

Evaluación de la infiltrabilidad del suelo, como criterio de diseño y manejo de sistemas de riego por aspersión en el municipio de Cliza

Rígel Rocha; Willer Torrico

Centro AGUA (FCAyP - UMSS)

E mail: rigel.rocha@umss.edu.bo

Resumen. La infiltrabilidad o capacidad de infiltración es una propiedad del suelo que condiciona la aplicación de agua de riego; limitando en ciertos casos la adopción y aplicación de métodos de riego presurizado. Sobre la base de la evaluación de la infiltrabilidad de los suelos en el municipio de Cliza, el artículo analiza la manera en la cual la infiltrabilidad condiciona el diseño y el manejo del riego por aspersión en la parcela. Se identificaron 3 clases de suelos por su infiltrabilidad: moderadamente lenta (62.4%), moderada (21.3%), y lenta (16.3%). En términos de diseño: a menor infiltrabilidad se limita la selección de aspersores, y la distancia en laterales/aspersores debe ser incrementada. En términos de manejo: a menor infiltrabilidad, se debe incrementar el tiempo de riego. Se concluye que, la evaluación de infiltrabilidad del suelo, en términos de la determinación de la velocidad de infiltración básica, constituye una tarea fundamental en el marco de procesos de diseño y manejo de sistemas de riego por aspersión.

Palabras clave: Infiltración de agua; Velocidad de infiltración básica; Kostiakov; Selección de aspersores.

Summary. Evaluation of soil infiltrability, as a design and management criteria for sprinkler irrigation systems in the municipality of Cliza. Infiltrability or infiltration capacity is a property of the soil that conditions the application of irrigation water; limiting in certain cases the adoption and application of pressurized irrigation methods. Based on the evaluation of the infiltrability of soils in the municipality of Cliza, the article analyzes how infiltrability conditions the design and management of pressurized irrigation at field level. Three soil classes were identified according infiltrability: moderately slow (62.4%), moderate (21.3%), and slow (16.3%). In terms of design: the lower the infiltrability, the selection of sprinklers is limited, and the distance of laterals/sprinklers must be increased. In terms of management: the less infiltrability, the irrigation time must be increased. In conclusion, the evaluation of soil infiltrability, in terms of the determination of the basic infiltration rate, constitutes a fundamental task in the frame of processes of design and management of sprinkler irrigation systems.

Keywords: Water infiltration; Basic infiltration rate; Kostiakov; Sprinkler selection.

Introducción

La infiltración, definida como la entrada de agua al suelo, es un proceso de gran importancia práctica para el diseño y manejo del riego en la parcela (Hoffman

et al. 2007; Vásquez *et al.* 2017). En el caso específico del riego por aspersión, la capacidad de infiltración o infiltrabilidad del suelo es un criterio básico para la selección del aspersor y el diseño de la disposición de los aspersores en la par-

la, de tal forma que la tasa de aplicación de agua no exceda la tasa de infiltración del suelo, asegurando de esta forma el riego eficiente (Bloem y Laker 1994; Savva y Frenken 2001).

Si se riega por aspersión una parcela con un caudal continuo creciente, al inicio toda el agua aplicada será absorbida por el suelo. En un tiempo, la tasa de aplicación excederá la tasa de absorción del suelo; y mientras una parte del agua aplicada (cada vez menor) seguirá siendo absorbida, el agua excedente se acumulará sobre la superficie o se escurrirá. En este sentido, la tasa de infiltración se define como el volumen de agua que fluye al interior del perfil de suelo por unidad de superficie y tiempo (Hillel 1998). Este flujo, expresado en unidades de velocidad (mm/h, cm/h, etc.), también es denominado velocidad de infiltración.

En la situación específica en la que la tasa de aplicación empieza a exceder la capacidad del suelo para absorber agua, la tasa de infiltración alcanza su valor máximo, es decir que el suelo alcanza su capacidad de infiltración, estado denominado por Hillel (1971) con el término de “infiltrabilidad del suelo”. En este sentido, la infiltrabilidad del suelo se define como “el flujo que el perfil del suelo puede absorber a través de su superficie, cuando es mantenido en contacto con el agua a presión atmosférica” (Gurovich 1985). En un evento de riego, mientras la tasa de aplicación de agua sea menor que la infiltrabilidad del suelo, el agua se infiltra tan rápidamente como es aplicada, es decir que la tasa de infiltración es determinada por la tasa de aplicación de agua. Sin embargo, si la tasa de aplicación excede la infiltrabilidad del suelo, el agua excedente no logra infiltrarse, por lo que la tasa de infiltración está determina-

da por la infiltrabilidad del suelo, es decir por las características del suelo.

