tabla 4. Tabla de conversión de NC según CHA.

Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III		
Número de curva en la condición	Número de curva correspondientes a las condiciones	
II	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

El geoproceto de GeoQ para la modelización, concatena los valores de GH con vegetación y/o uso del suelo, cuyo resultado es un código el cual será asignado a un valor de NC, y donde, el Código NC, se resuelve como la sumatoria del Código GH y el Código de Vegetación y/o Uso del Suelo. Al definir el NC, aplica las ecuaciones 1 a 5 y genera como resultado un shp con una tabla descriptiva y de consulta.

Un ejemplo de la codificación, como respuesta del procesamiento para un uso del suelo en barbecho según GH, para la CHA II, se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Ejemplo de construcción de las tablas de consulta, CHA II.

GH	Código GH	Vegetación y/o Uso del Suelo	Código Vegetación y/o Uso del Suelo	Código NC	NC
A	1	Barbecho	10	11	77
B	2	Barbecho	10	12	86
C	3	Barbecho	10	13	91
D	4	Barbecho	10	14	94

El NC se obtiene en forma automática de la Tabla 6 para las tres CHA, adaptado para el **GeoQ** según el código NC.

Tabla 6. Valores de NC según CHA (Adaptación).

Cod_	I	II	III	Cod_	I	II	III	Cod_	I	II	III	Cod_	I	II	III
11	58	77	89	12	72	86	93	13	81	91	96	14	87	94	97
21	52	72	86	22	64	81	91	23	75	88	94	24	81	91	96
31	46	67	82	32	60	78	89	33	70	85	93	34	77	89	95
41	49	70	84	42	61	79	90	43	69	84	92	44	75	88	94
51	44	65	81	52	56	75	87	53	66	82	91	54	72	86	93
61	45	66	82	62	54	74	87	63	63	80	90	64	66	82	91
71	41	62	79	72	51	71	85	73	60	78	89	74	64	81	91
81	44	65	81	82	57	76	88	83	69	84	92	84	75	88	94
91	42	63	80	92	56	75	87	93	67	83	92	94	74	87	94
101	42	63	80	102	54	74	87	103	66	82	91	104	70	85	93
111	40	61	78	112	53	73	86	113	64	81	91	114	69	84	92
121	40	61	78	122	52	72	86	123	61	79	90	124	66	82	91
131	38	59	77	132	49	70	84	133	60	78	89	134	64	81	91
141	45	66	82	142	58	77	89	143	69	84	92	144	75	88	94
151	37	58	76	152	52	72	86	153	64	81	91	154	70	85	93
161	43	64	80	162	56	75	87	163	67	83	92	164	70	85	93
171	34	55	74	172	48	69	84	173	60	78	89	174	67	83	92
181	42	63	80	182	53	73	86	183	63	80	90	184	67	83	92
191	30	51	71	192	46	67	82	193	57	76	88	194	63	80	90
201	28	48	68	202	46	67	82	203	58	77	89	204	67	83	92
211	18	35	55	212	35	56	75	213	49	70	84	214	58	77	89
221	15	30	50	222	28	48	68	223	44	65	81	224	53	73	86
231	26	45	65	232	45	66	82	233	58	77	89	234	67	83	92
241	19	36	56	242	39	60	78	243	53	73	86	244	61	79	90
251	12	25	43	252	34	55	74	253	49	70	84	254	58	77	89
261	35	56	75	262	56	75	87	263	72	86	93	264	81	91	96
271	26	46	66	272	47	68	83	273	60	78	89	274	69	84	92
281	19	36	56	282	39	60	78	283	49	70	84	284	57	76	88
291	13	26	45	292	31	52	71	293	42	63	80	294	48	69	84
301	7	15	29	302	25	44	64	303	33	54	73	304	40	61	78
311	15	30	50	312	37	58	76	313	51	71	85	314	60	78	89
321	47	68	83	322	61	79	90	323	72	86	93	324	77	89	95
331	29	49	69	332	48	69	84	333	61	79	90	334	69	84	92
341	21	39	60	342	40	61	78	343	54	74	87	344	63	80	90
351	27	47	67	352	46	67	82	353	64	81	91	354	75	88	94
361	12	25	43	362	38	59	77	363	56	75	87	364	67	83	92
371	3	6	13	372	18	35	55	373	49	70	84	374	61	79	90
381	33	54	73	382	49	70	84	383	63	80	90	384	70	85	93
391	58	77	89	392	70	85	93	393	79	90	95	394	83	92	96
401	95	98	99	402	95	98	99	403	95	98	99	404	95	98	99
411	100	100	100	412	100	100	100	413	100	100	100	414	100	100	100
421	27	47	67	422	45	66	82	423	58	77	89	424	67	83	92
431	37	57	73	432	52	72	86	433	66	82	91	434	72	86	93
441	40	61	78	442	56	75	87	443	67	83	91	444	74	77	84
451	37	57	73	452	52	72	86	453	64	81	91	454	72	86	93
461	30	51	71	462	47	68	83	463	63	79	90	464	69	84	92
471	20	37	57	472	39	60	78	473	53	73	86	474	61	79	90
481	22	42	61	482	40	62	78	483	57	75	91	484	64	81	91
491	29	49	69	492	45	65	83	493	56	75	87	494	61	79	90
501	18	35	55	502	38	59	77	503	52	72	86	504	61	79	90
511	29	49	69	512	47	68	83	513	60	78	89	514	69	84	92
521	42	63	80	522	58	77	89	523	70	85	93	524	75	88	94
531	65	83	95	532	84	93	97	533	84	93	97	534	84	93	97
541	65	83	95	542	84	93	97	543	84	93	97	544	84	93	97
551	80	91	96	552	80	91	96	553	81	91	96	554	64	81	91
561	77	89	97	562	82	92	98	563	88	94	98	564	87	95	99
571	29	49	69	572	48	69	84	573	61	79	90	574	69	84	92
581	15	30	50	582	37	58	76	583	51	71	85	584	60	78	89

