

# DISEÑO DE ZANJAS DE INFILTRACIÓN EN ZONAS NO AFORADAS USANDO SIG

• Juan Pablo Flores-Villanelo •  
*Centro de Información de Recursos Naturales, Chile*

## Resumen

Se desarrolló un procedimiento para dimensionar zanjias de infiltración dependiendo de un balance hídrico en la ladera, el cual está focalizado en dos elementos centrales: eventos extremos de precipitación y capacidad de infiltración constante. Debido a la disponibilidad de datos hidrológicos de la cuenca del río Purapel, este modelo de infiltración incorpora análisis regional de frecuencia, análisis de distribución de la lluvia, método de índice de tormenta y técnicas geoestadísticas. Los resultados permiten obtener una extensión de las relaciones intensidad-duración frecuencia para zonas sin registro continuo de la lluvia y el dimensionamiento para la estructura de conservación de aguas y suelo. El modelo fue aplicado a la cuenca del río Purapel, en Chile central, para demostrar la facilidad del procedimiento sugerido.

**Palabras clave:** tasa de infiltración, intensidad-duración-frecuencia, zanja de infiltración.

## Introducción

El marcado impacto de la erosión hídrica en la disminución de la productividad agrícola y forestal en la zona central de Chile hace necesario desarrollar planteamientos y diseños de obras de conservación de aguas y suelos. Así, cabe destacar que la agricultura de esorrentía y la agrosilvicultura son medidas de aprovechamiento hídrico para un cultivo, con favorables resultados de establecimiento, crecimiento y desarrollo de plantas en zonas semiáridas. Este trabajo estudia las *zanjas de infiltración*, para aumentar la recarga hídrica del suelo (Boers y Ben-Asher, 1982; Lovenstein *et al.*, 1991). Se han propuesto algunos modelos interesantes (Falco *et al.*, 1997; Martínez de Azagra, 2000; Akan, 2002), que suponen que toda el agua de esorrentía generada por el área de impluvio se infiltra en el área de recepción, situación que dista mucho de lo real.

En muchos de estos modelos se dispone de escasa información climatológica. Además hay una gran variabilidad espacial y temporal de los procesos hidrológicos. Ello requiere incorporar análisis regionales y técnicas geoestadísticas. Koutsoyiannis *et al.* (1998) propusieron unas curvas IDF regionales que permiten la incorporación de estaciones sin registros de pluviometría (con distintas duraciones de lluvia) para la construcción de la IDF en sitios no aforados. La determinación de un índice de tormenta derivado de las relaciones IDF permite establecer patrones de las intensidades de precipitación para diferentes duraciones de lluvia (Di Baldassarre *et al.*, 2005). La variabilidad de este índice de tormenta se caracteriza mediante métodos estadísticos para predecir la distribución espacial de los valores de la variable intensidad de precipitación, expresado como un cociente o índice de tormenta,  $I_t^T/I_{24}^T$  (Cheng *et al.*, 2003). También estos modelos requieren de

Cuadro 1. Modelos intensidad-duración-frecuencia (IDF).

Modelo IDF	$I_t^T =$	Número de parámetros
1	$aT^b(t^c + d)^{-1}$	4
2	$ai_i^T(t+b)^{-c}$	3
3	$i_{24}^T(i_1 / i_{24}) \left( \frac{a^b - t^b}{a^b - c} \right)$	3
4	$aT^b(t+d)^{-c}$	4
5	$aT^b t^{-c}$	3

una determinación de las propiedades físicas del suelo, en especial la capacidad final de infiltración del suelo,  $f_c$ .

La opción más sencilla es trabajar con eventos de intensidad de lluvia y capacidad de infiltración constante, aun cuando se podría subestimar el calado ( $h$ ) almacenado y sobreestimar la superficie de la infiltración (Akan, 2002).

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo de zanja de infiltración en función del balance hídrico de una ladera usando un sistema de información geográfico.

## Metodología

### Diseño hidrológico de zanjas de infiltración

El diseño de un sistema de aprovechamiento de agua (figura 1) se define como un sistema “producción-recolección” en una ladera que se subdivide en  $N$  unidades. Las hipótesis del modelo de zanjas de infiltración son:

- La precipitación es uniforme en cada unidad analizada.
- Se considera un suelo desnudo.
- No hay evaporación desde el suelo durante el chubasco.
- Las unidades son independientes entre sí
- El tamaño de cada unidad  $\leq 100 \text{ m}^2$ .
- No hay circulación de agua entre las distintas unidades.

- La sección transversal y el calado son uniforme a través de la zanja de infiltración.
- Ante eventos prolongados de lluvia y el parámetro  $\alpha$  y  $\beta$  sea grande, la velocidad de infiltración es:

zona de recepción:  $v_i(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-\alpha t}$ , se simplifica a  $v_i(t) = f_c$

zona de impluvio:  $w_i(t) = g_c + (g_0 - g_c)e^{-\beta t}$ , se simplifica a  $w_i(t) = g_c$

siendo  $v_i(t)$  = velocidad de infiltración de la zona de recepción;  $w_i(t)$  = velocidad de infiltración en el área de impluvio;  $f_0$  y  $g_0$  = capacidad de infiltración inicial del área de recepción e impluvio, y  $f_c$  y  $g_c$  = capacidad de infiltración final del área de recepción e impluvio, respectivamente. Por lo general  $f_c \approx g_c$  (salvo enmiendas muy importantes en el área de recepción o aplicaciones impermeabilizante en el área de impluvio).

Este diseño plantea que el volumen aportado ( $V_a$ ) sea igual al volumen recepcionado ( $V_r$ ). La determinación del volumen de aportación se basa en el cálculo de la escorrentía superficial, explicado por la ecuación de continuidad:

$$q = P - P_0 - F \quad (1)$$

Donde  $q$  es la escorrentía superficial [L];  $P$ , la precipitación total [L];  $P_0$ , la abstracción inicial [L];  $F$ , la infiltración acumulada [L].

