

RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS DE DIFERENTES TAMAÑOS UBICADAS EN LA PAMPA SERRANA Y EN LA PAMPA ONDULADA

MARÍA GUADALUPE ARES^{1,3}; CELIO IGNACIO CHAGAS^{2*} & MARCELO VARNI³

Recibido: 07-11-13

Recibido con revisiones: 03-03-14

Aceptado: 18-03-14

RESUMEN

Se analizaron dos sistemas hidrológicos aforados bajo uso agropecuario pertenecientes a la Pampa Serrana (PS) y a la Pampa Ondulada (PO), respectivamente. En la PS, se analizó el escurrimiento superficial de una cuenca de 116,3 km², perteneciente al arroyo Videla (partido de Azul), y de una microcuenca primaria de 5,6 km² ubicada en sus nacientes. Los registros de escurrimiento se compararon con los de una subcuenca de 409 km² de PO perteneciente al Arroyo del Tala (partido de San Pedro) y de una microcuenca primaria de 3 km² incluida en dicho sistema hidrológico. Los suelos dominantes en la cuenca del partido de Azul son Argiudoles típicos de alta capacidad de infiltración, alto contenido de materia orgánica y elevada estabilidad estructural. En la cuenca de San Pedro predominan los Argiudoles vérticos (principalmente en la microcuenca), de moderada capacidad infiltración y se destaca la geomorfología particular de su cuenca alta, caracterizada por la existencia de un extenso plano aluvial con presencia de abundantes cubetas y suelos con diverso grado de hidrohalomorfismo. A partir de los registros de lluvias y escurrimientos, se obtuvieron valores de número de curva (CN). La microcuenca de la PS mostró una elevada capacidad de infiltración reflejada en CN cercanos a 62, mientras que la de PO arrojó valores cercanos a 82. Los resultados obtenidos con los ensayos con lluvia simulada acompañaron la tendencia de valores de CN, confirmando las excelentes condiciones estructurales de los suelos de la PS. Los valores de CN de la cuenca de PS resultaron ligeramente más bajos que los de su microcuenca. Por el contrario, los CN de la cuenca de PO fueron sensiblemente inferiores a los de su microcuenca. Esta disparidad observada en la cuenca de la PO podría deberse a las particulares condiciones geomorfológicas que caracterizan las nacientes de la cuenca estudiada.

Palabras clave. Microcuenca; escurrimiento; lluvia simulada; siembra directa.

HYDROLOGICAL RESPONSE OF BASINS AND WATERSHEDS FROM THE HILLY AND THE ROLLING PAMPA

ABSTRACT

Two hydrological systems devoted to agriculture, belonging to the Hilly as well as to the Rolling Pampas were analyzed. Regarding the Hilly Pampa (Azul County), the runoff from a 116.3 km² basin belonging to the Videla stream, and also from a small watershed of 5.6 km² located in the basin's head, were analyzed. Regarding the Rolling Pampa (San Pedro County), the surface runoff from a 409 km² basin and a small watershed of 3 km², both belonging to the Tala river, were monitored. The dominant soils in Azul are Typic Argiudolls with high infiltration capacity; high organic matter content and aggregate stability. The dominant soils in San Pedro are Vertic Argiudolls (particularly in the small watershed) with moderate infiltration capacity. Along this basin's head there are particular geomorphic conditions corresponding to a large floodplain with many depressions and hydromorphic and sodic soils. Employing rainfall/runoff data actual CN values were obtained. The watershed from the Hilly Pampa showed a high infiltration capacity reflected in CN values of about 62, whereas the Rolling Pampa's watershed had values of about 82. The results from the experiments using simulated rainfall were in accordance with the CN values, showing the excellent aggregate and structural conditions of the soils in the Hilly Pampa. By comparing the hydrological response from both basins it was evident that CN values from Hilly Pampa's basin were slightly smaller than its respective small watershed. On the contrary, CN values from the Rolling Pampa's basin were considerably smaller than its respective watershed. This difference in the Rolling Pampa can be ascribed to the particular geomorphic conditions that are present in the head of the studied basin.

Key words. Small watersheds; runoff; simulated rainfall; direct sowing.

1 Becaria CONICET. 2 Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Avenida San Martín 4453 (1417) CABA. Rep. Argentina 3 Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr Eduardo J Usunoff". Calle República de Italia 780 (7300) Azul, Pcia de Buenos Aires, Rep Argentina.

* Autor de contacto: chagas@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

Los registros de escurrimientos superficiales a nivel de microcuencas agropecuarias aforadas en nuestro país son aún muy escasos. Esta falta de datos medidos en el terreno lleva a la estimación del escurrimiento superficial empleando diferentes metodologías sin conocer el grado de ajuste con datos de campo. Recientemente Santanatoglia *et al.* (2012) compilaron una serie de artículos referidos a este y otros temas relacionados, para una cuenca agropecuaria aforada de la Pampa Ondulada.

El método del Número de Curva (CN) (USDA SCS, 1985) es utilizado para predecir el volumen potencial de escorrentía directa para un evento de lluvia en pequeñas cuencas agrícolas, forestales y urbanas (Mishra & Singh 2003; Soulis *et al.*, 2009). Este modelo considera los principales factores que afectan la generación de escorrentía integrados en un solo parámetro: el CN (Soulis *et al.*, 2009). El Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. comenzó el desarrollo de este método a partir del trabajo de Mockus (1949) y de otros investigadores. Para ello trabajaron con la información proveniente de cerca de 200 cuencas aforadas a partir de la cual generaron tablas y criterios de estimación. Cabe destacar que el método permite predecir la respuesta de una cuenca determinada a una lluvia máxima anual con una determinada probabilidad de ocurrencia (Tedela *et al.*, 2012). Los valores de CN pueden ser obtenidos de las tablas publicadas en la Sección 4 del National Engineering Handbook (NEH-4). Sin embargo, es conveniente determinarlos a partir de datos locales de lluvias y escurrimiento (Hawkins, 1993; Van Mullem *et al.*, 2002; Jacobs & Srinivasan, 2005; Romero *et al.*, 2007). Contar con dichos valores contribuirá a reducir la incertidumbre en la calibración de los modelos de simulación de crecidas y de otros más complejos como el Agricultural Non-Point Source Pollution Model (AGNPS) (Young *et al.*, 1989, Massobrio *et al.*, 1998), o el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold *et al.*, 1998, Kraemer *et al.*, 2011) entre otros, además de proveer información necesaria para planificar el uso racional de la tierra en microcuencas agropecuarias.