Hillel (1998) señala que, en general la infiltrabilidad del suelo es relativamente alta en las primeras etapas de la infiltración, pero tiende a disminuir continuamente con una velocidad cada vez menor, hasta que finalmente se acerca asintóticamente a una tasa o velocidad de infiltración casi constante, denominada infiltrabilidad de equilibrio o velocidad de infiltración básica. La velocidad de infiltración básica es el valor casi constante, alcanzado después de un tiempo de iniciado el riego, en el cual el cambio de la velocidad de infiltración para un periodo estándar es 10% (USDA 1991).

De acuerdo a Gencoglan *et al.* (2005), si los aspersores operan con una tasa de aplicación que permanece por debajo de la velocidad de infiltración básica del suelo, toda el agua aplicada infiltra y no se produce encharcamiento o escorrentía durante todo el evento de riego. En cambio, cuando los aspersores operan con una tasa de aplicación por encima de la velocidad de infiltración básica; pese a que al inicio toda el agua aplicada se infiltra en el suelo, a medida que pasa el tiempo, la tasa de infiltración disminuye hasta ser menor que la tasa de aplicación, momento a partir del cual se produce encharcamiento o escorrentía.

En este contexto, la evaluación de la infiltrabilidad del suelo es esencial para el diseño de sistemas de riego por aspersión. Al respecto, Savva y Frenken (2001) indican que la selección del aspersor correcto depende de cómo el espaciado más adecuado, con una cierta presión y tamaño de boquilla, puede proporcionar una tasa de aplicación de agua inferior a la velocidad de infiltración básica del suelo, tal que no cause escorrentía, ni

dañe el cultivo y con la mejor uniformidad posible, bajo las condiciones de viento predominantes. Por su parte, Hoffman *et al.* (2007) sostienen que los sistemas de aspersión generalmente se diseñan para aplicar agua a una tasa menor que la velocidad de infiltración básica del suelo, de modo que la cantidad de agua infiltrada en cualquier punto dependa solamente de la tasa y el tiempo de aplicación, y no de la infiltrabilidad del suelo.

El *Gobierno Autónomo Municipal de Cliza* (GAM), encara los últimos años un proceso de modernización de los sistemas tradicionales de riego por superficie, hacia sistemas de riego por aspersión. Sin embargo, en la actualidad salvo contadas iniciativas individuales, ninguno de los sistemas funciona plenamente como tal. Entre los factores limitantes de la adopción tecnológica, mencionados por los agricultores, la baja infiltrabilidad del suelo resalta como uno de los factores principales. En este sentido, el presente estudio analiza de qué manera la infiltrabilidad del suelo condiciona el diseño y manejo del riego por aspersión a nivel parcelario, a partir de la evaluación de la infiltrabilidad de los suelos del municipio de Cliza.

Materiales y métodos

El estudio comprende el municipio de Cliza, localizado en la provincia Germán Jordán, en la zona central de la subregión del Valle Alto del departamento de Cochabamba. Comprende una superficie total de 68.15 km² y tiene una altitud que varía de 2700 a 3000 msnm (GAM Cliza 2016). De acuerdo a datos de la estación climatológica San Benito, el municipio tiene un clima semiárido, con una precipitación media de 400 mm/año y una temperatura media de 15°C. Fisió-

gráficamente, la zona constituye un valle aluvial, con llanuras de pie de monte, cuyas pendientes varían entre 2% a 5%.

Los suelos son de origen aluvial y se caracterizan por ser profundos, con texturas medias a finas. La producción agropecuaria es la principal actividad económica de la población. Considerando la escasa y variable precipitación pluvial, la producción agrícola depende del agua de riego, siendo el agua subterránea la fuente más importante, debido a su disponibilidad casi constante a lo largo del año.