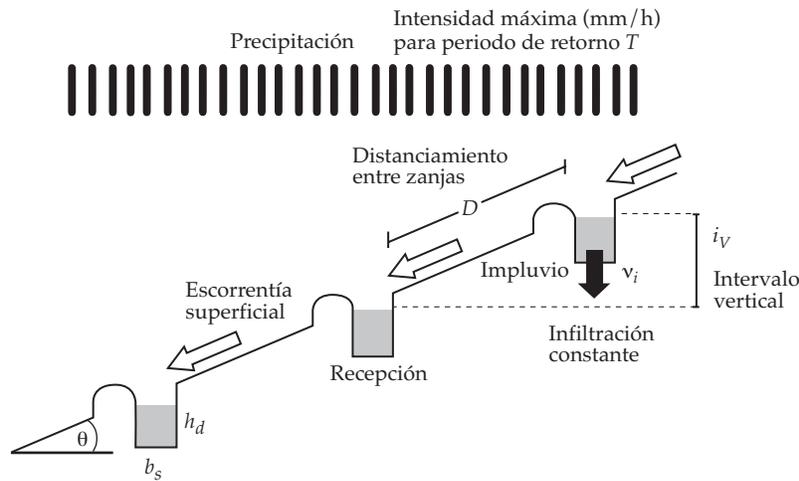


Figura 1. Esquema de zanjas de infiltración en ladera.

La precipitación  $P$ , en un intervalo  $\Delta t$ , puede expresarse usando las relaciones intensidad-duración-frecuencia (Chen, 1983):

$$P = i_m t = \frac{aT^b}{t^c + d} t \quad (2)$$

siendo  $i_m$  la intensidad media de precipitación [ $LT^{-1}$ ];  $t$ , la duración del evento [ $T$ ];  $T$ , el periodo de retorno [ $T$ ];  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ , parámetros del modelo IDF. Derivando la ecuación (4), se obtiene la intensidad de lluvia instantánea,  $i_i$  [ $LT^{-1}$ ]:

$$i_i = \frac{dP}{dt} = i_m \left( 1 - \frac{c \cdot t^c}{t^c + d} \right) \quad (3)$$

Si se considera una superficie suficientemente pequeña, se puede infiltrar toda el agua. Transcurrido un tiempo  $t = t_p$  (tiempo de encharcamiento), el suelo alcanzará su estado de saturación y su superficie comenzará a encharcarse, llenándose las depresiones. A partir de este instante, el sistema produce escorrentía, que termina cuando la intensidad

de lluvia instantánea ( $i_i$ ) se iguala a la capacidad de infiltración final ( $f_c$ ), de modo que:

$$i_m \left( 1 - \frac{ct^c}{t^c + d} \right) - f_c = 0 \quad (4)$$

El valor de  $t$  correspondiente a  $q$  (ecuación (1)) puede ser obtenido usando el método de Newton-Raphson.

En zonas geográficas con disponibilidad de datos pluviométricos, la intensidad media de la lluvia puede ser fácilmente obtenida utilizando la curva local de intensidad-duración-frecuencia (Yu y Chen, 1997). Sin embargo, esto no ocurre en zonas de la región central de Chile, por lo que hay que recurrir al análisis regional (Hosking y Wallis, 1997), análisis de distribución de precipitaciones máximas (Raynal, 2005), índice de tormenta (Di Baldassarre *et al.*, 2005) y técnicas geoestadísticas (Cheng *et al.*, 2003), como el krigado ordinario. La lluvia de diseño se determina a partir del uso de un índice de tormenta,  $k$ :

$$I_i^T = k \times I_{diaria}^T \quad (5)$$

donde  $I_i^T$  es la intensidad de precipitación a la hora  $i$  ( $i = 1, 2, 6, 12$  y  $24$  horas) e  $I_{diaria}^T$  es la intensidad de precipitación diaria.

La substracción inicial,  $P_0$  [L], se determina por Ferrer *et al.* (1995):

$$P_0 = 50.8 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (6)$$

siendo CN el número de curva para condiciones de humedad antecedente del suelo tipo III.

La infiltración acumulada es:

$$F = f_c \cdot t_i / 60 \quad (7)$$

Donde  $t_i = t - t_{p0}$  es el periodo de infiltración [T] y  $t_{p0} = (P_0 / i_m) \cdot 60$ , el tiempo que corresponde a la substracción inicial [T].

Para el dimensionamiento de una zanja de infiltración rectangular en ladera se consideran los siguientes volúmenes de agua:

Volumen de agua de impluvio:

$$V_a = q \cdot S_i = q \cdot l \cdot D \quad (8)$$

Volumen geométrico de la zanja:

$$V_g = h_d \cdot S_r = h_d \cdot b_s \cdot l \quad (9)$$

Volumen de precipitación al interior de la zanja:

$$V_p = (i_m \cdot t) \cdot S_r = P \cdot b_s \cdot l \quad (10)$$

Volumen de infiltración:

$$V_i = (v_i \cdot t) \cdot S_r = (f_c \cdot t) \cdot b_s \cdot l \quad (11)$$

Siendo  $D$  el distanciamiento entre zanjas [L];  $h$ , la profundidad de la zanja [L];  $S_r$ , el área de recepción dentro de la zanja [L<sup>2</sup>];  $b$ , el ancho de la zanja [L];  $l$ , el largo de la zanja [L];  $v_r$  la velocidad de infiltración de agua dentro de la zanja ( $f_c$ ) [LT<sup>-1</sup>].

Utilizando la ecuación de continuidad aportación-recepción ( $V_a = V_r$ ):

$$q \cdot S_i = h_d \cdot S_r + f_c \cdot t \cdot S_r - P \cdot S_r \quad (12)$$

$$\text{sujeto a } h_d > t(f_c - i_m)$$

se deduce el espaciamiento entre zanjas,  $D$  [L], y con ella la del intervalo vertical entre zanjas de infiltración,  $i_v$  [L], para aplicaciones de un SIG, con el modelo de digital de elevaciones de una cuenca, por lo que se tiene que:

$$D = b_s [h_d + t(f_c - i_m)] (q \cos(\theta))^{-1} \quad (13)$$

### Área de estudio

El área de estudio (figura 2) comprende la cuenca del río Purapel, de clima tipo mediterráneo, con seis meses secos y seis meses húmedos, ubicada en la cordillera de la costa de la región del Maule, Chile. Cuenta con un área de tributación de 264.6 km<sup>2</sup> hasta la estación de aforo en Nirivilo (35° 34' LS; 72° 05' LO), con un largo de cauce principal de 77.2 km. La temperatura media anual es de 15.2 °C, con temperaturas máximas promedio de 28.5 °C en enero y mínimas promedio de 5.4 °C en julio. Las precipitaciones medias anuales en la cuenca se estiman en 810 mm, siendo julio el mes más lluvioso, con 194.2 mm, y enero el mes más seco, con 4.4 mm (Pizarro *et al.*, 2006).

