

PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO PARA IMPLEMENTAR SISTEMAS DE RIEGO EN MEDIO SEMIÁRIDO (CENTRO RIVERA – ALTIPLANO CENTRAL BOLIVIANO)

Soil Hydrophysical properties for the implementation of irrigation systems in a semiarid zone (Centro Rivera - Central Bolivian Highlands)

Roxana Copa Bobarin¹, Roberto Miranda Casas²

RESUMEN

Las zonas de clima semiárido tienen baja disponibilidad de agua, cuantificada a base de la precipitación media anual, en relación con la evapotranspiración. Los suelos acumulan sales solubles cuya distribución, composición y concentración dependen de las características y flujo de agua en el perfil. En el presente trabajo se evalúa las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo en cuatro puntos de muestreo de la comunidad Centro Rivera, en parcelas con cultivo de alfalfa bajo riego. El cultivo de la alfalfa (*Medicago sativa*) es irrigado con aguas del río Desaguadero, estas aguas son caracterizadas como aguas altamente salinas, principalmente en época seca. Las propiedades del suelo, tanto físicas como hidroquímicas, son afectadas por la calidad del agua de riego y el clima. El elevado contenido de sedimentos del agua (555 mg.l⁻¹) favorece la formación de horizontes superficiales con mayor contenido de partículas finas, limo y arcilla, aportando más de 700kg ha⁻¹ de sedimentos por año, lo que ocasiona menor densidad aparente, bajas tasas de velocidad de infiltración y dificultad en el movimiento del agua, resultando en la permeabilidad lenta a moderadamente lenta a través del perfil del suelo. Los suelos son salinos debido a las altas tasas de evapotranspiración (>1500mm año⁻¹) y bajas precipitaciones (<400mm año⁻¹) en esta región. Asimismo, la retención de agua del suelo es afectada por la salinidad.

Palabras-clave: Física del suelo, Química del suelo, Hidráulica del suelo, Capacidad de Retención de Agua del suelo, Salinidad.

ABSTRACT

Semiarid zones have low water availability, quantified in base of the average annual rainfall related to

evaporation. Soluble salts accumulate in soils and the distribution, composition and concentration depends on the soil profile characteristics and water flow. In this work, the physical, chemical and hydraulic soil properties were evaluated in four sampling points in the Centro Rivera community in alfalfa irrigated plots. The results show that mainly in the dry season, soils are irrigated with water from the Desaguadero river, characterized as highly saline waters. Soil properties, both physical and hydrochemical are affected by irrigation water quality and climate. The high sediment content of water (555 mg.l⁻¹) promotes the formation of surface horizons with higher content of fine particles, silt and clay, providing more than 700 kg.ha⁻¹ of sediment per year. This causes lower values of bulk density, low infiltration rate and difficulty for water percolation, resulting in slow to moderately slow permeability through the soil profile. Soils are classified as saline, process favored by high evapotranspiration rates (E_{To}>1500 mm.yr⁻¹) and low rainfall (<400 mm.yr⁻¹) in this region. The water holding capacity of the soil is also strongly affected by the soil salinity.

Key words: Soil physics, soil chemistry, soil hydraulics, water retention capacity of the soil, Salinity.

INTRODUCCIÓN

El uso y manejo que se hace del suelo provoca con gran frecuencia una alteración tan profunda de sus propiedades que determina una pérdida gradual de su capacidad productiva, de su fertilidad, de sus posibilidades de uso y aprovechamiento y, en ocasiones hasta la pérdida del suelo mismo como elemento fundamental del medio natural (Hernández et al., 2010). Si bien causas naturales aceleran o provocan la pérdida de calidad, son sobre todo las actividades humanas las que ejercen en la actualidad

¹ Maestrante del Programa de Riegos de la Facultad de Agronomía – Universidad Mayor de San Andrés.

² Docente Investigador de la Facultad de Agronomía – Universidad Mayor de San Andrés.

una influencia más acentuada en la degradación del suelo (Hernández et al., 2010). Entre ellas cabe señalar las transformaciones en regadío, de suelos productivos, sin evaluación previa del riesgo de salinización y/o sodificación. La dinámica del agua en el suelo está regida por los parámetros hidrodinámicos, físicos y químicos del mismo (Cely, 2010; Nasner y Rojas, 2010).