Descripción general del modelo.

GeoQ procesa los archivos en formato vectorial de suelos/GH y vegetación y uso del suelo, con ayuda de la Tabla 6 de consulta y un valor de precipitación o tormenta predefinido para el área de estudio, dando como resultado una capa en formato vectorial con una tabla con la información de Q, F e I_0 , sus coeficientes porcentuales, y los mapas respectivos.

Procedimiento

La herramienta está pensada para ser ubicada en el repositorio oficial de complementos de QGIS, inicialmente se debe subir manualmente al programa por medio de un archivo Zip.

El complemento se encuentra en el repositorio <https://github.com/fabalmon/GeoQ.git>, en él se encuentra el presente manual con una breve descripción y ayuda, en el Readme.md. en la opción "Code" en la esquina superior derecha, seleccionar "Download ZIP" para así obtener el archivo ZIP del complemento a subir a QGIS.

En el software geográfico QGIS (en versiones 3.18 en adelante) instale el complemento denominado GeoQ, en la barra de herramientas Administrar e instalar complementos



por medio de la opción "Instalar a partir de ZIP", allí se debe seleccionar el archivo ZIP descargado de la página GitHub y oprimir "Instalar complemento". Hecho lo anterior el complemento quedará instalado y podrá ser ubicado en la Caja de herramientas de Proceso con el Nombre de GeoQ, como se ilustra en la Figura 1.

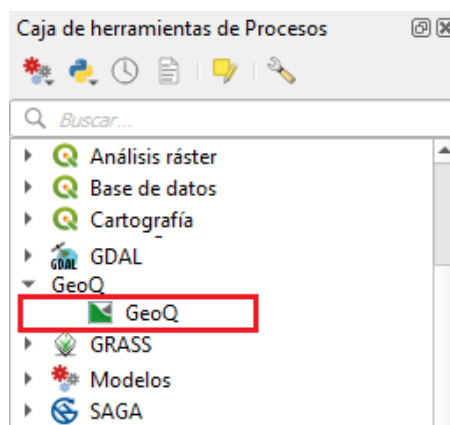


Figura 1. Localización del Complemento GeoQ instalado y cargado correctamente

El modelo requiere de archivos vectoriales e insumos precargados, los cuales deben estar previamente adaptados como se explica a continuación.