Las precipitaciones en la zona central de Chile ocurren en un 90% durante el periodo mayo-septiembre, asociadas con los frentes fríos que ocasionalmente alcanzan esta región cuando el anticiclón subtropical del pacífico suboriental es anormalmente débil (Garreaud y Rutllant, 2006). Así, esta zona se caracteriza por una extrema variabilidad de las precipitaciones entre un año y otro, en parte relacionada con la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO), mientras que el comportamiento interdecadal se asocia con la oscilación decadal del pacífico (PDO) (Montecinos y Aceituno, 2003). La clase textural predominante del suelo es franco areno-arcilloso y tiene un comportamiento hidrológico correspondiente al grupo C de acuerdo con la clasificación del método del número de curva.

La cuenca presenta una cobertura forestal sobre el 70%, entre plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don), actualmente en explotación, y bosque nativo. En los terrenos más planos de la cuenca se presentan cultivos característicos de la agricultura de secano.

#### *Determinación del diseño hidrológico de zanjas usando ArcGis*

La estimación de la lluvia de diseño se determinó mediante la ecuación (5). Se analizó la presencia de datos incorrectos y valores anómalos, independencia y estacionariedad, y tendencia monótona de las series (1965-2007), a través del test de Grubbs y Beck, Wald-Wolfowitz y Mann-Kendall, respectivamente. El análisis regional se llevó a cabo con los programas *XTEST*, *XSIM* y *XFIT*, descritos ampliamente en García (2000), como una estimación de observaciones puntuales de las precipitaciones máximas de la región central de Chile. Se hizo necesario interpolar la información suministrada por los 52 pluviómetros de la misma, mediante krigado ordinario.

El proceso geoestadístico para la variable "índice de tormenta,  $k$ " ajustó un modelo exponencial a una serie de 52 puntos (o estaciones pluviométricas), según Isaaks y Srivastava (1989):

$$\gamma(h_d) = C_0 + C_1 \left( 1 - e^{\left( -\frac{h_d}{a_x} \right)} \right) \quad \text{cuando } |h_d| > 0 \quad (14)$$

$$\gamma(h_d) = 0 \quad \text{cuando } |h_d| = 0 \quad (15)$$

Donde  $C_0$  es la varianza en el origen;  $a_x$ , el alcance;  $h_d$ , el vector distancia, y  $C_0 + C_1$ , la meseta.

Los parámetros del variograma se consideraron funciones también del intervalo de recurrencia y de la duración de la lluvia de diseño. Por lo tanto, se determinó un

variograma para cada diseño de lluvia. Esas relaciones son bien consistentes con las características aleatorias de la lluvia de diseño, considerando que la distribución espacial de la lluvia tiene un comportamiento (influenciado por el anticiclón del Pacífico) como un campo aleatorio y su estructura de variación espacial varía en función de la duración y el periodo de retorno.

Los valores de intensidad de precipitación interpolados a la cuenca del río Purapel son ajustados a un modelo IDF mediante el método de mínimos cuadrados y utilizando el algoritmo de optimización de Rosenbrock, a través del método de gradiente avanzado de *quasi-Newton*. Se probaron varios modelos.

Este modelo estima de forma indirecta la velocidad de infiltración del agua en el suelo (figura 3), en función de pendientes y textura del suelo, para lo cual se incorporó la base de datos de la caracterización de suelos del estudio agroecológico (1:50.000) del Centro de Información de Recursos Naturales (Ciren)-Chile y las tasas de infiltración constante publicadas por el Departamento de Suelos de la Universidad de Carolina del Norte, Estados Unidos.

La aplicación SIG de este modelo se lleva a cabo mediante un código *Matlab* y un modelo de elevación digital de la cuenca, obtenido de la información digitalizada de una ortofoto del Centro de Información de Recursos Naturales 1:20.000 (Ciren, Chile) y cartas digitales del Instituto Geográfico Militar 1:50.000 (IGM, Chile), en donde se utilizó *ArcGis* de ESRI para el ordenamiento de la información disponible y la visualización gráfica de ésta.

## **Resultados y discusión**

La exploración de los datos de precipitación extrema registró un 1% de valores anómalos del total de datos de las series, donde el 21% de los mismos se registró en la serie de una hora, por lo cual se eliminaron del análisis regional de precipitaciones. Este estudio