En el riego, la textura es un parámetro fundamental del cual depende en alto grado el comportamiento hidrodinámico del suelo, juega un papel fundamental en el cálculo de láminas de riego, de lavado de sales y en el diseño de sistemas de riego, especialmente en regiones con escasas precipitaciones como las zonas semiáridas (Santoni, 2004), así en suelos, resultado de procesos de formación lacustre y fluvioacustre (como los suelos del Altiplano Central Boliviano) se dificulta el lavado de sales por su baja permeabilidad y movimiento descendente del agua (Ledezma, 1995). La incorporación de sistema de riego ha permitido una mayor producción, en varias zonas del Altiplano Central, además de la mitigación de los daños ocasionados por factores climáticos; en contraste se ha evidenciado una cierta acumulación paulatina de sales en estos suelos, además del aumento de la conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable, principalmente en parcelas con más años de riego (Orsag y Miranda, 2000). Son bien conocidos los efectos negativos sobre las propiedades del suelo que provocan las sales cuando alcanzan determinadas concentraciones en el mismo, apareciendo las actividades agrícolas como la causa más importante (Hernández et al., 2010).

Se han inventariado más de 5.700 sistemas de riego implementados en Bolivia, todos ellos autogestionarios, que riegan más de 317.000 hectáreas beneficiando a unas 290.000 familias (Gandarillas y Montaña, 2013). Sin embargo, es necesario establecer especificaciones técnicas para la recuperación y manejo de uso de suelos, del agua de riego en zonas semiáridas y de esta forma mitigar los riesgos de erosión de suelos ocasionados por la implementación de sistemas de riego y hacerlos sostenibles. Se plantea en este trabajo, evaluar las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo y el efecto de la calidad del agua de riego para la implementación o mejoramiento de sistemas de riego en un área situada a orillas del río Desaguadero del Altiplano Central-Bolivia.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio, Centro Rivera, de aproximadamente 20km² de superficie, se encuentra situada en el límite noreste de la provincia Gualberto Villarroel al sur del departamento de La Paz, a orillas del río Desaguadero y encuadrada por los meridianos 67°40' y 67°42' de longitud Oeste y los paralelos 17°33' y 17°35' de latitud Sur, a una altura media de 3800 msnm. Presenta un clima semiárido y frío con valores medios anuales de Temperatura de 9°C y 400mm anuales de precipitación que se ve superada por la evapotranspiración que llega a 1500 mm anuales, con el consiguiente déficit hídrico, en parte compensado mediante riego. Las aguas superficiales que abastece al sistema de riego del área de estudio provienen del río Desaguadero cuyas aguas son caracterizadas por altos contenidos de sedimentos totales y sales solubles, incrementándose de Norte a Sur.

Fueron analizadas 16 muestras del perfil del suelo a 0-15, 15-30, 30-50 y 50-70cm de profundidad, con tres repeticiones, cada una, tomadas en parcelas con cultivos de alfalfa bajo riego de cuatro puntos de muestreo (P-1, P-2, P-3 y P-4) (Figura 1),asimismo se obtuvieron muestras en cilindros de volumen conocido y bolsas plásticas durante los meses de Julio y Agosto del 2013 para las determinaciones físicas, químicas e hidrodinámicas.

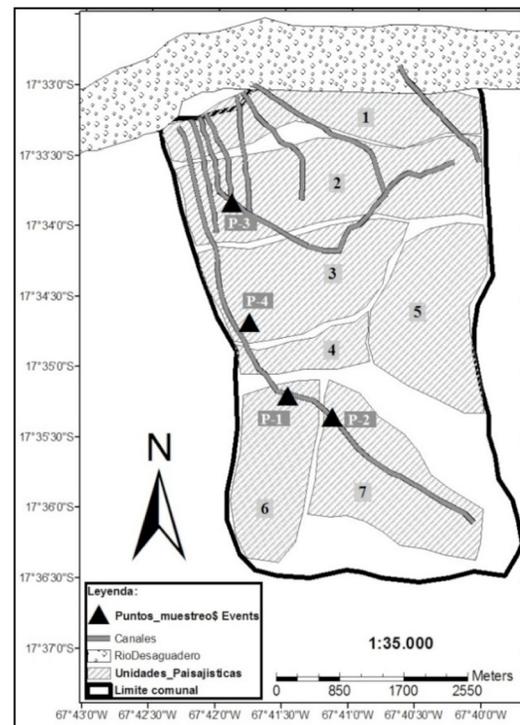


Figura 1. Distribución de los puntos de muestreo de suelos en la comunidad Centro Rivera del Altiplano Central Boliviano.