Numerosos supuestos de este método han sido discutidos, como por ejemplo la magnitud de la abstracción inicial, establecida originalmente como el 20% de la capacidad máxima de retención de agua de la cuenca para una condición dada. Otro aspecto es la cuantificación de la humedad antecedente (Chagas *et al.*, 1998), más recientemente definida como "condición antecedente" donde el agua edáfica representa tan solo una parte de dicha con-

dición. En tal sentido Ares *et al.* (2012a) implementaron el método de la Curva Número (CN) del Servicio de Conservación de Suelos en una cuenca agropecuaria aforada de las Sierras de Tandilia (Bs. As.) empleando un balance hídrico calibrado para el área en estudio, y lograron mejorar la estimación del escurrimiento superficial respecto del uso tradicional de dicho método.

También es importante considerar la incidencia del tamaño de las cuencas en las estimaciones hidrológicas del método CN, habida cuenta que el método original se basó en aforos de cuencas de diversos tamaños desde 0,1 ha hasta 18.600 ha (Tedela *et al.*, 2012). El USDA recomienda su implementación en pequeñas cuencas rurales, aunque no define la extensión de las mismas. Recientemente Ares *et al.* (2012b), siguiendo el criterio de Hawkins (1993) determinaron en forma asintótica el valor de CN para una cuenca de Pampa Serrana. Dichos autores advirtieron una posible subestimación del valor de CN por efecto del tamaño de la cuenca analizada en comparación con las estimaciones del escurrimiento superficial que se obtienen a partir del empleo del método del SCS (USDA SCS, 1985).

Otro aspecto que debe ser estudiado especialmente en nuestro país es la influencia del uso de la tierra en la estimación del escurrimiento. En tal sentido, un trabajo de largo plazo realizado a nivel de microcuenca en la Pampa Ondulada bonaerense (Castiglioni *et al.*, 2006) mostró que la siembra directa continua podía incidir significativamente en algunas de las propiedades hidrológicas, como por ejemplo el caudal pico, sin alterar sensiblemente el coeficiente de escurrimiento respecto de la labranza convencional continua. A su vez Chagas *et al.* (2008a), aplicando el criterio de Hawkins (1993), no hallaron diferencias en los valores asintóticos de CN entre sistemas de labranza convencional y siembra directa en esa misma microcuenca, aunque sí pudieron advertir una mayor dispersión de los datos bajo labranza convencional.

Si bien el valor de CN de una determinada cuenca no está directamente asociado a la infiltración de sus suelos dominantes (Van Mullem *et al.*, 2002), la determinación de ésta variable mediante el empleo de simuladores de lluvia a campo puede aportar información comparativa valiosa para ayudar a interpretar los resultados a escala de cuenca y microcuenca (Elhakeem & Papanicolaou, 2009; Chagas *et al.*, 2011).

En base a los antecedentes expuestos se destaca la conveniencia de calibrar localmente los métodos estimativos de escurrimiento utilizando cuencas aforadas bajo

siembra directa proveniente de regiones agroecológica-mente contrastantes, a la vez de estudiar el efecto de la escala de percepción en dichas calibraciones.

Por tal motivo los objetivos del presente trabajo fueron los siguientes:

- Comparar la respuesta hidrológica, en términos de CN, en cuencas de diferente tamaño de la Pampa Serrana y de la Pampa Ondulada.
- Evaluar diferencias en la respuesta hidrológica entre ambas regiones a través de ensayos de simulación de lluvia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de las cuencas

La cuenca del Arroyo Videla está situada en el sector central de la provincia de Buenos Aires, Argentina, en la subregión de las sierras bonaerenses, denominada Pampa Serrana (INTA-CIRN, 1990) (Fig. 1a). La misma incluye áreas de sierras, lomadas y otras áreas de menores pendientes del sector intraserrano. Esta cuenca posee una superficie de aporte de 116,3 km² y forma parte de la cuenca del arroyo del Azul.

Los suelos predominantes en la cuenca son los Argiúoles típicos. En menor proporción existen Haplúoles, Natracualfes, Paleúoles y un pequeño porcentaje corresponde a afloramientos rocosos (INTA, 1992). Las tierras arables se dedican principalmente a la producción de cultivos anuales y en menor me-