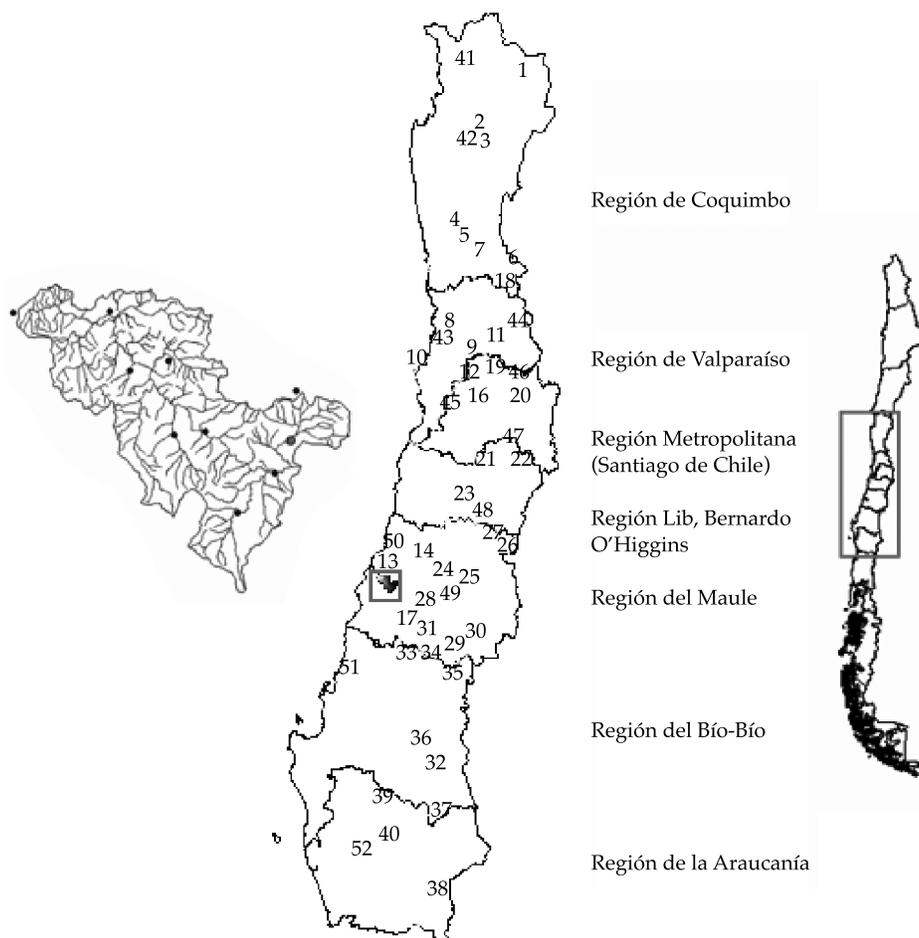


Figura 2. Ubicación de la cuenca del río Purapel y de las 52 estaciones pluviométricas de la región central de Chile.

consideró un nivel de significancia del 1%, para lo cual la totalidad de las series de precipitaciones máximas cumplen el requisito de independencia y estacionariedad. En cuanto al análisis exploratorio de la serie Nirivilo, la prueba de Grubbs y Beck sí detectó un dato anómalo (en un nivel de significancia del 10%), en la lluvia del día 26 de abril del año 1957, que se eliminó. Mientras que el estadístico de Wald-Wolfowitz comprobó que los datos de precipitaciones son independientes y estacionarios, y la prueba no-paramétrica de Mann-Kendall no detectó tendencias monótonas en la serie.

Los estimadores de los parámetros para la distribución GVE, por medio del método de momentos de probabilidad ponderada propuesto por Raynal (2005), fueron muy cercanos en valor numérico a la metodología de Hosking y Wallis tanto en la obtención de parámetros de la función de distribución GVE como en la evaluación de los valores de diseño, sin embargo, el insesgamiento de los primeros es menor.

Los modelos matemáticos ajustados presentan excelentes resultados (mayoritariamente  $R^2 > 90\%$ ). Para la cuenca del río Purapel, el mejor fue el modelo 1 (Témez, 1978):

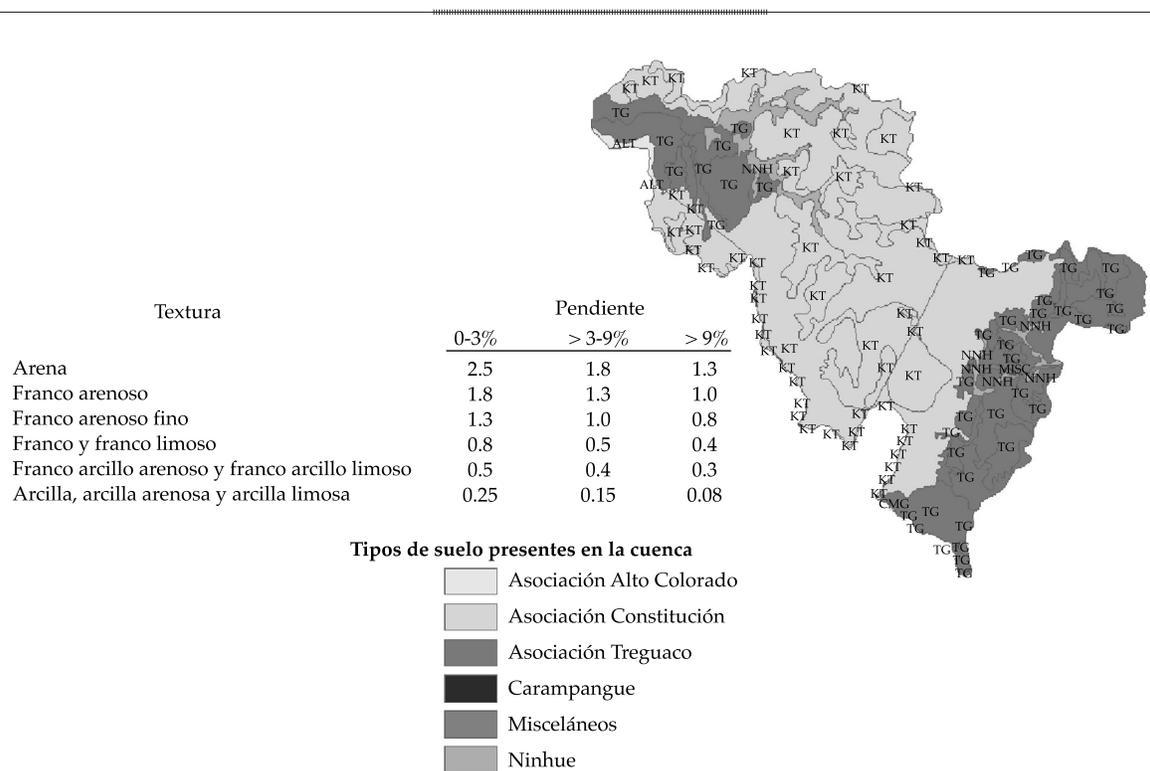


Figura 3. Tasas de infiltración aproximadas (cm/h) para varias texturas y pendientes del suelo para la cuenca del río Purapel (fuente: <http://www.soil.ncsu.edu>).

$$I_i^T = \frac{19.37 \cdot T^{0.2109}}{t^{0.5501} + 0.5677} \quad (16)$$

Por otra parte, distintas relaciones de  $f_c$  en función de la duración de la lluvia ( $t$ ); periodo de retorno ( $T$ ); escorrentía superficial ( $q$ ); y distanciamiento entre zanjas de infiltración se muestran en las figuras 4, 5, 6 y 7. En la figura 4, el tiempo que demora en igualar las tasas de intensidad de precipitación instantánea ( $i_i$ ) y la capacidad de infiltración ( $f_c$ ) disminuye al aumentar  $f_c$ , y demuestra que el modelo IDF 1 se comporta mejor que los modelos 4 y 5, propuestos por Yarnell (1935) y Ponce (1989), respectivamente. La figura 5 presenta una familia de curvas para cada periodo de retorno (5, 10 y 20 años) para la relación  $t$  vs.  $f_c$ . Al aumentar el periodo de retorno, el tiempo de equilibrio ( $i_i = f_c$ ) aumenta.