La caracterización analítica de las muestras fue realizado con los siguientes métodos: Textura (Gee y Bauder, 1986), Densidad Aparente, DA, (Gabriels y Lobo, 2011), pH y Conductividad Eléctrica (CE) en suspensiones suelo-agua 1:5 (Andrades, 2012), cationes solubles e intercambiables (Absorción y emisión atómica) (Watanabe y Olsen, 1965), Conductividad Hidráulica Saturada (Ks) y Velocidad de Infiltración Básica (Ib) (Gabriels et al., 2006), y Capacidad de Retención de Agua (Programa de pedotransferencia SPAW HIDROLOGY). La conductividad eléctrica del extracto de saturación fue calculada con la siguiente expresión (Andrades, 2012): $CE_e = 7,31 \times CE_{(1:5)} - 0,568$; donde: CE_e (conductividad eléctrica del extracto de saturación), $CE_{(1:5)}$ (conductividad eléctrica en suspensión suelo-agua 1 a 5).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para la textura y densidad aparente muestran que se trata de suelos con textura fina o pesada por el mayor porcentaje de partículas finas (arcilla y limo, desde 67% hasta 96% en los horizontes superficiales del perfil de suelo, representados por bajos valores de densidad aparente (Tabla 1) y su incremento en los horizontes inferiores a partir de los 30cm de profundidad, por el mayor contenido de partículas de arena. Como resulta lógico esperar en suelos resultado de los procesos de formación lacustre y fluviolacustre (Ledezma y Flores, 1995).

Tabla 1. Valor promedio de la granulometría y densidad aparente de las muestras estudiadas y la clase textural, en la comunidad de Centro Rivera.

Prof. (cm)	Porcentaje			DA gr cm ⁻³
	Arcilla	Limo	Arena	
00-15	40,60±9,55	42,28±8,34	17,12±10,17	1,41±0,11
15-30	33,55±19,80	52,29±13,62	14,14±10,78	1,50±0,10
30-50	22,81±15,32	45,77±19,96	31,42±16,61	1,48±0,08
50-70	24,86±10,61	35,08±18,63	40,06±22,17	1,55±0,15

DA: Densidad Aparente

Los pobladores de estas regiones, riegan sus cultivos de alfalfa, por más de 20 años con aguas del río Desaguadero. Este cuerpo de agua superficial, presenta hasta 555 mg l⁻¹ de sedimentos (PNUMA, 2011), los cuales se van depositando en la superficie del suelo, llegando a alcanzar valores de

aproximadamente de 700 kg ha⁻¹ en un ciclo agrícola de riego. Por otro lado, la zona presenta vientos que pueden llegar hasta 15 km hr⁻¹, lo que la hace muy susceptible a la erosión eólica, estos datos son corroborados por estudios realizados por Ledezma y Flores (1995).

Tabla 2. Valor promedio de las propiedades químicas de las muestras estudiadas, en la comunidad de Centro Rivera.

Parámetro	Prof. (cm)	Media	Mínimo	Máximo	SD
pH	0-15	7,47	6,89	8,1	0,63
	15-30	8,41	7,84	9,31	0,63
	30-50	8,24	7,57	9,35	0,77
	50-70	8,46	7,59	9,42	0,88
CE 1:5 (dS m ⁻¹)	0-15	1,24	0,52	3,03	1,20
	15-30	1,03	0,40	2,00	0,74
	30-50	0,72	0,13	1,15	0,44
	50-70	0,69	0,11	1,65	0,67

CEe (dS m ⁻¹)	0-15	8,55	3,27	21,74	8,82
	15-30	7,01	2,36	14,13	5,43
	30-50	4,70	0,41	7,89	3,26
	50-70	4,50	0,24	11,55	4,90
RAS (meq kg ⁻¹)	0-15	4,57	3,27	6,51	1,52
	15-30	4,57	3,27	6,51	1,52
	30-50	11,61	3,07	25,87	9,94
	50-70	11,61	3,07	25,87	9,94
PSI (%)	0-15	10,91	3,08	20,41	8,84
	15-30	10,91	3,08	20,41	8,84
	30-50	7,40	4,17	14,56	4,90
	50-70	7,40	4,17	14,56	4,90

CE: Conductividad eléctrica; **RAS:** Relación de adsorción de sodio; **PSI:** Porcentaje de sodio intercambiable; **SD:** Desvío estándar.