Confección de Archivos de entrada

I. Tablas de consulta y simbología

Uno de los archivos de entrada del modelo es la tabla de consulta que contiene los valores de NC dependiendo del tipo de CHA. Para esto se dispone de 3 archivos en formato CSV (valores separados por comas), con el NC para cada CHA. Estos valores están estandarizados para el modelo GeoQ (Tabla 6). Estas tablas son suministradas con el modelo y se denominan CHAI, CHAI, CHAI, seleccionando el usuario, según la condición que se va a procesar.

Los mismos están disponibles en el repositorio del complemento, ubicado en la herramienta *Administrar e instalar complementos*. También contiene archivos de simbología QML, los cuales serán llamados por el modelo para la representación final de mapas de coeficientes de escorrentía (CE), infiltración (CF) y abstracciones iniciales (CI₀). Estos archivos se denominan con las iniciales anteriormente descritas. Si estos archivos no están en la ruta descrita, el modelo arrojará las capas de los coeficientes sin simbología.

Estos insumos deben ser guardados en una carpeta en el equipo de cómputo, denominada C:\GeoQ. Las tablas de consulta deben estar cargadas en este espacio de trabajo, en el proyecto de trabajo en QGIS, antes de su implementación en el modelo. Esto se realiza en el *Administrador de fuente de datos* en la sección de Texto delimitado, como se muestra en la Figura 2.

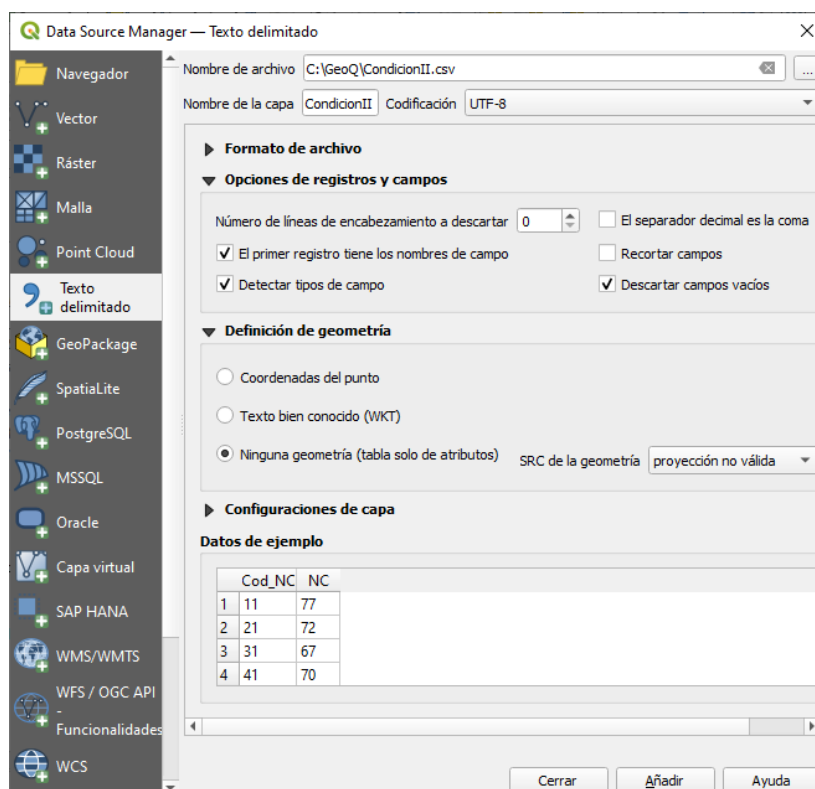


Figura 2. Carga de tablas de consulta al proyecto de QGIS.

Al estar cargada la tabla en el proyecto, será utilizada correctamente al momento de la ejecución del modelo **GeoQ**. Advertencia: Si la tabla es llamada desde otro directorio, las capas resultado arrojarán valores nulos.

II. Archivos vectoriales:

- Suelos

La capa de Suelos esta referida a la información de GH para la zona de estudio. Los códigos asignados a cada grupo hidrológico al interior de la capa, en sus atributos, se debe incorporar una columna nueva del archivo shape, denominada "Cod_Sue" e incluir los códigos de cada GH como se expresan en la Tabla 1. Por ejemplo, se muestra en la Figura 3 el mapa de suelos / GH de la cuenca A1 del Río Salado, provincia de Buenos Aires, Argentina.