Por otra parte, la escorrentía superficial disminuye con  $f_c$  (figura 6); contrariamente, el distanciamiento entre zanjas aumenta con  $f_c$  (figura 7). Para periodos de retornos altos,  $D$  comienza a disminuir debido a que los volúmenes de escorrentía a infiltrar son mayores, para lo cual se deben realizar más obras de infiltración por hectárea.

El modelo DEM de la cuenca del río Purapel (figura 8) es una red de 247 x 266 celdas, incluidos pendientes, cauces hídricos y retículas de banco. El tamaño de la celda fue definido como 100 \* 100 m (1 ha). Al convertir las capas de información ASCII a formato matricial, provenientes de *Matlab*, el modelo representa en *ArcGIS* el distanciamiento entre zanjas de infiltración para cada celda dentro de la cuenca (figura 9).

El distanciamiento entre zanjas está relacionado con una serie de variables y

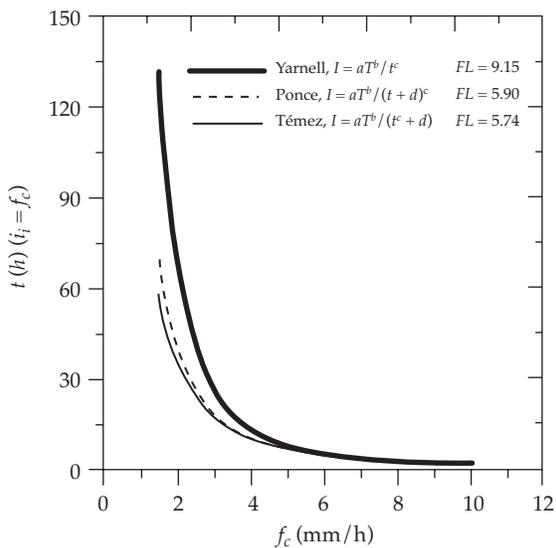


Figura 4. Duración de la lluvia cuando  $i_i = f_c$  y la capacidad de infiltración ( $f_c$ ) del suelo, para  $T = 10$ , usando tres modelos IDF.

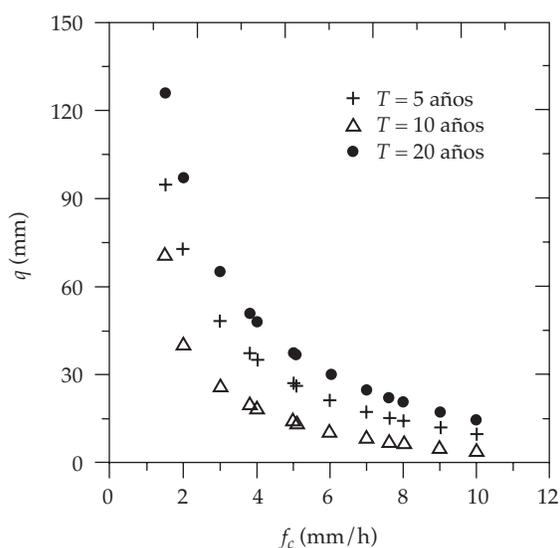


Figura 6. Escorrentía superficial en función de la capacidad de infiltración del suelo ( $T = 10$ ;  $\theta = 10$ ).

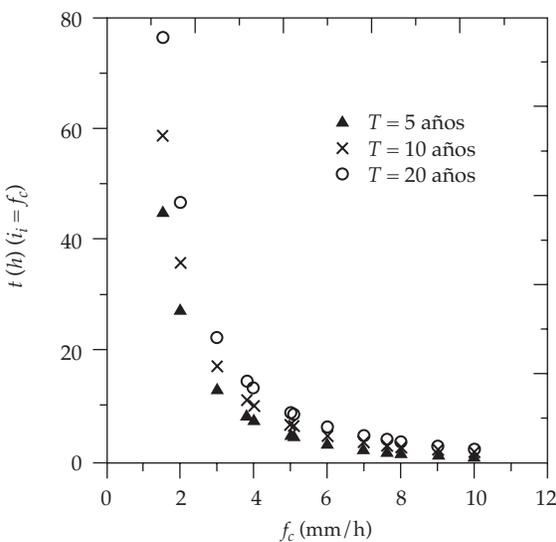


Figura 5. Duración de la lluvia cuando  $i_i = f_c$  y la capacidad de infiltración ( $f_c$ ) del suelo, para distintos periodos de retorno ( $T = 5, 10, 20$ ).