Asimismo, se aprecian variaciones en los valores de las propiedades químicas, principalmente en la Conductividad Eléctrica (CE), Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), a lo largo del perfil del suelo (Tabla 2). Los valores del pH, se encuentran por encima de 7,5 lo que demuestran alcalinidad.

El material original, de distinta naturaleza, es en gran parte caliza, siendo el CaCO₃ un constituyente habitual en estos suelos, la presencia de sales solubles en el agua de riego, cuyas aguas se categorizan como C3S1 y C4S1, incorporados por acción del mal riego aplicado, ya que la salinidad del suelo es proporcional a la concentración de sales del agua de riego (Medeiros et al., 2010); y las altas tasas de evapotranspiración, provocan una intensa salinización del suelo consecuencia del deficiente lavado de sales a los horizontes inferiores del suelo y por el ascenso capilar de las sales de las aguas subterráneas hacia la superficie del suelo este ascenso capilar se debe, a la presencia de la textura fina en la superficie del suelo.

Es de señalar, por otra parte, el elevado valor medio que alcanza la Conductividad Eléctrica del extracto de saturación del conjunto de las muestras en los horizontes superficiales, poniendo de manifiesto la presencia de las sales solubles en diferentes concentraciones en el área de estudio, y que los niveles de sodio intercambiable están por alcanzar valores que afectarán a la calidad del suelo. Se confirma, por tanto, un hecho observado con frecuencia en suelos dedicados a la agricultura bajo riego en zonas semiáridas como es el incremento paulatino de la concentración salina en los mismos

(Hernández et al., 2010), particularmente con determinados sistemas de riego que no permiten el lavado de sales, produciéndose en consecuencia una pérdida de calidad del suelo ligada a este uso al disminuir progresivamente las posibilidades de instalación de diversas especies vegetales a medida que aumenta la presión osmótica de la disolución del suelo (Hernández et al., 2010).

Por otro lado, en zonas con baja precipitación, la evaporación del agua deja en el suelo sales que, al no ser disueltas y redistribuidas, generan la salinización de los suelos (Mazuela, 2013). Por su parte, Oster y Schroer (1979), indican que la acumulación de sales, se debe a la repetición del ciclo humedad-sequía que origina la concentración de una gran cantidad de sales en la zona de fluctuación de agua, pero no en la de saturación, por ello la acumulación salina es máxima en la superficie.

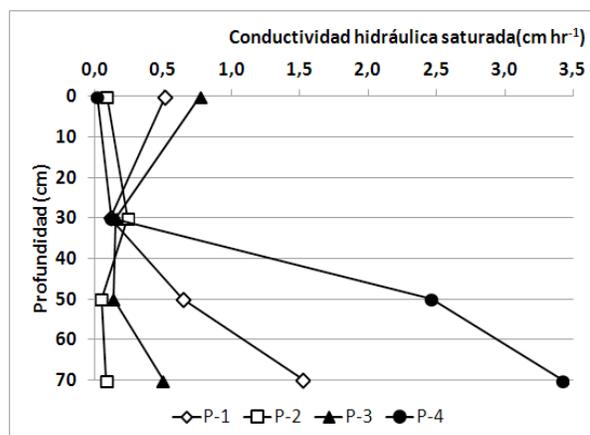


Figura 2. Conductividad hidráulica saturada del suelo en cuatro puntos de muestreo: P-1 a 3,6km, P-2 a 4,4km, P-3 a 2,3km y P-4 a 2,7km del río Desaguadero. La flecha indica la lejanía al río Desaguadero. Se indican valores medio de cada situación.

Estos valores corresponden a suelos que dado el deficiente drenaje natural (expresados por los bajos valores de conductividad hidráulica saturada, (Figura 2), manto freático poco profundo y ascenso capilar de aguas por la excesiva evaporación y escasa precipitación pluvial en estiaje, acumulan sales en la superficie a concentraciones de la solución del suelo, equivalente a una CE de $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ (Maas, 1985 citado por Sánchez et al., 2012) y que limitan un grado de restricción de uso agrícola moderado con afectaciones por disminución de la infiltración de agua del suelo (Ayers y Westcot, 1987) como se observa en estos suelos (Figura 3); fenómeno propio de una tipogénesis salino-sódica que los identifica como Solonchaks (Szabolcs, 1989).