Nota: La capa de suelos debe estar recortada previamente con la zona de estudio y debe coincidir con la extensión de la capa de vegetación y/o uso del suelo.

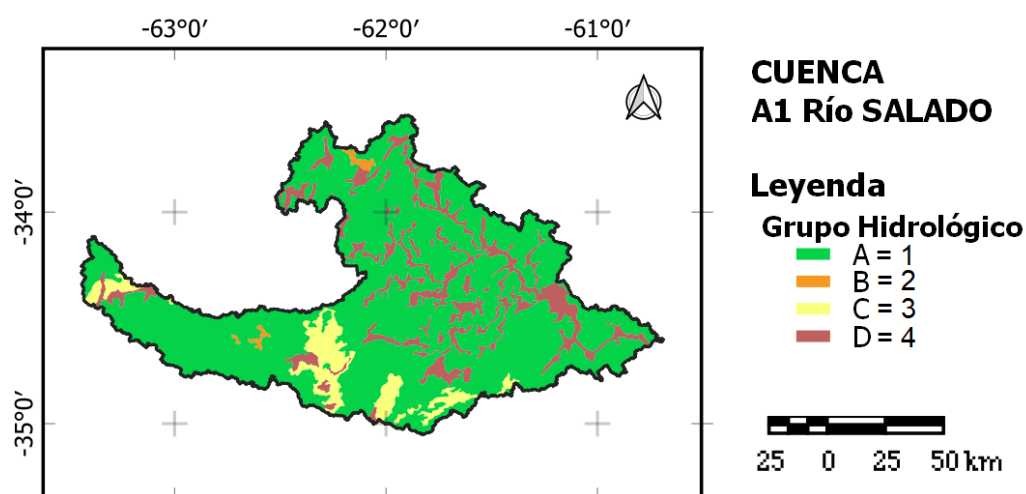


Figura 3. Ejemplo mapa de GH para la cuenca A1.

- Vegetación y/o uso del suelo

Los registros de la capa de vegetación y/o uso del suelo debe estar codificado según las categorías estandarizadas expresadas en la Tabla 2, por medio de una columna en el archivo shape denominada "Cod_Veg" la cual consignara los códigos correspondientes a cada cobertura. Se ejemplifica en la Figura 4 con el código de cobertura del suelo de la cuenca A1 del Río Salado.

Nota: La capa de vegetación y/o uso del suelo debe estar recortada previamente con la zona de estudio y debe coincidir con la extensión de la capa de suelos.

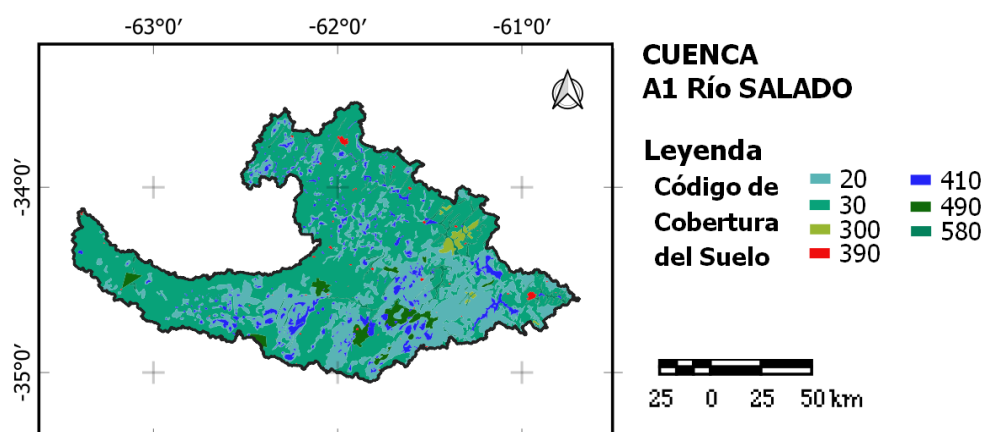


Figura 4. Ejemplo de mapa códigos de cobertura del suelo para la cuenca A1.

Ejecución del Modelo.

En el panel de *Caja de herramientas de Procesos* ejecutar el complemento **GeoQ** (Figura 1). Al desplegarse la herramienta se deben ingresar los insumos estandarizados previamente y seguir los siguientes pasos, como se expresa en la Figura 5.