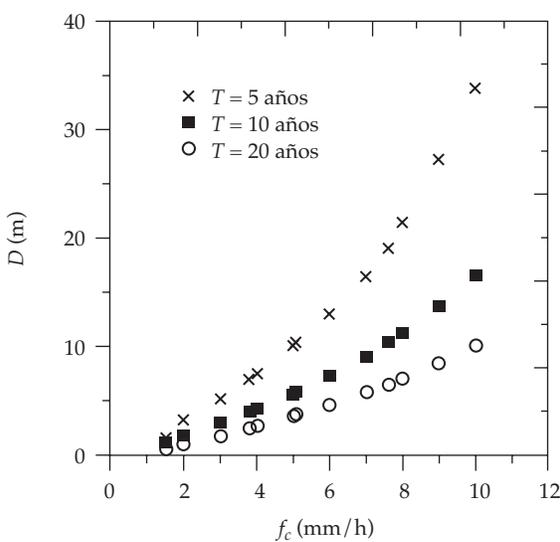


Figura 7. Distanciamiento entre zanjas en función de la capacidad de infiltración del suelo ( $T = 10$ ;  $\theta = 10$ ;  $b = 0.5$ ;  $h = 0.3$ ).

parámetros, los cuales el ingeniero de obra puede modificar, según los objetivos del proyecto de diseño. Aumentar la altura de la

obra,  $h$ , provoca un mayor  $D$  (figura 10). Es posible considerar un factor de rebosamiento,  $f_r$ , lo cual permite manejar  $D$ , cuando

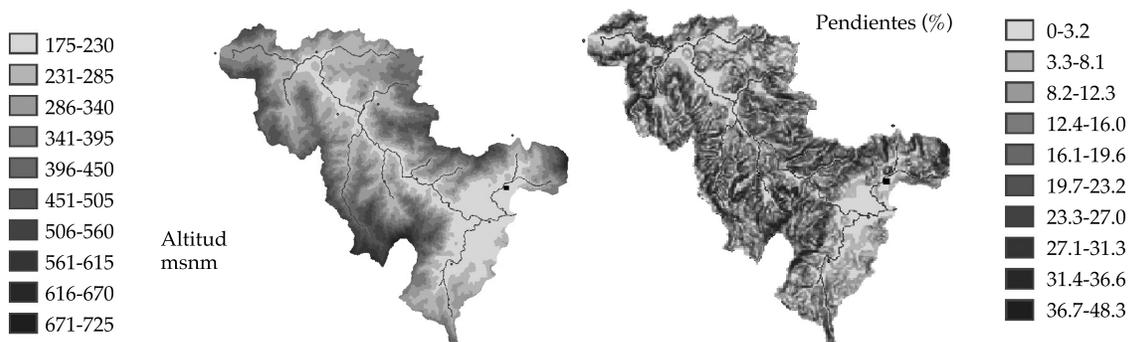


Figura 8. Modelo digital de elevaciones de la cuenca del río Purapel (izquierda) y mapa de pendientes de la cuenca del río Purapel (derecha).

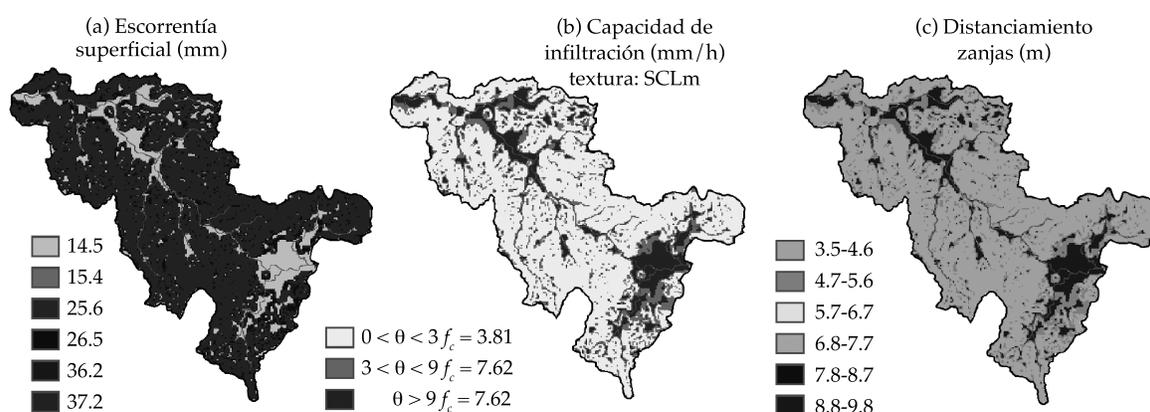


Figura 9. (a) Mapa de escorrentía superficial (izquierda); (b) capacidad de infiltración del suelo  $f_c$  para una textura franco arenoso arcilloso (centro), y (c) distanciamiento entre zanjas de infiltración (derecha), para  $T = 10$ ;  $b = 0.5$ ;  $h = 0.3$ , aplicado a la cuenca del río Purapel.

los volúmenes de impluvio exceden las necesidades del cultivo. Al aumentar el factor de rebosamiento, se incrementa  $D$  (figura 11). Otras relaciones pueden encontrarse (figuras 12 y 13) al relacionar distintos valores del número de curva y la pendiente, y el distanciamiento entre zanjas, manipulando la configuración geométrica de la zanja (en este caso,  $h$ ).

Para comprender las relaciones entre  $D$  y CN III (figura 12), hay que considerar que el suelo está desnudo; de lo contrario debe incorporar nuevos procesos en el modelo,

como la interceptación y, posiblemente, la evaporación.

Uno de los aspectos más discutibles del presente modelo es la variabilidad temporal y espacial de las variables incluidas, como la velocidad de infiltración constante en el impluvio y recepción, la intensidad de precipitación constante, la superficie anegada o el volumen de agua almacenado en las microdepresiones, etcétera. Así, el valor de  $q$  y  $h$  disminuye cuando  $f_c$  aumenta. Este comportamiento puede ser bien entendido

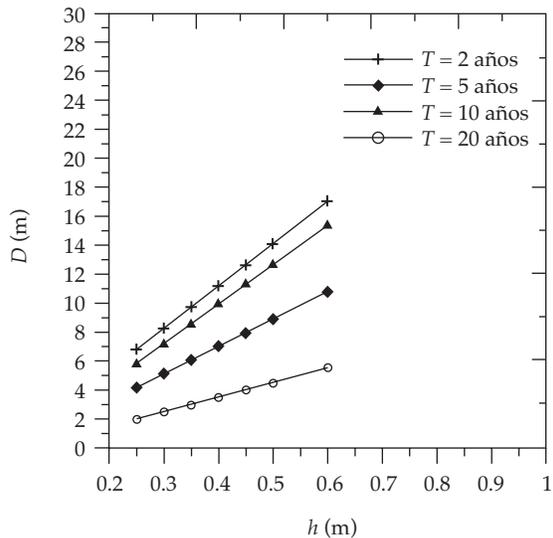


Figura 10. Distanciamiento ( $D$ ) en función de la altura de la zanja de infiltración ( $h$ ) para distintos periodos de retorno ( $T = 2, 5, 10, 20$ ;  $\theta = 10$ ;  $b = 0.5$ ).