La estrategia metodológica comprendió las siguientes etapas de trabajo:

a) Mapeo y caracterización de suelos: El mapeo de suelos se realizó sobre la base del mapa de clasificación de suelos a nivel general del Valle Alto (Soto 1991), identificando 7 unidades de suelo en el municipio de Cliza. Con el propósito de verificar la delimitación y completar la caracterización de las unidades de suelo se realizaron 37 barrenadas de inspección siguiendo líneas transversales, y se describieron 5 perfiles de suelo.

b) Evaluación de la infiltrabilidad del suelo: La evaluación de la infiltrabilidad del suelo se realizó en 22 parcelas de observación distribuidas en las 7 unidades de suelo identificadas. Inicialmente, se tomaron muestras de suelo de la capa superficial (30 cm) en cada parcela, determinando en laboratorio la textura (*Bouyucos*) y densidad aparente (anilla). Posteriormente, en cada parcela se realizaron dos pruebas de infiltración por el método del doble anillo, con una duración de 5-6 horas.

El análisis de los datos se realizó ajustando los valores medidos al modelo de Kostikov (1932):

$$I_c = A t^B$$

Ic = Infiltración acumulada (mm)

t = Tiempo (min)

A = Coeficiente que expresa el valor de Ic cuando t=1, y las condiciones estructurales del suelo

B = Coeficiente de estabilidad estructural del suelo, 0<B<1

A partir de los valores de los coeficientes A y B de la ecuación de la infiltración acumulada (Ic), se determinó la ecuación de velocidad de infiltración instantánea:

$$I = a t^b$$

I = Velocidad de infiltración instantánea (mm/h)

t = Tiempo (min)

a = A*B*60

b = B-1; -1<b<0

Finalmente, se calculó la infiltración básica de manera analítica aplicando las siguientes ecuaciones:

$$t_b = 600 * b$$

(tiempo de infiltración básica en minutos)

$$I_b = a (600 b)^b$$

Infiltración básica (mm/h)

El análisis se realizó inicialmente a nivel de las parcelas de observación, determinando curvas de infiltración para cada parcela. Posteriormente, se unieron los datos a nivel de unidad de suelo, determinando curvas de infiltración y valores de velocidad de infiltración básica para cada unidad de suelo, lo cual permitió clasificar las unidades de suelo de acuerdo a su infiltrabilidad aplicando los valores del Cuadro 1. Finalmente se unieron los datos por clases de infiltrabilidad, determinando curvas de infiltración y valores de velocidad de infiltración básica para cada tipo de infiltrabilidad.

Cuadro 1. Clasificación de la infiltrabilidad de acuerdo a la velocidad de infiltración básica

Infiltrabilidad	Velocidad de infiltración básica (mm/h)
Muy rápida	>508
Rápida	152.40 – 508.00
Moderadamente rápida	50.80 -152.40
Moderada	15.24 -50.80
Moderadamente lenta	5.08 -15.24
Lenta	1.52 -5.08
Muy lenta	0.038 - 1.52
Impermeable	<0.038

Fuente: USDA (2001)

c) Análisis de la infiltrabilidad en relación el diseño y manejo de sistemas de riego por aspersion: Considerando que la velocidad de infiltración básica constituye un dato básico de entrada para el diseño del riego parcelario, se realizó un análisis comparativo entre los diferentes tipos de infiltrabilidad, en relación con parámetros de diseño (tipo de aspersor y disposición de aspersores) y manejo (tiempo de riego).

Resultados y discusión

CLASIFICACIÓN DE SUELOS POR SU INFILTRABILIDAD

De acuerdo a la clasificación de infiltrabilidad propuesto por USDA (2001), y considerando los valores de velocidad de infiltración básica determinados, los suelos del municipio de Cliza corresponden a tres clases de infiltrabilidad: moderada, moderadamente lenta y lenta.

La Figura 1 muestra las curvas de velocidad de infiltración instantánea determinadas para cada parcela de observación. Se observa que todas las curvas tienen un comportamiento similar al inicio, pero que se van diferenciando con el transcurso del tiempo, hasta alcanzar la velocidad de infiltración básica y diferenciarse en las tres clases de infiltrabilidad.

Relacionando las curvas de infiltración de las parcelas de observación con las unidades de suelo, se logró clasificar los suelos del municipio de Cliza de acuerdo a su infiltrabilidad (Figura 2). La mayor parte del municipio corresponde a suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta (62.4%), seguido de los suelos de infiltrabilidad moderada (21.3%) y los suelos de infiltrabilidad lenta (16.3%).