[1] Ingresar un valor de precipitación (mm), con el cual se calculará las variables hidrológicas.

[2] Seleccionar el archivo vectorial correspondiente a GH codificado. Se puede seleccionar de la lista desplegable, si la capa está cargada previamente en el proyecto de QGis, o se puede buscar la ruta del archivo en el equipo de cómputo.

[3] Seleccionar el archivo correspondiente a vegetación y/o uso del suelo codificada. Se puede seleccionar de la lista desplegable, si la capa está cargada previamente en el proyecto de QGis, o se puede buscar la ruta del archivo en el equipo de cómputo.

[4] Seleccionar la tabla de consulta de CHA, según los requerimientos del usuario. Debe estar previamente cargada en el proyecto y ser buscada por medio de la lista desplegable.

[5] GeoQ, es el nombre del resultado final del modelo. Es posible dejar en blanco esta casilla, y, de ser así, se creará una capa temporal con los resultados del modelo junto con el cruce de los atributos de suelos y vegetación. De lo contrario, se puede guardar el archivo en el equipo de cómputo seleccionando la ruta de destino y asignándole un nombre al archivo.

[6] Corresponde al mapa de CF, el cual se cargará al proyecto con su respectiva simbología (*Solo si el archivo de simbología esta guardado en C:\GeoQ*). Si se deja en blanco esta casilla generará una capa temporal, pero sin nombre, por lo cual se aconseja guardar este resultado como archivo en el equipo de cómputo con el nombre CF.

[7] Corresponde al mapa de CE. Seguir los pasos de [6] y nombrar el archivo CE.

[8] Corresponde al mapa de CI_0 . Seguir los pasos de [6] y nombrar el archivo CI_0 .

[9] Ejecutar el modelo.

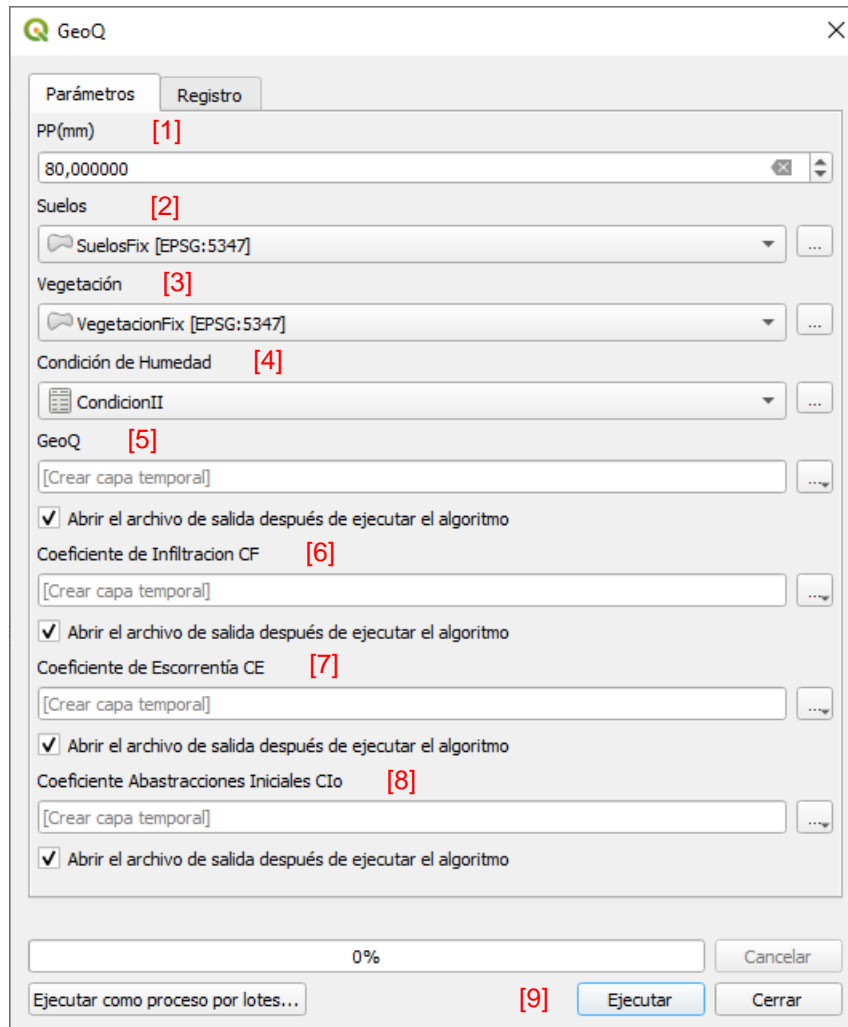


Figura 5. Ejecución del modelo GeoQ.