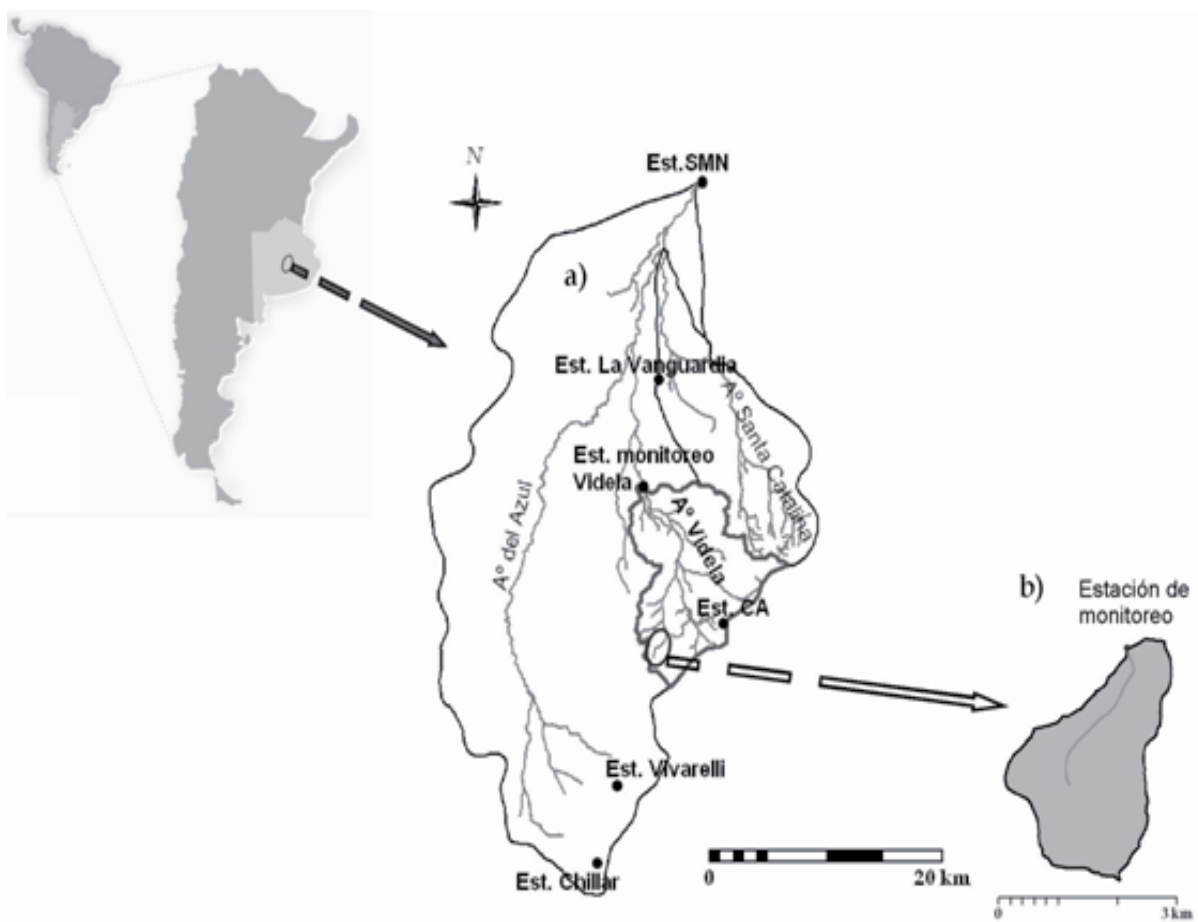


Figura 1. a) Ubicación de cuenca del arroyo Videla y de la microcuenca de 5,6 km² bajo estudio, en la cuenca superior del arroyo del Azul. Estación de monitoreo de caudales en arroyo Videla. Estaciones de registros pluviométricos: Servicio Meteorológico Nacional (SMN), La Vanguardia, Cerro del Águila (CA), Vivarelli y Chillar. b) Detalle de la microcuenca y ubicación de la estación de monitoreo de caudales correspondiente.

Figure 1. a) Videla stream basin and 5.6 km² small watershed location. Videla stream flow monitoring station. Pluviometric record stations: Servicio Meteorológico Nacional (SMN), La Vanguardia, Cerro del Águila (CA), Vivarelli and Chillar. b) Detail of the small watershed and its flow monitoring station.

cida a planteos mixtos agrícola-ganaderos, mientras que las tierras bajas aledañas al curso de agua del arroyo Videla constituyen áreas de pasturas naturales con uso ganadero. El monitoreo del escurrimiento se realizó en la cuenca del arroyo Videla y en una microcuenca primaria, exclusivamente agrícola, de 5,6 km², ubicada en la cuenca alta del arroyo Videla (Fig. 1b). El punto de aforo del arroyo Videla posee las siguientes coordenadas: 37°02'50,79" S y 59°56'40,09" W; y las coordenadas del aforo de la microcuenca son las siguientes 37°08'48" S y 59°55'25" W.

Con respecto a la Pampa Ondulada se obtuvieron registros de caudal provenientes del arroyo del Tala (partidos de San Pedro y aledaños), en un punto de cierre ubicado en la cuenca media de dicho arroyo, a la altura del campo Los Patricios (UBA) abarcando un área de drenaje de 409 km² (Fig. 2a). Los suelos predominantes son Argiudoles vérticos y típicos en las vertientes, mientras que los suelos del plano aluvial son Natracuoles y Natracualfes. El uso de la tierra es similar al de la cuenca del arroyo Videla. Así, las tierras arables se dedican

casi exclusivamente a la producción de cultivos anuales utilizándose como principal práctica de cultivo la siembra directa continua, mientras que las tierras bajas de escasa productividad se dedican a la cría de ganado en forma extensiva. Estas últimas áreas ocupan aproximadamente el 25% de la superficie de la cuenca estudiada. Las coordenadas del aforo son 33°49'10" S; 59°54'29" W. A su vez se monitoreó el escurrimiento de una microcuenca primaria de 3 km² de superficie (Fig. 2b), dedicada exclusivamente a la agricultura. Las coordenadas del aforo son 33°48'09" S y 59°54'55" W. Las microcuencas estudiadas, tanto de la Pampa Serrana como de la Pampa Ondulada, no poseen suelos hidrohalmórficos debido a que ocupan posiciones altas cercanas a las divisorias de agua de las respectivas cuencas.

Registro de lluvias

En el caso de la cuenca del arroyo Videla (Pampa Serrana), las lluvias relativas a los eventos de crecida se obtuvieron a partir

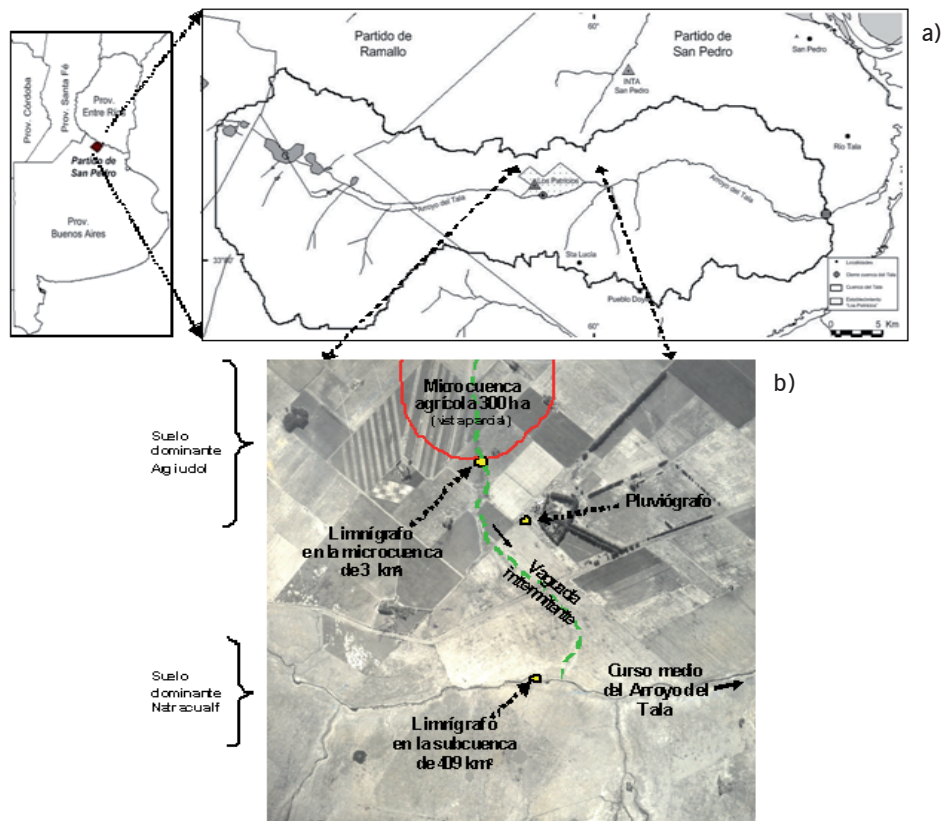


Figura 2. a) Ubicación de la cuenca del arroyo del Tala, punto de cierre y estación de registros pluviométricos (INTA San Pedro). b) Ubicación de las estaciones de monitoreo en la subcuenca de 409 km² y en la microcuenca de 3 km². Localización de estación de registros pluviográficos correspondiente a la microcuenca.