Los suelos de infiltrabilidad lenta se ubican en la zona norte del municipio, mientras que los suelos de infiltrabilidad moderada corresponden a suelos localizados en cercanías de los ríos, y los suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta están distribuidos en el resto del municipio.

a) Suelos de infiltrabilidad moderada.

Los suelos de infiltrabilidad moderada ocupan un total de 1203.8 ha, correspondiendo al 21.3% de la superficie total del municipio. Son suelos de textura moderadamente fina a media, con presencia de limo. Tal como se muestra en el cuadro 2, los valores de velocidad de infiltración básica (I_b) medidos en las parcelas de observación varían de 15.49 a 24.82 mm/h, siendo 20 mm/h el valor de la velocidad de infiltración básica de la curva representativa.

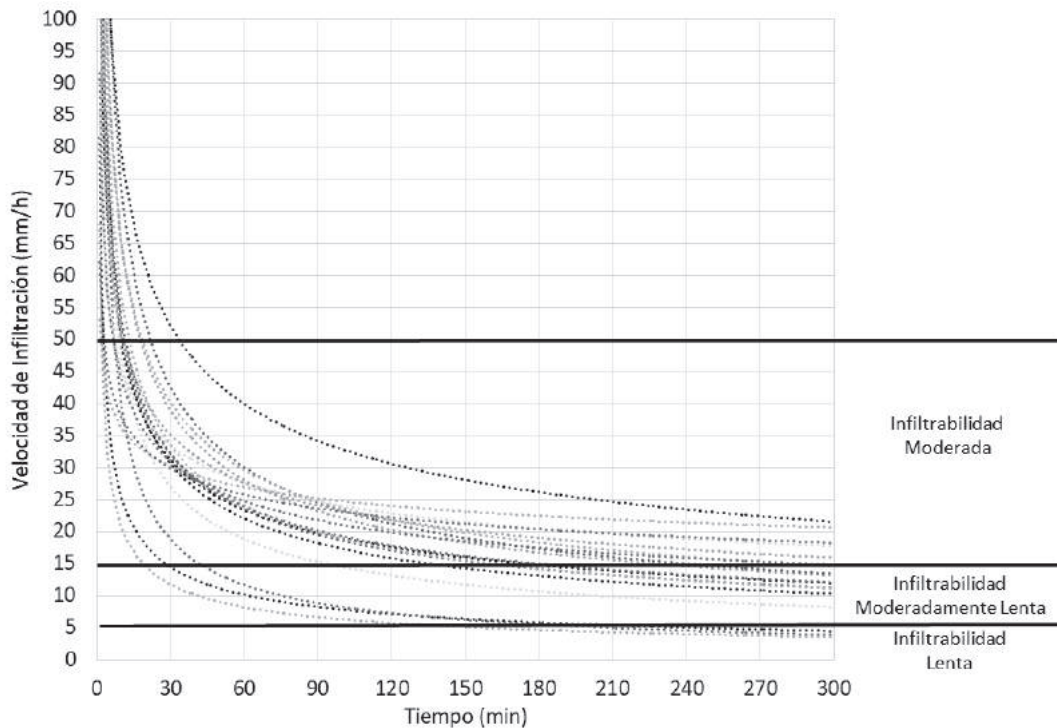


Figura 1. Curvas de velocidad de infiltración instantánea por parcela de observación