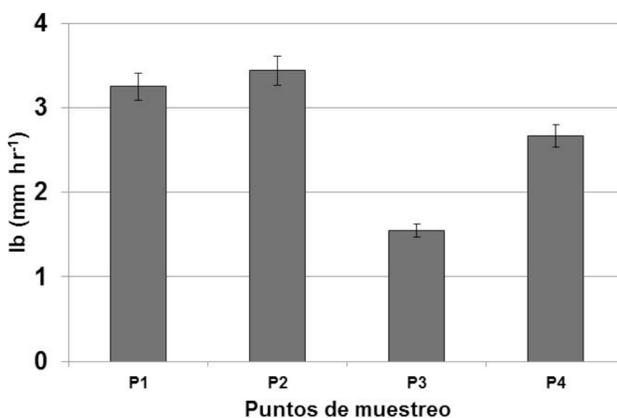


Figura 3. Velocidad de infiltración básica (Ib) del horizonte superficial del suelo en cuatro puntos de muestreo: P-1 a 3,6km, P-2 a 4,4km, P-3 a 2,3km y P-4 a 2,7km del río Desaguadero. La flecha indica la lejanía al río Desaguadero. Se indican valores medio de cada situación; las barras indican el error estándar.

Para evitar o mitigar a degradación de éstos suelos, por el incremento en la acumulación de sales, se propone aplicar láminas de lixiviación adicional a las láminas de agua requerido por el cultivo para mantener la CEE y RAS a un determinado valor o por debajo de los límites de acumulación dañina de sales. La lámina de lixiviación para estos suelos sería de 6380 mm aproximadamente, cantidades extremadamente altas e imposibles de aplicar. Por otra parte, Heuperman et al., (2002) y Ram et al., (2008) proponen la implementación de la técnica del Biodrenaje, además del lavado de sales, entendida como el proceso de extracción de agua del suelo a través del sistema radicular de las plantas, y su eliminación en forma de vapor, por medio de los procesos de evaporación y transpiración. Los mismos autores, encontraron para regiones áridas y semiáridas al Eucalipto como uno de los cultivos con alto potencial para la utilización en éste tipo de prácticas, acompañado por los cultivos

que poseen alta capacidad de extraer las sales del suelo como el atriplex (*Atriplex*) y kauchi (*Suaeda foliosa*), forrajes de alta importancia y resistentes a las condiciones climáticas extremas del altiplano.

La Conductividad Hidráulica inicial (K_{si}), indica que el espesor de 0-30cm (horizontes superficiales) acumula alta concentración de sales, que disminuye de manera abrupta, la Ks en estos horizontes, dando a los suelos características de permeabilidad muy lenta a moderadamente lenta que va de $0,02$ a $0,77 \text{ cm h}^{-1}$ (Cely, 2010), provocando el mal drenaje e impidiendo el movimiento descendente del agua y la reducción de los rendimientos de los cultivos (Navarro et al., 2008). Esta baja permeabilidad es de origen natural, debido a la textura del suelo que en parte resulta de los procesos de formación lacustre y fluviolacustre, pero, también es inducido por el hombre por la aplicación inadecuada de láminas de riego, insuficientes para el lavado de sales, y porque presenta grandes cantidades de sólidos totales y sales solubles, entre estos el ión sodio, que pasa al complejo de intercambio del suelo y que no es desplazado por dicha aguas, lo que conlleva a la destrucción de su estructura por la expansión de las arcillas y dispersión coloidal permitiendo la formación de capas endurecidas en la superficie del suelo y por ende a su deficiente conductividad hidráulica (Narokova, 1990 citado por Sánchez et al., 2012).

Por otra parte, los suelos están expuestos a altos riesgos de erosión por la pérdida de grandes cantidades de agua de riego debido a las bajas tasas de infiltración básica (Figura 3). En los horizontes superficiales del suelo. Estas bajas tasas de velocidad de infiltración básica en los suelos de Centro Rivera, en principio, están condicionadas por la Conductividad de saturación (K_s), que presenta valores bajos, a causa de las características físicas del suelo (partículas finas con presencia de arcillas hinchables como la montmorillonita, que ocasionan el sellado de la superficie del suelos, además de la presencia del sodio intercambiable que dispersa las partículas) y por las características del agua de riego de mala calidad (Porta et al., 2003), que ocasiona la disminución de la tasa de infiltración (Moreno y Moral, 1996), aunque este último no es de gravedad pero, si no se realiza un manejo adecuado del agua y suelos, podría agravarse.