Figure 2. a) del Tala stream basin, outlet point and pluviometric record station (INTA San Pedro). b) Monitoring station location of the 409 km² subbasin and of the 3 km² small watershed. Small watershed's pluviometric record station.

de la estimación de la precipitación diaria en el centro de gravedad de la cuenca, dado que no se contaba con registros continuos de una sola estación para el total del período estudiado, comprendido entre los años 2001 y 2007. Para ello se usaron los datos pluviométricos diarios disponibles correspondientes a las cinco estaciones de registro más cercanas (Fig. 1a) y las distancias al centro de gravedad de la cuenca (Tabla 1). Para la estimación se empleó el método de ponderación por el inverso de la distancia elevado al cuadrado (Dingman, 2002), en el cual los valores de precipitación se calculan a través de:

$$\hat{p}_0 = \frac{1}{D} * \sum_{g=1}^G d_g^{-b} * p_g \tag{1}$$

$$D = \sum_{g=1}^G d_g^{-b} \tag{2}$$

donde: \hat{p}_0 : precipitación diaria estimada para el centro de gravedad de la cuenca; d_g : distancia de cada estación al centro de gravedad de la cuenca; p_g : precipitación diaria de cada estación g ($g=1,2,\dots,G$). D : sumatoria de las distancias elevadas al cuadrado de las estaciones al centro de gravedad de la cuenca. En este caso se consideró $b=2$ para realizar la ponderación mencionada.

En el caso de la microcuenca de Pampa Serrana, las precipitaciones diarias se registraron a través de una estación meteorológica automática denominada "Cerro del Águila", localizada dentro de la cuenca del arroyo Videla y a 5 km del aforo de la microcuenca (Fig. 1a).

Para la cuenca del arroyo del Tala (Pampa Ondulada) se utilizaron los registros del INTA San Pedro ubicado sobre la divisoria de la cuenca del Tala, a 15 km del aforo y las lecturas de una estación meteorológica ubicada dentro del campo de

la Universidad de Buenos Aires, a 1000 metros aproximadamente del aforo de la microcuenca correspondiente (Figs. 2a y 2b).

Registro de escurrimientos

Las alturas de agua registradas por los limnógrafos automáticos ubicados en las salidas de las cuencas y microcuencas estudiadas fueron convertidas a caudal mediante los procedimientos citados por Ares *et al.* (2005, 2012a) para el arroyo Videla (Pampa Serrana) y por Chagas *et al.* (1998) para el arroyo del Tala (Pampa Ondulada).

Para la cuenca del arroyo Videla (Pampa Serrana) se contó con registros de los años 2001-2007, mientras que para la microcuenca de esa misma área se contó con registros continuos del período 2011-2012. Para la cuenca del arroyo del Tala se contó con registros continuos del periodo 2004-2006 mientras que para la microcuenca correspondiente se analizaron registros continuos del período 1994-2004.

Cálculo de los Números de Curva

A partir de datos locales de precipitación y escurrimiento se determinaron los valores de CN correspondientes a los eventos registrados, mediante las ecuaciones (3) y (4) (Hawkins, 1993):

$$S = 5 \left[P + 2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{1/2} \right] \tag{3}$$

$$CN = \frac{25400}{(254 + S)} \tag{4}$$

donde: Q= escorrentía (mm); P= precipitación (mm); S= retención potencial (mm).

Tabla 1. Distancias desde las 5 estaciones pluviométricas consideradas al centro de gravedad de la cuenca del arroyo Videla.

Table 1. Distances from the 5 pluviometric stations to the center of gravity of the Videla stream basin.

Estación	Distancia al centro de gravedad (km)
SMN	30
Chillar	24,3
Vivarelli	18,1
La Vanguardia	15,1
Cerro del Águila	3,8

Los valores de CN así calculados se relacionaron con las precipitaciones que le dieron origen mediante un gráfico que vinculaba ambas variables. A partir de esta información se caracterizó el tipo de patrón de respuesta de la cuenca estudiada, siguiendo la propuesta de Hawkins (1993).

Determinación de la tasa de infiltración mediante lluvias simuladas

Se empleó un equipo simulador de lluvias del tipo formador de gotas (Iruetia & Mon, 1994), utilizándose en todos los casos agua destilada. Los lotes seleccionados para la aplicación de lluvia en las respectivas microcuencas están ubicados en las laderas centrales de las mismas, en sitios representativos en cuanto a pendiente, grado de erosión anterior y uso de la tierra. En Azul (Pampa Serrana) se realizaron 5 ensayos con lluvia simulada en 2012 en lotes con soja de 1ª y 2ª siembra, en condiciones cubiertas y descubiertas (quitando completamente la cobertura vegetal de ese momento sin alterar el suelo). El uso asociado a cada parcela de ensayo de simulación se indica en la Tabla 2. Se aplicaron láminas de agua variables, entre 90 y 240 mm de agua, según cada caso, hasta alcanzar la estabilidad en la infiltración. Los ensayos de lluvia simulada en la micro-cuenca del partido de San Pedro (Pampa Ondulada) realizados por De la Vega *et al.*, (2004) a lo largo del año 2001 y utilizados en el presente trabajo en forma comparativa, fueron llevados a cabo en cinco fechas sucesivas con intervalos de 2 meses, en un lote con la rotación trigo-soja 2ª siembra, que se encontraba bajo siembra directa desde 1999. Se aplicaron lluvias de 60 mm con una intensidad de 60 mm h⁻¹, en situaciones tanto descubiertas como cubiertas, en cada una de las fechas elegidas.