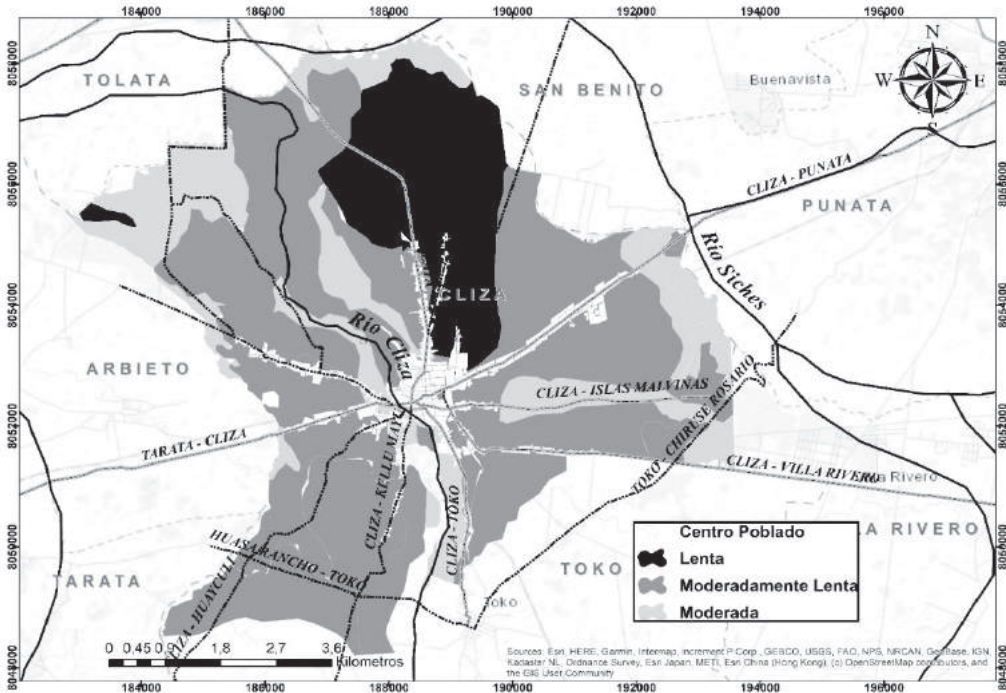


Figura 2. Mapa de clasificación de suelos por su infiltrabilidad

Considerando la ecuación de velocidad de infiltración de la curva representativa, la velocidad de infiltración básica se alcanza en un tiempo (t_b) de 190 min. La alta variabilidad de t_b en las curvas de las parcelas de observación denota la variabilidad de las condiciones estructurales y de la humedad del suelo al momento de realizar las pruebas de campo.

b) Suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta. Los suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta ocupan un total de 3524.8 ha, correspondiendo al 62.4% de la superficie total del municipio. Son suelos de textura moderadamente fina a media. Tal como se muestra en el Cuadro 2, los valores de velocidad de infiltración básica (I_b) medidos en las parcelas de observación varían de 8.12 a 13.46 mm/h, siendo 11.90 mm/h el valor de la velocidad de infiltración básica de la curva representativa, valor que se alcanza en un tiempo (t_b) de 276 min. En compa-

ración con los suelos de infiltrabilidad moderada, estos suelos presentan menor variabilidad de t_b , lo que denota condiciones más homogéneas de los suelos.

c) Suelos de infiltrabilidad lenta. Los suelos de infiltrabilidad lenta ocupan un total de 921.2 ha, correspondiendo al 16.3% de la superficie total del municipio. Son suelos de textura fina a moderadamente fina. Los valores de velocidad de infiltración básica (I_b) medidos en las parcelas de observación varían de 3.18 a 4.46 mm/h, siendo 2.91 mm/h el valor de la velocidad de infiltración básica de la curva representativa (Cuadro 2). Considerando la ecuación de velocidad de infiltración de la curva representativa, la velocidad de infiltración básica se alcanza en un tiempo (t_b) de 378 min, valor significativamente mayor en comparación con las otras dos clases de infiltrabilidad identificados.

Cuadro 2. Coeficientes de la ecuación de velocidad de infiltración y valores de infiltración básica en suelos de infiltrabilidad moderada, moderadamente lenta y lenta

	Curvas de parcelas de observación				Curva representativa				
	a	b	I_b (mm/h)	t_b (min)	a	b	Ecuación	I_b (mm/h)	t_b (min)
Moderada	178.75	- 0.439	15.49	263	105.61	-0.317	$I = 105.61 t^{-0.317}$	20	190
	91.51	- 0.319	17.15	191					
	112.20	- 0.342	18.20	205					
	85.44	- 0.275	20.94	165					
	62.01	- 0.214	21.93	128					
	191.53	- 0.383	23.88	230					
	53.10	- 0.165	24.82	99					
Moderadamente lenta	155.16	- 0.515	8.12	309	157.2	-0.460	$I = 157.2 t^{-0.460}$	11.9	276
	152.90	- 0.473	10.60	284					
	170.47	- 0.478	11.42	287					
	152.22	- 0.456	11.75	274					
	191.69	- 0.469	13.61	281					
	127.83	- 0.414	13.00	248					
	135.01	- 0.423	13.01	254					
	232.54	- 0.499	13.46	299					
Lenta	81.52	- 0.508	4.46	305	123.07	-0.631	$I = 123.07 t^{-0.631}$	2.91	378
	68.02	- 0.516	3.53	310					
	189.84	- 0.680	3.18	408					

LA INFILTRABILIDAD DEL SUELO COMO CRITERIO DE DISEÑO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

En términos del diseño del riego por aspersión, la infiltrabilidad del suelo es un factor limitante determinante para la selección del tipo de aspersor y la disposición de los aspersores en la parcela.