Las tasas de infiltración determinadas en este estudio se encuentran dentro de los valores documentados por Oyarzún (1995), tasas de infiltración menores que 10 mm h^{-1} corresponden a suelos compactados que han sido sometidos a pastoreo y actividades agrícolas.

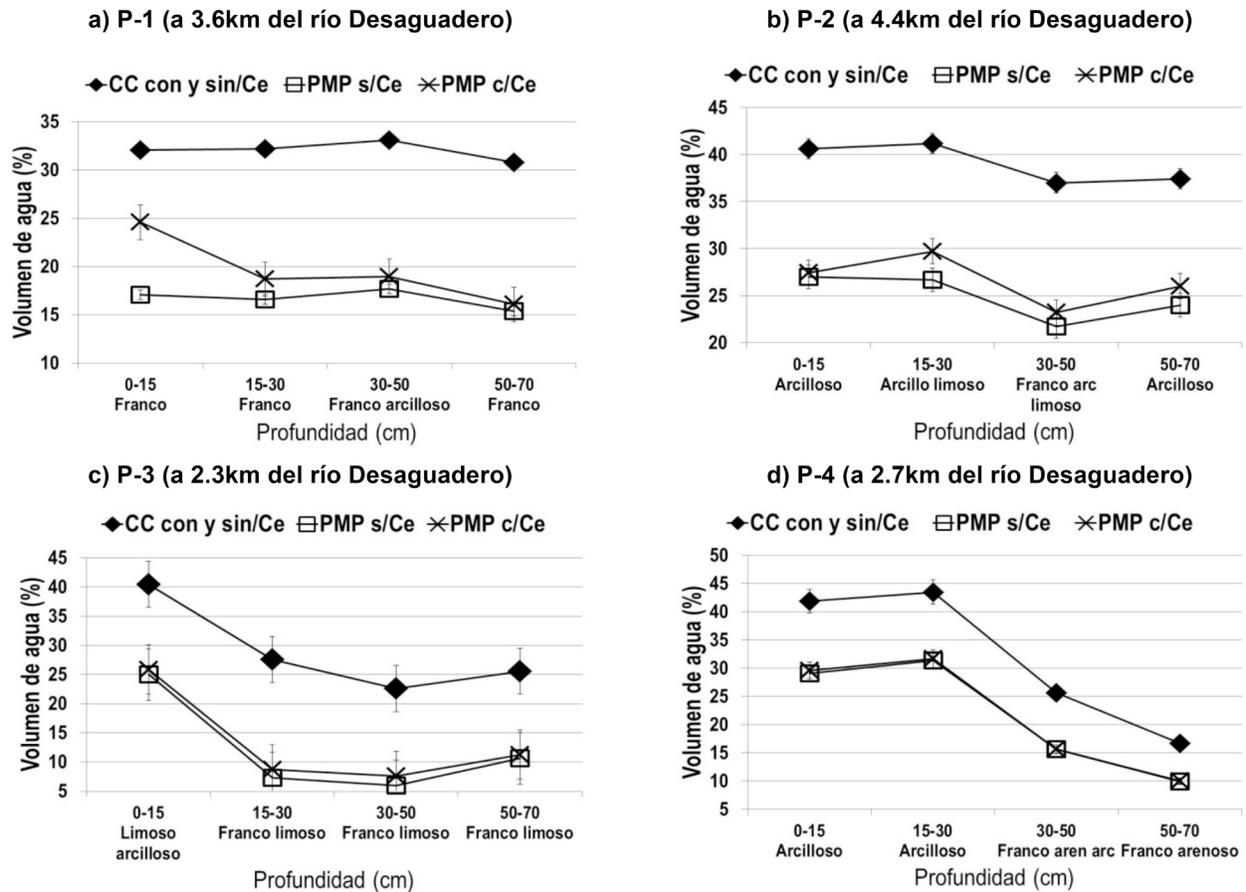


Figura 4. Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP) sin CE (s/Ce) y con Ce (c/Ce) en el perfil del suelo de los cuatro puntos de muestreo: a) P-1 a 3.6km b) P-2 a 4.4km c) P-3 a 2.3km y d) P-4 a 2.7km del río Desaguadero. Las barras indican el error estándar.