Análisis de suelos

El contenido de agua en el suelo superficial previo a las simulaciones de lluvia, tanto en Pampa Serrana como en Pampa Ondulada (De La Vega *et al.*, 2004), se determinó gravimétricamente por diferencia de peso entre suelo húmedo y seco. La estabilidad estructural se evaluó por el método de Le Bissonnais (1996). La hidrofobicidad se determinó para ambos suelos de Azul y San Pedro en 2012, por el método "Water Drop Penetration Time" (WDPT) citado por Chenu *et al.* (2000) que consistió básicamente en medir el tiempo que necesitaba una gota de agua (3 µL) para entrar completamente en el suelo en agregados de 3-5 mm. Las muestras de suelo para tales fines consistieron en muestras compuestas de 5 submuestras con 3 repeticiones de 0-15 cm de profundidad extraídas en la misma época y en los mismos lotes donde se realizaron las simulaciones de lluvia respectivas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los CN calculados a partir de eventos observados en cuencas de diferentes tamaños

Al graficar los CN en función de lluvias crecientes en la microcuenca de Pampa Serrana (Fig. 3), se observó que los mismos se estabilizaban en valores cercanos a 62, asociados a lluvias de alta magnitud diaria. Si bien la cantidad de datos hasta el presente no ha permitido realizar un ajuste a una función matemática que describa de manera numérica la relación entre ambas variables, ya que según

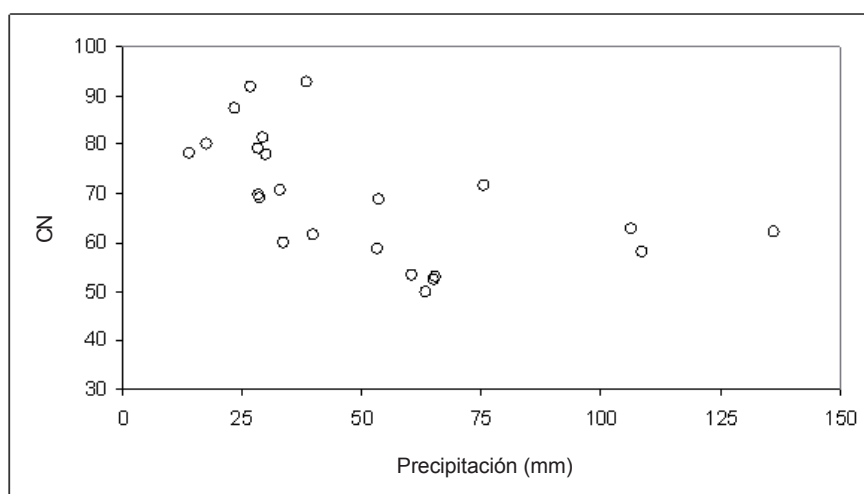


Figura 3. Valores de CN en función de lluvias crecientes correspondientes a la microcuenca de 5,6 km² ubicada en Pampa Serrana.
Figure 3. Relationship between CN values and increasing rainfall of the 5.6 km² small watershed located in the Hilly Pampa.

lo que recomienda la bibliografía se debería contar con un mínimo de 30 pares de datos lluvia-escorrentamiento para realizar tal ajuste (Hawkins *et al.*, 2009), el registro del escurrimiento correspondiente a tres lluvias mayores que 100 mm, entre ellas, una lluvia de 140 mm, resultó significativo para caracterizar la respuesta hidrológica de dicha microcuenca. En la Figura 3 se observa que ante lluvias de milimetraje diario intermedio, los valores de CN resultaban comparativamente más bajos, cercanos a 50, aunque con una mayor dispersión. Finalmente, dicha microcuenca generó altos valores de CN asociados a lluvias de escasa cuantía diaria pero en condiciones de alta humedad antecedente, o bien relacionados a lluvias de alta intensidad tal como era de esperar de acuerdo con Hjelmfelt (1991) y Van Mullem *et al.* (2002).

La Figura 4 muestra el comportamiento hidrológico de la cuenca de 116,3 km² correspondiente al arroyo Videla (Pampa Serrana), de la cual la microcuenca mencionada en el párrafo anterior forma parte. Así, se puede observar un comportamiento similar al de la microcuenca, ya que la cuenca generó valores de CN que tienden a 57 ante lluvias de alta pluviometría diaria, de acuerdo a lo que indica el ajuste a la función exponencial entre las variables CN-precipitación ($R^2=0,79$) (Ares *et al.*, 2012b):

$$CN(P) = 45,5 * e^{(-0,034 * P)} + 56,9$$

La forma de la respuesta, tanto de la microcuenca como de la cuenca de Pampa Serrana, sigue el patrón "estándar" en los términos que define Hawkins (1993). Dicho patrón es el más frecuente según el mencionado autor, y se evidencia cuando los CN observados disminuyen a medida que las precipitaciones crecen y tienden asintóticamente a un valor constante cuando se alcanzan las tormentas mayores. Las otras respuestas posibles se clasifican en "complaciente" o "con decaimiento", cuando los valores de CN disminuyen a medida que aumenta la precipitación y no existe una tendencia a alcanzar un valor estable, y "violenta" cuando los CN crecen abruptamente y se acercan asintóticamente a un aparente valor constante (Van Mullem *et al.*, 2002). El patrón "estándar" indicaría que todos los sectores de la microcuenca y cuenca estudiadas, participan en la generación de los escurrimientos registrados en las salidas respectivas. Los valores de equilibrio de CN de la microcuenca resultaron ligeramente más altos que los de la cuenca lo cual coincide con lo observado por diversos autores como Esteves & Lapetite (2003), Cerdan *et al.* (2004) y Feng & Li (2008). Dichos autores hallaron que en cuencas de mayor tamaño relativo, se produce una reducción de la lámina de escorrentía atribuible al mayor tiempo medio en el que esta se inicia como también a la importante variabilidad espacial en cuanto al almacenamiento en depresiones, la cobertura vegetal y las capacidades de infiltración diferenciales de los suelos, los que actuarían regulando el flujo superficial. Según Ares *et al.* (2012b), los valores