De acuerdo al análisis realizado, mientras menor sea la infiltrabilidad del suelo, se reducen también las opciones para la selección de aspersores. En contrapartida, mientras mayor sea la infiltrabilidad del suelo, se dispone de un mayor margen para la selección de aspersores.

En la Figura 3 se comparan las tasas de aplicación de 6 variaciones de las dos marcas de aspersores mayormente utili-

zados en el municipio de Cliza, en relación con los valores de velocidad de infiltración básica (líneas punteadas corresponden a valores extremos y línea sólida al valor representativo) de las tres clases de infiltrabilidad.

Considerando que la tasa de aplicación de los aspersores no debe sobrepasar la infiltrabilidad del suelo, se identifican restricciones en los suelos de infiltrabilidad lenta y moderadamente lenta.

En suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta, se adaptan todos los aspersores a excepción del aspersor Xcel Wobler #11, en cambio en suelos de infiltrabilidad lenta, resultan adecuados solamente los Rain bird y el Xcel Wobler #6.

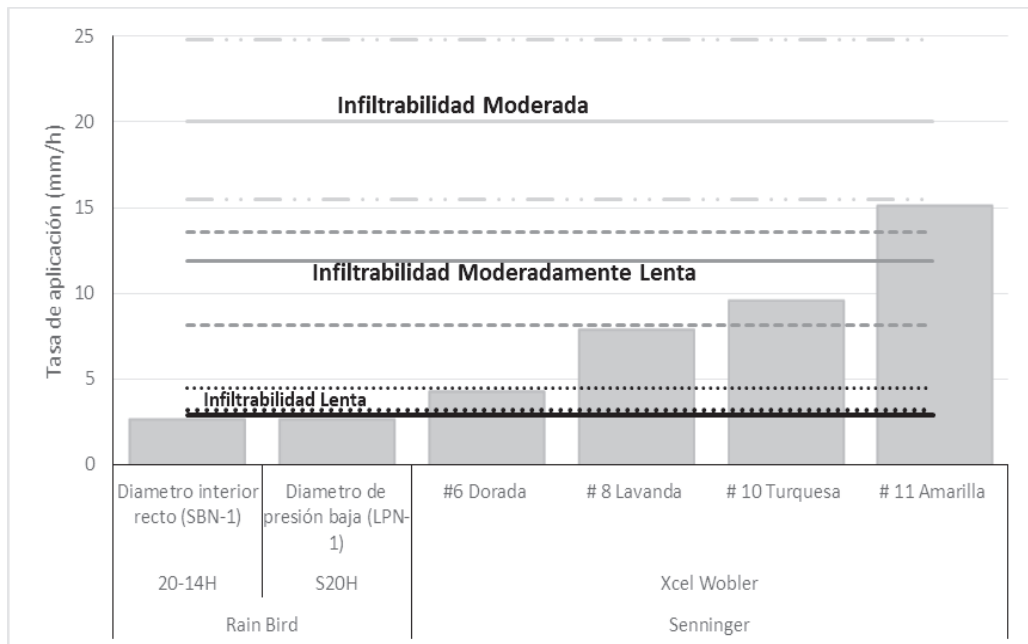


Figura 3. Comparación de la tasa de aplicación de aspersores con la infiltrabilidad de los suelos

Continuando en la misma línea de análisis, en términos de la disposición de aspersores en la parcela, se debe cuidar que la precipitación media aplicada (generada por el traslape de aspersores) a la parcela sea menor a la velocidad de infiltración básica. En este sentido, considerando una disposición con un mismo tipo de aspersor que proporciona un mismo caudal, se observa que a menor infiltrabilidad del suelo se debe incrementar la distancia entre aspersores/laterales, con el propósito de reducir el traslape y por lo tanto reducir la tasa de aplicación media, tal como se ilustra en la Figura 4.