Una vez se ejecute el modelo siguiendo los pasos anteriores, las capas resultado se cargarán automáticamente en el proyecto de QGIS en el que se está trabajando.

Obtención de resultados.

El modelo arroja un resultado general, en una capa denominada **GeoQ** (Figura 6), donde sus datos y atributos son el producto de los cruces y geoprosesos de los insumos de entrada. Esta capa no posee ninguna simbología. En sus atributos se encuentran los NC y los valores de retención potencial máxima S, Abstracciones iniciales I_0 , escorrentía Q, infiltración F, en milímetros, y los coeficientes porcentuales de CI_0 , CE, CF. Todos ellos pueden ser representados cartográficamente si así se requiere.

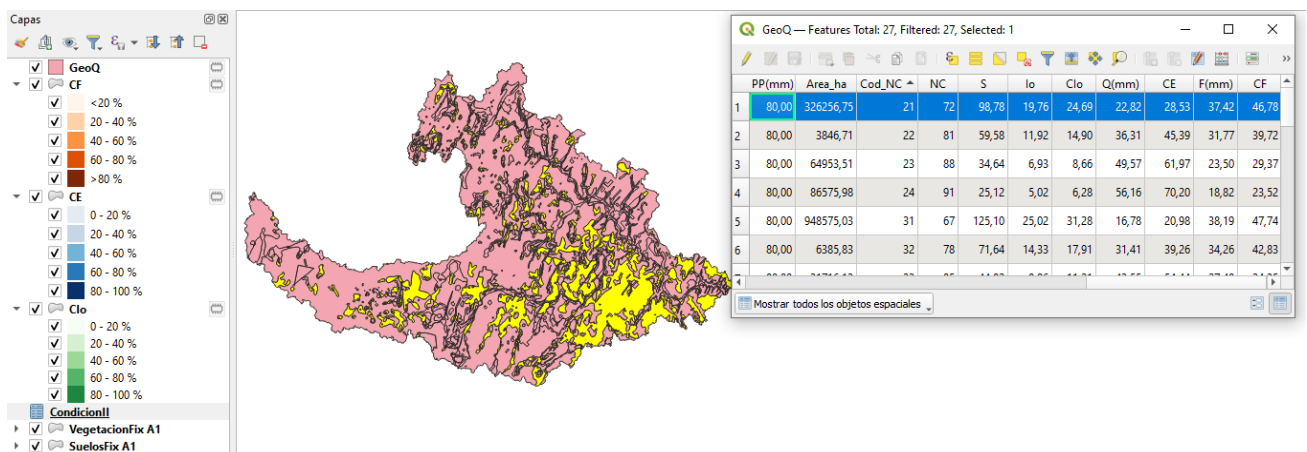


Figura 6. Resultados del modelo GeoQ.

De igual forma, el modelo genera 3 capas adicionales, las cuales corresponden a los coeficientes CF, CE, Cio; cada una con sus respectivos valores y su simbología. En la Figura 7, se exponen dichos resultados, para una CHA II, para la cuenda A1 del Río Salado.

Nota1: Si estos resultados son creados como capas temporales, se desplegarán en el proyecto con un nombre incoherente. Por tal razón se aconseja guardarlas en el equipo con el nombre recomendado.

Nota 2: Recordar disponer de los archivos de simbología en la carpeta C:\GeoQ.