La capacidad de retención de agua disponible para la planta también está influenciada por el contenido de sales del suelo, principalmente cuando la CEE está por encima de $4,5 \text{ dS m}^{-1}$. El límite de la Capacidad de Campo (CC) se mantiene a diferentes niveles de salinidad, éste efecto se debe a que la absorción del agua a -33 kPa de presión no depende del uso del agua por la planta (Porta et al., 2003). Mientras que el límite del Punto de Marchitez Permanente (PMP) se reduce mientras mayor sea el contenido salino en el suelo, repercutiendo en la cantidad total de agua disponible retenida por el suelo para la extracción por la planta, como se observa en el horizonte superficial del punto de muestreo P-1 (Figura 4). El PMP aumenta su límite de $17,10 \%$ (sin CEE) a $24,60 \%$ (con CEE= $21,74 \text{ dS m}^{-1}$), repercutiendo también en la disminución de la capacidad total de retención de agua disponible, con una pérdida de $28,6 \text{ mm}$; y el que menor pérdida de capacidad de retención de agua disponible para la planta presenta es el punto P-4, de $2,00 \text{ mm}$, donde su CEE es menor a $4,5 \text{ dS m}^{-1}$; hasta

los 70 cm de profundidad del suelo. En concreto, el PMP y la capacidad de retención de agua, sí se ven afectados por el contenido de sales del suelo, al estar influenciados por la absorción de agua por la planta (Porta et al., 2003), y por el aumento de la presión osmótica del suelo.

Por otra parte, los puntos que mayor capacidad de retención de agua tienen son los puntos P-1 y P-3, pese a que es uno de los puntos que mayor efecto de pérdida tiene por el contenido salino; esto es, porque la capacidad de retención de agua en el suelo es dependiente del número de poros (mayor en suelos con partículas finas), de la distribución de tamaño de poros y de la superficie específica de cada suelo (Krull et al., 2004). En general, la capacidad de retención de agua de estos suelos es baja y llega a valores de $104,9 \text{ mm}$ a $163,00 \text{ mm}$, hasta los 70 cm de profundidad.

CONCLUSIONES

Las aguas de riego se categorizan como C3S1 y C4S1 entre los meses de Junio a Octubre, meses que corresponden a la época de riego de cultivos. Por otro lado, los suelos que se encuentran cerca al río Desaguadero presenten textura franco a franco arcilloso en la superficie, mientras que a mayor profundidad el contenido de arcillas disminuye.

El drenaje interno del suelo es deficiente, clasificándose como suelos con permeabilidad muy lenta a moderadamente lenta, representado por los bajos valores de conductividad hidráulica saturada ($<0.1 \text{ m.día}^{-1}$), además de las bajas tasas de infiltración; asimismo, la elevada variación entre la evapotranspiración de referencia ($>1500 \text{ mmaño}^{-1}$) y precipitación anual ($<400 \text{ mmaño}^{-1}$), resulta en un déficit hídrico.