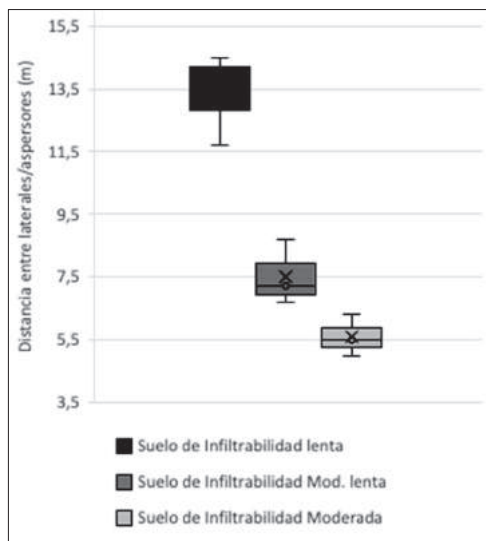


Figura 4. Variación de disposición de aspersores en la parcela en función de las clases de infiltrabilidad (aspersor Xcel Wobblers #10 Turquesa, $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$)

LA INFILTRABILIDAD DEL SUELO COMO CRITERIO DE MANEJO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN

En términos del manejo del riego por aspersión en la parcela, la infiltrabilidad del suelo es un factor determinante para la definición del tiempo de riego requeri-

do para aplicar una lámina de riego determinada. A menor infiltrabilidad, el agua ingresa al suelo con mayor lentitud, por lo que se deberá regar con una tasa de aplicación menor, llegando a requerir un mayor tiempo de riego para aplicar una lámina de riego requerida.

En el caso ilustrado en la Figura 5, se puede observar que cuanto menor es la infiltrabilidad, se incrementa el tiempo de riego. Para cubrir una lámina de 40 mm en los suelos de infiltrabilidad lenta ($I_b=2.9-4.5 \text{ mm/h}$) se pueden requerir tiempos de aplicación de 825-538 min, en cambio en suelos de infiltrabilidad moderada ($I_b=15.5-24.8 \text{ mm/h}$), esa misma lámina podría ser aplicada en apenas 155-97 min, considerando que se incrementaría la tasa de aplicación de acuerdo a la infiltrabilidad.

Conclusiones

- La infiltrabilidad del suelo es un factor determinante del diseño de riego parcelario y el manejo del riego en la parcela. En este sentido, la evaluación de la infiltrabilidad del suelo en campo constituye una tarea esencial en el proceso de diseño del riego presurizado, en la medida que la velocidad de infiltración básica es un dato de entrada para el diseño y el manejo del riego en la parcela.
- De acuerdo a los valores de velocidad de infiltración básica determinados a partir de las pruebas de campo, el municipio de Cliza se caracteriza por tener mayormente suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta (62.4%), seguidos de suelos de infiltrabilidad moderada (21.3%), y lenta (16.3%).