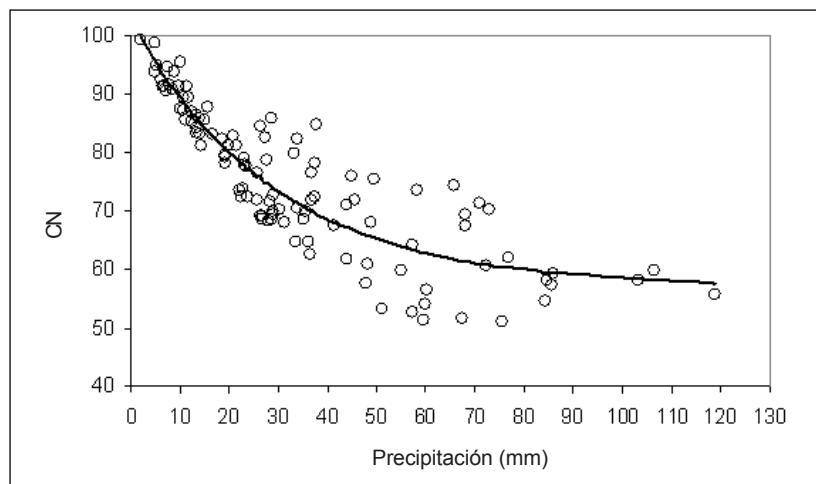


Figura 4. Valores de CN en función de lluvias crecientes correspondientes a la cuenca del arroyo Videla, de 116,3 km² (adaptado de Ares *et al.*, 2012b).
Figure 4. Relationship between CN values and increasing rainfall of the Videla stream basin, of 116.3 km² (adapted from Ares *et al.*, 2012b)

de CN que surgen de aplicar el método de estimación de escurrimiento original para la cuenca de Pampa Serrana oscilaban entre 60 y 85. Los resultados obtenidos para la microcuenca respectiva, se acercan a estos valores en mayor medida que lo hacen para la cuenca, lo cual permite corroborar las relaciones entre escala y CN antes enunciados, para esta región.

En cuanto a los resultados provenientes de las cuencas de la región Pampa Ondulada, la aplicación del criterio de Hawkins (1993) para el caso de la microcuenca aforada de 300 ha ubicada en el partido bonaerense de San Pedro que se tomó como referencia, permitió obtener un patrón de tipo "estándar". Se pudo advertir que la respuesta se equilibraba en valores de CN de 82 ante lluvias crecientes (Chagas *et al.*, 2008a). Estos valores resultaron compatibles con los que se obtienen al aplicar el método original para los suelos Argiudoles vérticos de San Pedro (USDA SCS, 1985). A su vez, la subcuenca del arroyo del Tala de 409 km², a la que pertenece dicha microcuenca, se estabilizaba en valores de CN muy inferiores a los de la microcuenca, compatibles con los efectos de escala antes señalados (Chagas *et al.*, 2008b). En el caso de Pampa Ondulada este efecto se vería magnificado por la presencia de ambientes planos con cubetas naturales en las nacientes del arroyo del Tala, pero no así en las nacientes de la microcuenca. Por el contrario, las nacientes en la Pampa Serrana son los propios faldeos de las sierras, en los cuales se producen los escurrimientos más significativos tanto para la cuenca como para la microcuenca consideradas. Esto explica los mayores efectos de escala registrados en San Pedro (Pampa Ondulada) comparado con Azul (Pampa Serrana).

Comparación de la respuesta hidrológica de ambas microcuencas a través de lluvia simulada

Los resultados de aplicar lluvia simulada para la microcuenca de la Pampa Serrana se observan en la Tabla 2. En ésta microcuenca se trabajó con intensidades de lluvia de 120 mm h⁻¹ y volúmenes totales de 90 a 240 mm debido a que al emplear intensidades menores, no se lograba generar escurrimientos medibles durante más de una hora de ensayo. Si bien se advierte que existieron diferencias en las condiciones iniciales de humedad edáfica entre simulaciones, las mismas habrían sido poco importantes frente a los grandes volúmenes de agua aplicados. Los bajos coeficientes de escurrimiento y las elevadas tasas finales de infiltración obtenidos, resultan compatibles con los valores de CN calculados a través de los registros de los aforos antes mencionados. Es interesante destacar que la estabilización de las curvas de infiltración se produjo tras aplicar una importante cantidad de agua de muy alta intensidad, aún bajo las condiciones más desfavorables con suelo desnudo y alta humedad inicial. También se advierte un importante contraste en la respuesta de los suelos bajo condición cubierta respecto a la condición descubierta. Resultados similares a los descriptos fueron obtenidos por Sfeir *et al.* (2005), tras realizar numerosos ensayos de lluvia simulada en suelos profundos de esta misma región, semejantes a los del presente estudio. Ambos resultados permiten corroborar la elevada capacidad de infiltración de los Argiudoles bajo estudio y la importancia de la cobertura vegetal en dicho comportamiento hídrico. La observación de los perfiles de humedecimiento realizados al finalizar los experimentos descriptos en la Tabla 2 indica una penetración profunda del agua aplicada, movilizadas principalmente por caminos preferenciales verticales, sin evidencias de

Tabla 2. Resultados de la lluvia simulada, aplicada con una intensidad de 120 mm h⁻¹ en parcelas ubicadas en la microcuenca de 5,6 km² de Pampa Serrana (Buenos Aires). Referencias: TIF: tasa de infiltración final obtenida en cada ensayo (mm h⁻¹).

Table 2. Results from the simulated rainfall applied to small plots in the small watershed of 5.6 km² located in the Hilly Pampa (Buenos Aires), with an intensity of 120 mm h⁻¹. References: TIF: final infiltration rate of each experiment (mm h⁻¹).

Condición superficial del suelo	Uso actual del suelo	Humedad gravimétrica inicial (0-30 cm)(%)	Precipitación aplicada (mm)	Escurrecimiento total (mm)	Coefficiente de Escurrecimiento (%)	TIF (mm h ⁻¹)
Cubierto	Soja de segunda	19,6	180	8,3	4,6	116,0
Cubierto	Soja de segunda	25,6	240	6,7	2,8	115,0
Desnudo	Soja de segunda	24,7	90	21,9	24,4	32,6
Desnudo	Soja de primera	27,9	120	38,0	31,7	42,6
Desnudo	Soja de primera	28,0	135	35,0	25,9	27,1

flujos laterales importantes lo cual torna válidos los resultados obtenidos.