El riego no debe ser indiscriminado con este tipo de agua, en virtud de que la Relación de Sodio Absorbido (RAS) se pueda incrementar gradualmente y junto con este el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), con consecuencias adversas para sus propiedades físicas y químicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrades, R. 2012. Prácticas de edafología y climatología. Material didáctico. Agricultura y Alimentación. Universidad de la Rioja. 72pp.
- Ayers, R., Westcot, D. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudios FAO: Riego y Drenaje. v. 29, 1-87.
- Cely, R. 2010. Determinación de parámetros de Riego para el cultivo cebolla de bulbo en el distrito de Riego del Alto Chichacoma. Tesis de Maestría. Bogotá, Colombia. Facultad de Agronomía Postgrado en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia. 109p.
- Gabriels, D., Lobo, D. 2011. Methods for determining granulometry and bulk density of the soil. 12p.
- Gabriels, D., Lobo, D., Pulido M. 2006. Methods for determining saturated and unsaturated hydraulic conductivity of the soils. 14:7-22.
- Gandarillas, H., Montaña, G. 2013. Riego Campesino Autogestionario. Presentación. Disponible en: <http://www.waterweekla.com>. Consultado el 26 de diciembre de 2013.
- Gee, G., Bauder, J. 1986. Particle-size analysis. In: American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Methods of soil analysis, part.1. Physical and mineralogical methods- Agronomy monograph, 9 (2nd. edition): 383-411.
- Hernández, J., Fernández, M., Ortuño, A., Alarcón, M. 2010. Influencia del uso del suelo en su calidad ambiental en medio semiárido (Murcia SE España). Lisboa. Rev. Ciencias Agrarias, v.33, n.1, 199-208.
- Heuperman, A., Kapoor, A., Denecke, H. 2002. Biodrenagem: Principles, experiences and applications. Rome: FAO. 79p.
- Krull, E., Skjemstad, J., Baldock, J. 2004. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Grains Research & Development Corporation report Project No CSO 00029.
- Ledezma, R. 1995. Influencia del Riego en los procesos de salinización y sodificación en suelos de la provincia Gualberto Villarroel. Tesis de grado. La Paz, Bolivia. Facultad de Agronomía – UMSA. 275p
- Ledezma, R. Flores, M. 1995. Problemática del Altiplano Central Boliviano. In: Hervé, D., Ledezma R. y Orsag, V. 2002. Limitantes y manejo de los suelos salinos y/o sódicos en el Altiplano Boliviano. 266p.
- Mazuela, P. 2013. Agricultura en zonas áridas y semiáridas. Idesia (Arica), v. 31, n.2, 2-3.
- Medeiros, P., Enio, F., Silva, F., Duarte, N. 2010. Salinidade em ambiente protegido. In: Gheyi, H.; Dias, N. da S.; Lacerda, C. 2010. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Instituto Nacional de Ciencias e Tecnologia em Salinidade. Fortaleza – CE. 500p.
- Moreno, J., Moral, M. 1996. Análisis y calidad del agua para el riego. Editorial Servicios de publicaciones Universidad Politécnica de Valencia, España.

- Nasner, F., Rojas, P. 2010. Determinación de los parámetros del modelo de Brooks & Corey mediante el método de infiltración horizontal utilizando vinaza. Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional de Colombia. AA 237. Palmira Valle.
- Navarro, B., Figueroa, S., Martínez, M., González, C., Osuna, C. 2008. Soil physical indicators under conservation tillage and their relationship with yield of three crops. *Agric. Téc. México*, v. 34, n.2, 151:158.
- Orsag, V., Miranda, R. 2000. Evaluación del Impacto de Riego con Aguas del Río Desaguadero sobre la Salinización, Sodificación y Acumulación de Metales Pesados en Suelos y Vegetación. Informe Principal. ALT. La Paz, Bolivia.
- Oster, J., Schroer, W. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43, 444-447.
- Oyarzún, CE. 1995. Land use, hydrologic properties, and soil erodibilities in the Bío river basin, central Chile. *Mountain Research and Development* 15 (4): 331-338.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2011. Perspectivas del Medio Ambiente en el Sistema Hídrico. La Paz-Bolivia. 150p.
- Porta, C., López-Acevedo, R. Roquero, de L. C. 2003. *Edafología Para la agricultura y el medio ambiente*. 3ra. Edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid-España. 941p.
- Ram, J., Dagar, J., Singh, G., Lal, K., Tanwar, V., Shoeran, S., Kaledhonkar, M., Dar, S., Kumar, M. 2008. *Biodrainage: Eco-Friendly Technique for Combating Waterlogging & Salinity*. Karnal: Central Soil Salinity Research Institute. 24pp.
- Sánchez, E., Ortega, H., Sandoval, G., Hernández, V., Estrada, C. 2012. Lavado de sales en suelos aluviales costeros de Oaxaca, México con agua residuales municipales tratadas. *Rev. Int. Contaminación Ambiental*, v. 28, n. 4, 343-360.
- Santoni, C. 2004. Circulación vertical del agua y su relación con la vegetación en zonas áridas y semiáridas. Tesis de doctorado. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Postgrado en Ciencias Agropecuarias. 134p.
- Szabolcs, I. 1989. *Salt affected soils*. CRC Press. Boca Raton, Florida, EUA. 101pp.
- Watanabe, F., Olsen, S. 1965. Test of ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *SoilSci. Soc. Am. Proc.*, v.29: 677-678.