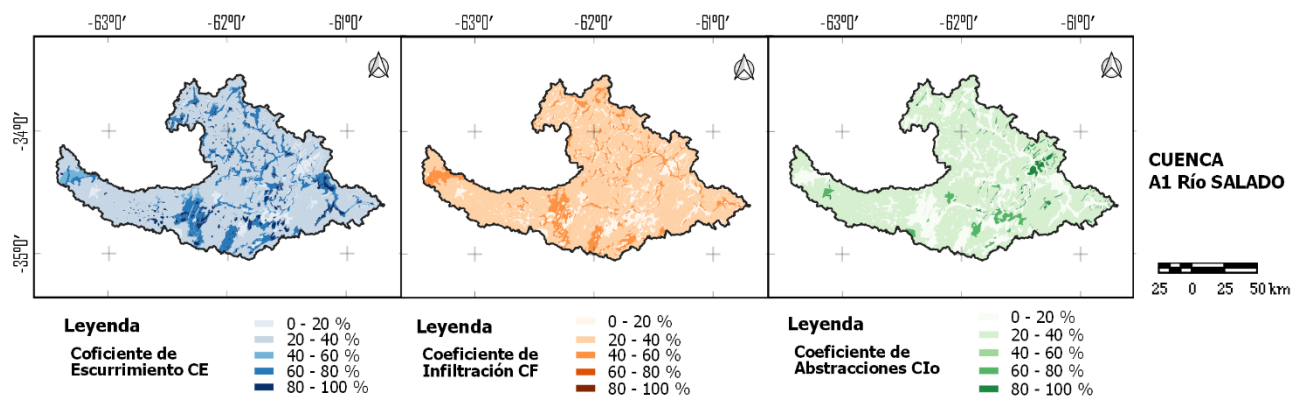


Figura 7. Coeficientes de Escurrimiento (Izquierda), Infiltración (Centro) y Abstracciones iniciales (Derecha).

La sistematización de procesos geoespaciales del **GeoQ**, permite agilizar y estandarizar procesos, manipular y analizar información vectorial, generando la zonificación de componentes hidrológicos, como apoyo SIG en proyectos de planificación territorial. La utilización de esta herramienta proporciona la posibilidad de determinar, cuantificar y zonificar la escorrentía para una tormenta según las CHA I, II y III sobre una cuenda hidrográfica, como así también la infiltración y las abstracciones iniciales según el NC.

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** en su primera versión, está diseñado para evaluar la escorrentía superficial con un único valor de precipitación para toda el área de una cuenca hidrográfica, y se está trabajando en actualizaciones, para capturar datos pluviales de forma heterogénea por medio de imágenes satelitales de precipitación. Por ello, para futuros estudios se generará una versión de **GeoQ** para la modelización a partir de imágenes satelitales de precipitación, que brindará una mayor aproximación y distribución del fenómeno de lluvia-escorrentía en una cuenca hidrográfica.

Bibliografía

- Aguayo, M. I., Wiegand, T., Azócar, G. D., Wiegand, K., y Vega, C. E. (2007). Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Angeles, Chile. *Ecology and Society*, 12(1).
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., Mays, L. W., Saldarriaga, J. G., y Santos G., G. R. (1994). Hidrología Aplicada. In *Bogotá, Colombia*. McGraw-Hill.
- de Antueno, L., Gaspari, F. J., y 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.
- Gaspari, F. J., Díaz, A. R., Delgado, M. I., y 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, F. J., Díaz Gómez, A. R., y 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, Nº. 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, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., y 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, F. J., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., y 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, F. J., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., Rodríguez Vagaría, A. M., y Besteiro, S. (2009). *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas* (1st ed.).
- Kent, K. M. (1973). *method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds* (SCS-TP-149 (ed.)). USA Soil Conservation Service.
- 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., y López Unzú, 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., y Singh, V. P. (2013). *Soil conservation service curve number (SCS-CN)*

- methodology* (Vol. 42). Springer Science y Business Media.
- Mockus, V. (1972). Section 4. Hidrology. In Soil Conservation Service SCS (Ed.), *National Engineering Handbook* (p. 127). US Department of Agriculture, Washington.
- Neilsen, R. D., y Hjelmfelt, A. T. (1998). Hydrologic soil group assignment. *Proceedings of Water Resources Engineering*, 1297–1302.
- Rodríguez Vagaría, A. M., Gaspari, F. J., y 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>
- Sandoval, V., y Oyarzun, V. (2004). Modelamiento y prognosis espacial del cambio en el uso del suelo. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 11, 9–21.