Con respecto a las simulaciones de San Pedro (Pampa Ondulada), la humedad inicial edáfica varió a lo largo del año en que fueron realizados los ensayos. Los resultados obtenidos fueron del mismo orden de magnitud que los correspondientes a otros ensayos llevados a cabo sobre el mismo tipo de suelo con más de 10 años de antigüedad con siembra directa (Chagas *et al.*, 2011). Para estos casos se destaca que la tasa final de infiltración media (TIF) resultaba muy inferior a los valores de Azul (Pampa Serrana). En San Pedro las situaciones de suelo cubierto se estabilizaban con una TIF de 20 mm h⁻¹ mientras que para el suelo desnudo lo hacían en 11 mm h⁻¹. Los coeficientes de escurrimiento respectivos fueron de 34% y 57%. Como puede observarse, las tasas de infiltración del Argiudol vértico de San Pedro resultaron sensiblemente inferiores a las del Argiudol típico de Azul al tiempo que los coeficientes de escurrimiento fueron marcadamente superiores.

Comparación de las propiedades edáficas

Para interpretar las diferencias observadas, tanto a nivel de microcuenca como de microparcela de escurrimiento, se debe tener en cuenta que el contenido de materia orgánica del horizonte superficial de Azul (Pampa Serrana) era de 6,3% (con valores que oscilaron entre 5,22 y 7,51) y su textura franca, con 25% de arena, 51% de limo y 23,5% de arcilla. Por su parte, los ensayos de lluvia simulada de San Pedro (Pampa Ondulada) se llevaron a cabo en lotes

cuyos suelos poseían 4% de materia orgánica superficial y con texturas franco limosas a franco arcillo limosas (Félix Fernández, FAUBA, comunic. pers.). Cabe aclarar que la tendencia en cuanto a contenido de materia orgánica, infiltración y escurrimiento descriptos por Chagas *et al.* (2008b) y De la Vega *et al.* (2004) se sigue verificando actualmente en los sitios de ensayo de San Pedro. Por lo tanto los tests de estabilidad estructural e hidrofobicidad llevados a cabo en ambas microcuencas para el presente trabajo (Tabla 3) son válidos para la comparación. Esos niveles de hidrofobicidad denominados subcríticos se asocian a aumentos de la estabilidad de agregados sin comprometer el proceso de infiltración por lo que confirman la excelente condición estructural de los suelos de Azul (Pampa Serrana) frente a los de San Pedro (Pampa Ondulada) (Filipe B Kraemer, comunic. pers.). En favor de los Argiudoles típicos de Azul se debe señalar además, el menor contenido de arcilla en el horizonte argílico respecto de los Argiudoles vérticos de San Pedro lo cual determina una mayor velocidad relativa de precolación profunda del agua infiltrada en los suelos de Azul.

CONCLUSIONES

El análisis realizado a escala de cuenca y de microcuenca en las regiones Pampa Serrana y Pampa Ondulada, permitió corroborar las relaciones entre escala y CN. Así en cuencas de mayor tamaño, distintos procesos y factores actuarían regulando el flujo superficial, incrementando las

Tabla 3. Estabilidad estructural e hidrofobicidad del horizonte A del Argiudol típico de Azul y del Argiudol vértico de San Pedro. Referencias: (1) pretratamiento de humectación rápida por inmersión, (2) pretratamiento de humectación lenta por capilaridad, (3) pretratamiento por agitación mecánica luego de la prehumectación, (4) valor de la mediana de hidrofobicidad, (5) valor de la media de hidrofobicidad.

Table 3. Aggregate stability and hydrophobicity for the A horizon of the Typic "Argiudoll" (Azul) and Vertic "Argiudoll" (San Pedro). References (1) fast immersion pretreatment (2) slow capillary-wetting pretreatment (3) mechanical shaking after pre wetting (4) median value of hydrophobicity (5) average value of hydrophobicity

Sitios experimentales	Estabilidad estructural Diámetro medio ponderado (mm)			Hidrofobicidad (seg)	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Azul (microcuenca de 5,6 km ²)	1,79	3,10	3,30	3,55	5,08
San Pedro (microcuenca de 3 km ²)	0,47	2,07	2,37	1,62	1,70

posibilidades de detención y por lo tanto de infiltración. Esto se reflejaría en los menores CN registrados en las cuencas consideradas en este trabajo con respecto a los correspondientes a las microcuencas estudiadas.

Por su parte, los resultados obtenidos del estudio comparativo entre ambas regiones a escala de microcuenca y parche (referida a la escala de análisis abordada a través de la lluvia simulada) evidenciarían las diferencias en los CN vinculadas a las propiedades de los suelos de dichas regiones. En la Pampa Serrana, los suelos dominantes, Argiudoles típicos, son profundos y bien drenados, muy bien provistos de materia orgánica y con elevada estabilidad estructural. En relación a tales propiedades dichos suelos han mostrado poseer una elevada capacidad de infiltración reflejada en los valores de equilibrio de CN cercanos a 62 obtenidos a nivel de microcuenca. Los ensayos con lluvia simulada a campo arrojaron resultados comparables con los anteriores, dados por los coeficientes de escurrimiento que oscilaban entre 2,8% y 31,7% y tasas finales de infiltración que variaron entre 115 y 27 mm h⁻¹, según se tratara de suelos completamente cubiertos por residuos vegetales o completamente desprovistos de los mismos. No obstante, la gran dispersión en los valores obtenidos en los distintos experimentos indican claramente la necesidad de mantener estos suelos cubiertos para garantizar una elevada tasa de infiltración y evitar así la ocurrencia de escurrimientos superficiales de gran energía y poder erosivo que son dables de observar a campo.

La comparación de estos resultados con los de Pampa Ondulada muestra que existe una coherencia de las respuestas hidrológicas a nivel de microcuenca y parche, y que las mismas son consistentes con las diferencias en las propiedades edáficas del horizonte superficial y subsuperficial de los respectivos suelos dominantes. Sin embargo, surge claramente que los cambios en los valores de CN asociados a cambios de escala no resultan lineales, ni dentro de cada sitio ni entre sitios experimentales, particularmente considerando los bajos valores de CN obtenidos para la cuenca del arroyo del Tala de 409 km². Por lo expuesto, la obtención y el análisis de registros de lluvia y escurrimiento son pasos insoslayables para caracterizar en forma adecuada la variabilidad espacial y temporal del comportamiento hidrológico de cuencas, especialmente a la hora de emplear métodos de estimación de escurrimiento de uso universal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por los proyectos UBACyT 709 y 937 (período 2011-2014). Se agradece a Filipe B Kraemer y Patricia Fernández por los análisis de estabilidad estructural e hidrofobicidad de los suelos de Azul y de San Pedro.