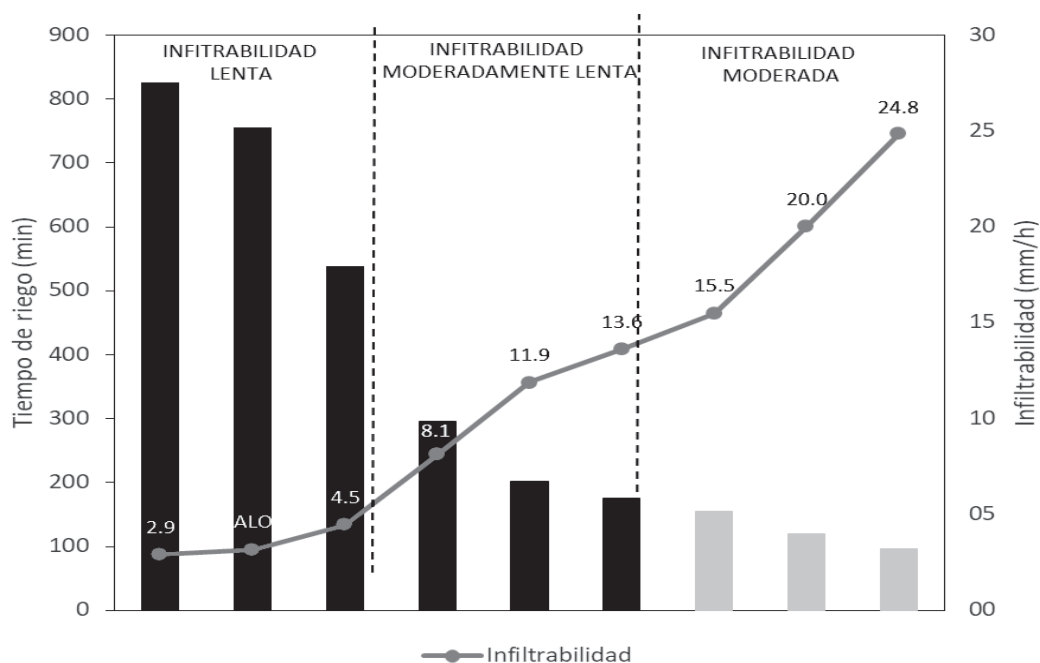


Figura 5. Variación de tiempos de riego requeridos para aplicar una lámina de 40 mm en suelos de infiltrabilidad lenta, moderadamente lenta y moderada

- Los suelos de infiltrabilidad moderada se caracterizan por tener valores de velocidad de infiltración básica entre 15.49 a 24.82 mm/h. Los suelos de infiltrabilidad moderadamente lenta presentan valores de velocidad de infiltración básica entre 8.12 a 13.46 mm/h. Los suelos de infiltrabilidad lenta presentan valores de velocidad de infiltración básica entre 3.18 a 4.46 mm/h.

- A partir del análisis realizado para el caso del municipio de Cliza, se establecieron tres criterios de diseño y manejo del riego presurizado en parcela a partir de la evaluación de la infiltrabilidad:

(a) mientras menor sea la infiltrabilidad del suelo, la selección de aspersores se limita a aspersores de menor capacidad, limitando de esta manera las opciones de selección

(b) a menor infiltrabilidad del suelo se debe incrementar la distancia entre aspersores/laterales, con el propósito de reducir el traslape y por lo tanto reducir la tasa de aplicación media

(c) a menor infiltrabilidad, el agua ingresa al suelo con mayor lentitud, por lo que se deberá regar con una tasa de aplicación menor, llegando a requerir un mayor tiempo de riego para aplicar una lámina de riego requerida.

Referencias citadas

- Bloem A., Laker M. 1994. Criteria for adaptation of the design and management of centre-pivot irrigation systems to the infiltrability of soils. *Water SA*. 20(2): 127-132.
- GAM Cliza. 2016. Plan Territorial de Desarrollo Integral 2016-2020 del Municipio de Cliza. Cliza, Bolivia: GAM Cliza. 377 p.

- Gencoglan C., Gencoglan S., Merdun H., Ucan K. 2005. Determination of ponding time and number of on-off cycles for sprinkler irrigation applications. *Agricultural Water Management*. 72(1): 47-58.
- Gurovich L. 1985). *Fundamentos y diseño de sistemas de riego*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 433 p.
- Hillel D. 1971. *Soil and water: Physical principles and processes*. New York: Academic Press. 304 p.
- Hillel D. 1998. *Environmental Soil Physics*. San Diego, USA: Academic Press. 771 p.
- Hoffman G., Evans R., Jensen M., Martin D., Elliot R. 2007. *Design and operation of farm irrigation systems* (2nd ed.). Miami, USA: ASABE. 850 p.
- Kostiakov A. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. *Trans. Com. Int. Soc. Soil Sci., Part A*, 17-21.
- Savva A., Frenken K. 2001. *Sprinkler irrigation systems: planning, design, operation and maintenance* (Vol. 3). Harare, Zimbabwe: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 80 p.
- Soto C. 1991. *Estudio de clasificación a nivel general de suelos y tierras con fines de capacidad de uso y salinidad del Valle Alto (Parte plana)*. Gerencia de Planificación y Coordinación. Corporación Regional de Desarrollo de Cochabamba. Cochabamba, Bolivia. 355 p.
- USDA. 1991. Chapter 1: Soil-plant-water relationships. *National Engineering Handbook, Section 15 Irrigation: United States Department of Agriculture*. Soil Conservation Service. 56 p.
- USDA. 2001. *Soil quality test kit guide*. Washington, USA: United States Department of Agriculture (USDA). 82 p.
- Vásquez A., Vásquez I., Vásquez C., Cañamero M. 2017. *Fundamentos de ingeniería de riegos*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. 438 p.

Trabajo recibido el 18 de diciembre de 2019 - Trabajo aceptado el 20 de diciembre de 2019