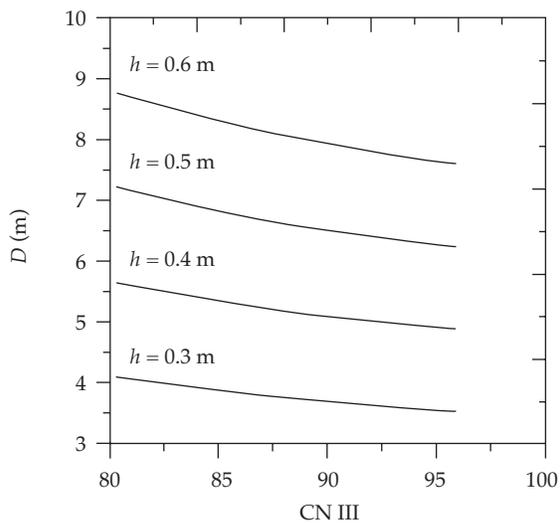


Figura 12. Distanciamiento ( $D$ ) en función del número de curva (condición hidrológica III) para distintas alturas de zanja de infiltración ( $h = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ ;  $\theta = 10$ ;  $b = 0.5$ ).

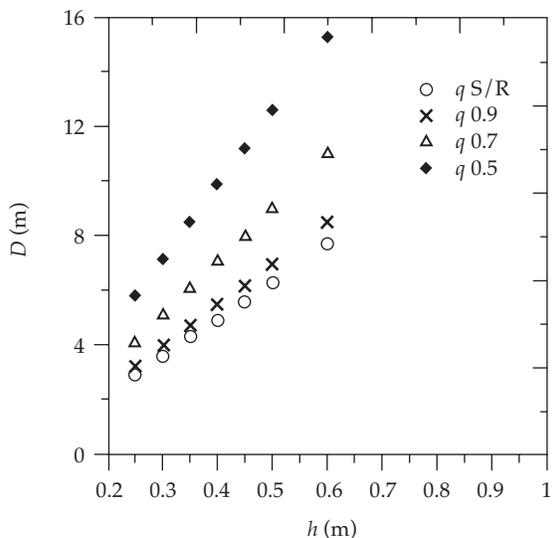


Figura 11. Distanciamiento ( $D$ ) en función de la altura de la zanja de infiltración ( $h$ ) para distintos factores de rebosamiento ( $f_r = qS/R$  (ninguno),  $q0.9$  (10%),  $q0.7$  (30%),  $q0.5$  (50%);  $\theta = 10$ ;  $b = 0.5$ ).

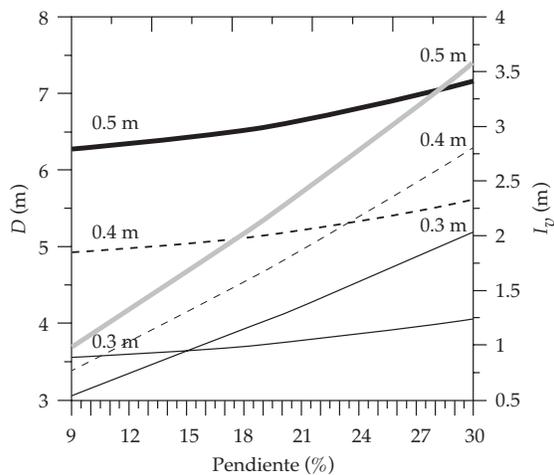


Figura 13. Distanciamiento ( $D$ ) e intervalo ( $i_v$ ) entre zanjas, en función de la pendiente del terreno ( $\theta$ ) para distintas alturas de zanja de infiltración ( $h = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ ;  $\theta = 10$ ;  $b = 0.5$ ).

cuando se revisan los resultados de Pruski *et al.* (1991), quienes obtuvieron gráficas para  $q$

con la duración de la lluvia y diferentes valores de infiltración ( $f_c$ ). Al aumentar  $f_c$  la duración

de la lluvia que produce  $q$  disminuye, como también el valor total de la lluvia asociada con éste, puesto que como la duración de la lluvia aumenta, estas intensidades máximas promedio disminuyen, mientras que el total de lluvia se incrementa.

Asimismo, al no validar los coeficientes del parámetro  $P_0$  (ecuación 6), pueden limitar los resultados, ya que estos fueron desarrollados para otras zonas geográficas, pudiéndose utilizar como herramienta de investigación de valores iniciales. Por ello, para el diseño óptimo de un sistema de captura y aprovechamiento hídrico, es necesario una determinación de alta precisión de los valores de  $f_c$ . Para posteriores investigaciones se realizará una adaptación del número de curva a las nuevas fuentes de datos; en concreto, a la nueva cartografía de usos de suelo provenientes del proyecto Land Cover Corine (CLC-2000), ampliamente usado en Europa y Latinoamérica.

## Conclusiones

El correcto diseño de una zanja infiltración para un periodo de retorno dado depende en gran medida de la precisión en la determinación de los volúmenes de escorrentía y la capacidad de infiltración ( $f_c$ ).

Los resultados del análisis local y regional de las series anuales máximas de precipitación en la estación Nirivilo (cuena del Purapel) y la región central de Chile, respectivamente, permiten obtener un valor confiable de  $I_{dt}^T$  que reproduce además las propiedades estadísticas de las lluvias extremas observadas para la región de estudio.

La utilización de un sistema de información geográfica y el krigado ordinario resultaron ser una eficaz técnica de interpolación de datos muestrales y permite realizar una cartografía de índice de precipitación,  $k(I_t^T/I_{24}^T)$ ; asimismo, genera un estimador lineal e insesgado que hace mínima varianza del error de estimación. Esto permitió la construcción de las relaciones IDF para la cuena del río Purapel, herramienta fundamental para el diseño de proyectos de

conservación de aguas y suelos para zonas sin registros pluviométricos.