BIBLIOGRAFÍA

- Ares, MG; M Varni; E Usunoff & L Vives. 2005. Cálculo del número de curva en subcuencas del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires. *Cuadernos del Curiham* 11(1): 39-47.
- Ares, MG; CI Chagas & M Varni. 2012a. Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Ciencia del Suelo* 30(2): 151-160.
- Ares, MG; M Varni, CI Chagas & I Entraigas. 2012b. Runoff curve number calibration of a 116 km² agricultural basin, Buenos Aires province, Argentina. *Revista Agrociencia* (México) 46(6): 535-541.
- Arnold, JG; R Srinivasan; RS Muttiah & JR Williams. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment: Part I. Model development. *J Am Water Resour As* 3(1): 73-89.
- Castiglioni, MG; CI Chagas; MJ Massobrio; OJ Santanatoglia & A Buján. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 24(2): 169-176.
- Cerdan, O; Y Le Bissonnais; G Govers; V Lecomte; K van Oost; A Couturier; C King & N Dubreuil. 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *J. Hydrol.* 299: 4-14.
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; M Massobrio; MG Castiglioni & A Buján. 1998. Influencia de las lluvias previas sobre el comportamiento hidrológico de una microcuenca. *En: Avances en el Manejo del Suelo y el Agua en la Ingeniería Rural Latinoamericana.* (ed R Balbuena *et al.*). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Pp 314-322.
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; MG Castiglioni; MJ Massobrio; A Buján & C Irurtia. 2008a. Número de Curva de escurrimiento para una microcuenca de Pampa Ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo* 26(1): 63-69.
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; MG Castiglioni; MJ Massobrio & A Buján. 2008b. Escurrimiento directo en una cuenca agropecuaria estimado a través de la variable "lluvia acumulada en dos días". *Actas del XXI Congreso de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*, en CD.
- Chagas, CI; FK Kraemer; S Utin; C Irurtia & OJ Santanatoglia. 2011. Influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de suelos pertenecientes a una cuenca de la Pampa Ondulada. *Cuadernos del Curiham* 17: 15-24.
- Chenu, C; Y Le Bissonnais & D Arrouays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 64: 1479-1486.
- De la Vega, G; MG Castiglioni; MJ Massobrio; CI Chagas; OJ Santanatoglia & C Irurtia. 2004. Infiltración en un Argiudol vértico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura humedad inicial. *Ciencia del Suelo* 22(1): 52-55.

- Dingman, L. 2002. Physical hydrology. 2nd Edition. Prentice Hall. New Jersey. pp 115-116.
- Elhakeem, M & AN Papanicolaou. 2009. Estimation of the Runoff Curve Number via direct rainfall simulator measurements in the State of Iowa, USA. *Water Resour Manag* 23: 2455-2473.
- Esteves, M & JM Lapetite. 2003. A multiscale approach of runoff generation in a Shaelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena* 50: 255-271.
- Feng, P & JZ Li. 2008. Scale effects on runoff generation in meso-scale and large-scale sub-basins in the Luanhe River Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 5: 1511-1531.
- Hawkins, R. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. Irrig. and Drain. Eng. ASCE.* 119(2): 334-345.
- Hawkins, RH; TJ Ward; DE Woodward & JA Van Mullem (eds). 2009. Curve Number Hydrology: State of the Practice. ASCE Publications: Reston. 112 pp.
- Hjelmfelt, AT. 1991. Investigation of Curve Number procedure. *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 117(6): 725-737.
- INTA-CIRN. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD 85/019. Buenos Aires, Argentina. Tomo I, 731 p.
- INTA. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3760-22, Chillar, provincia de Buenos Aires. INTA. Argentina.
- Irurtia, CB & R Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación N° 176:1-18. Instituto de Suelos INTA- Castelar. Buenos Aires. Argentina.
- Jacobs, JH & R Srinivasan. 2005. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. *J. Soil Water Conserv.* 60(5): 274-279.
- Kraemer, FB; CI Chagas; G Vázquez Amábile; EA Palacín; OJ Santanatoglia; MG Castiglioni & MJ Massobrio. 2011. Aplicación del Modelo Hidrológico -Swat- en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 29(1): 75-82.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *European J. Soil Sci.*, 47: 425-437.
- Massobrio, MJ; MG Castiglioni; CI Chagas & OJ Santanatoglia. 1998. Análisis de sensibilidad de un modelo predictivo distributivo de producción de sedimentos y nutrimentos asociados (AGNPS) en una microcuenca del arroyo del Tala, Argentina. *Revista Terra Latinoamericana* 16(4): 371-377.
- Mishra, SK & V Singh. 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 513 pp.
- Mockus, V. 1949. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. In: Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed. Exhibit A in Appendix B. U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Romero, P; G Castro & JA Gómez. 2007. Curve Number values for olive orchards under different soil management. *Soil Sci. Soc. Am J.* 71(6): 1758-1769.
- Santanatoglia, OJ; CI Chagas; MJ Massobrio; MG Castiglioni & A Buján (ed) 2012. Investigaciones sobre el comportamiento hidrológico y los procesos de degradación de tierras de la cuenca del Arroyo del Tala, Buenos Aires, Argentina. Editorial Imágen, Daireux, Bs As, 241 pp.
- Sfeir, A; M Varni; M Piscitelli; RJ Crespo; G Ares & G Studdert. 2005. Cuantificación de los procesos de infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo por medio de simuladores de lluvia. Actas XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, en CD.
- Soulis, KX; JD Valiantzas; N Dercas & PA Londra. 2009. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6: 373-400.
- Tedela, NH; SC McCutcheon; TC Rasmussen; RH Hawkins; WT Swank WT; JL Campbell; MB Adams; CR Jackson & EW Tollner. 2012. Runoff Curve Number for 10 small forested watersheds in the mountains of the eastern United States. *J. Hydrol. Eng.* 17: 1188-1198.
- USDA SCS. 1985. National Engineering Handbook, Section 4. U.S. Government. Printing Office. Washington DC.
- Van Mullem, JA; RH Hawkins; AT Hjelmfelt & QD Quan. 2002. Runoff Curve Number method: Beyond the handbook. Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference, Las Vegas.
- Young, RA; CA Onstad; DD Bosch & WP Anderson. 1989. AGNPS: a non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J. Soil Water Conserv.* 44(2): 168-173.