Finalmente, el diseño de zanjas introducido en este trabajo emplea una base física mucho más extensa que otros diseños usados en la práctica; sin embargo, utiliza una mayor cantidad de información, lo que no siempre se dispone a cabalidad en la región central de Chile, y es que en la caracterización de los procesos de infiltración en una ladera con estructuras de infiltración caben distintas posibilidades, desde trabajar directamente con datos experimentales obtenidos sobre el terreno con infiltrómetros o con simuladores de lluvia, hasta utilizar modelos sencillos como el método SCS, o trabajar con tasas de infiltración constante, o bien, con modelos de infiltración en función del tiempo y volúmenes de agua precedentes. El diseño presentado aquí es uno de ellos y puede resultar una herramienta fundamental de planificación y diagnóstico para muchos proyectos que se pueden llevar a cabo en laderas “con procesos de desertificación” o de “establecimiento de cultivos agroforestales”.

## Agradecimientos

Se agradece a todas las personas e instituciones que facilitaron el desarrollo de esta investigación, en especial a ESTIAM de la Universidad de Córdoba (España), Arauco S.A. (Chile), a la Dirección General de Aguas (Gobierno de Chile) y la Agencia Española de Cooperación Internacional (España).

Recibido: 30/07/10

Aceptado: 01/11/11

## Referencias

- AKAN, O. Sizing storm water infiltration structures. *J. Hydraul. Engng.* ASCE. Vol. 128, No. 5, 2002, pp. 534-537.
- BOERS, T. and BEN ASHER, J. A review of rainwater harvesting. *Agric. Water Manag.* Vol. 5, 1982, pp. 145-158.
- CHEN, C. Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *J. Hydraul. Engng.* ASCE. Vol. 109, 1983, pp. 1603-1621.
- CHENG, K., WEI, C., CHENG, Y., and YE, H. Effect of spatial variation characteristics on contouring of design storm depth. *Hydrol. Proc.* Vol. 17, No. 9, 2003, pp. 1755-1769.

- DI BALDASSARRE, G., CASTELLARIN, A., and BRATH, A. Evidences of relationships between statistics of rainfall extremis and mean annual precipitation: an application for design-storm in northern central Italy. *Hidrol. Earth Syst. Sci.* Vol. 10, 2005, pp. 589-681.
- FALCO, F., AFONSO, P., MOTA, M., and CECON, P. Model to design level terraces. *J. Irrig. Drain. Engng.* Vol. 13, No. 1, 1997, pp. 8-12.
- FERRÉR, M., RODRÍGUEZ, J., and ESTRELA, T. Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del Agua.* Vol. 2, núm. 4, 1995, pp. 43-58.
- GARCÍA, M. *Análisis regional de las precipitaciones máximas en Andalucía. Estimación de las relaciones IDF.* Trabajo profesional de fin de carrera. Córdoba, España: Departamento de Ingeniería Rural, Universidad de Córdoba, 2000.
- GARREAUD, R. and RUTLLANT, J. Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del anticiclón del Pacífico Sureste. *Cienc. Tecnol. Mar.* Vol. 29, No. 1, 2006, pp. 5-13.
- HOSKING, J. and WALLIS, J. *Regional frequency analysis.* Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- KOUTSOYIANNIS, D., KOZONIS, D., and MANETAS, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *J. Hydrol.* Vol. 206, No. 1/2, 1998, pp. 118-135.
- LOVENSTEIN, H., BERLINER, P., and KEULEN, H. Runoff agroforestry in arid lands. *Forest Ecol. Manag.* Vol. 45, 1991, pp. 59-70.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. *Principles for designing endorheic microcatchments.* Vol. I. Third International Congress Man and Soil at the Third Millenium, Valencia, 2000, pp. 507-520.
- MONTECINOS, A. and ACEITUNO, P. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *J. Clim.* Vol. 16, 2003, pp. 281-296.
- PIZARRO, R., ARAYA, S., JORDÁN, C., FARÍAS, C., FLORES, J., and BRO, P. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel River Basin of Central Chile. *J. Hydrol.* 2006, Vol. 327, No. 1-2, pp. 249-257.
- PONCE, V. *Engineering hydrology. Principles and Practices.* Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.
- PRUSKI, F., FERREIRA, P., SEDIYAMA, G., and VIERA, M. Analysis of the surface runoff in faro lands, in Cascabel and Plotina, Brazil. *Ceres.* Vol. 38, No. 220, 1991, pp. 485-504.
- RAYNAL, J. Estimadores de momentos de probabilidad pesada para la distribución general de valores extremos para máximos. *Inf. tecnol.* Vol. 16, No. 1, 2005, pp. 75-82.
- TÉMEZ, J. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales.* Madrid: Dirección General de Carreteras, 1978.
- YARNELL, D. *Rainfall intensity-frequency data.* Washington, D.C.: US Dep. Agric. Misc. Publ. 204, 1935.
- YU, P. and CHEN, C. Potential of extending the rainfall intensity-duration-frequency relationship to non-recording rain gauges. *Hydrol. Process.* Vol. 11, 1997, pp. 377-390.

## Abstract

FLORES-VILLANELO, J.P. *Infiltration trench design for ungauged areas using SIG*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 2, April-June, 2012, pp. 27-39.

*A procedure was developed for sizing infiltration trenches based on the water balance of a hillslope. This is focused on two main elements—extreme rainfall events and constant infiltration capacity. Because of the shortage of hydrological data near the site of the water resources project, this infiltration model uses regional frequency analysis, analysis of rainfall distribution, the storm index method and the application of geo-statistical techniques. The results allow for obtaining an extension of the intensity-duration-frequency relationships with non-recording rain gauges and the sizing of water and soil conservation structures. The model was applied to the Purapel River Basin located in central Chile to demonstrate the ease of the suggested procedure.*

**Keywords:** *infiltration rate, intensity-duration-frequency, infiltration trench.*

## Dirección institucional del autor

*Ing. Juan Pablo Flores-Villanelo*

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)  
Avenida Manuel Montt 1164, Providencia  
Santiago de Chile, CHILE  
Teléfono: +56 (2) 2008 967  
Fax: +56 (2) 2008 913  
jflores@ciren.cl