



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER
EL GRADO ACADÉMICO DE
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE

“ANÁLISIS DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA BAJO DISTINTOS MANEJOS
DE SUELO EN UNA ZONA AGRÍCOLA DE LA PROVINCIA DE LA PAMPA”

Autor: Nicolás Damián SECCO

Director: Dr. Pablo Fernando Dornes

Co-Director: MSc. Silvia Beatriz Aimar

SANTA ROSA (LA PAMPA)
ARGENTINA

2013

0

PREFACIO

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la cátedra “Climatología e Hidrología General”, dependiente del Departamento de Recursos Naturales, durante el período comprendido entre el 01 de Abril de 2012 y el 28 de Febrero de 2013, bajo la dirección de Dornes, Pablo Fernando y la codirección de Aimar, Silvia Beatriz.

AGRADECIMIENTOS

Es muy importante para mí agradecer a mi Director, por la ayuda en tareas tanto en gabinete como de campo, la predisposición para ayudarme a realizar este trabajo y la gran cantidad de conocimiento transferido durante estos años.

También deseo agradecer

- A mi Co-Directora por la ayuda con las tareas de laboratorio de análisis de suelos, el préstamo y gestión de instrumental, y sus correcciones sobre el tema edafológico.
- A Carlos Gandi y Juan Carlos Rojas por facilitar la cesión del limnógrafo, un instrumento fundamental para la recolección de datos, y por permitir la descarga de datos del mismo en su horario de trabajo.
- A Santiago Giai, por la cesión de los tensiómetros Watermark y su lector.
- A Ricardo Hevia, Enrique Torroba y todo el personal de la Estancia La Primavera, por permitir el acceso a la misma, brindar información de manejo y la colaboración en tareas de toma de datos de precipitación.
- A Abel Parodi, por la ayuda con las tareas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía.
- A Tomás Hartmann, de INTA Castelar, por la transferencia de datos de intensidad de precipitación del Radar Meteorológico de INTA Anguil.
- A Pamela Lerner, por el traslado en varias campañas a la Estancia y la cesión de datos de los sensores de temperatura y humedad.
- A Graciela Vergara y Guillermo Casagrande, por la entrega de datos de la estación meteorológica de la Facultad de Agronomía.
- A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por el espacio cedido para trabajar en gabinete, y por la formación otorgada, de forma gratuita.
- A Gastón Buss, por su ayuda durante las campañas de pruebas de infiltración.
- A mi familia, por darme la posibilidad de estudiar y permitir mi dedicación completa a este trabajo. A mi hermano Juan Pablo, por sus consejos durante mi vida de estudiante.
- A mi novia, por la compañía y ayuda durante todo el proceso de la tesis y mi carrera.
- A mis amigos, por la grata compañía durante esta etapa, y por sus conversaciones que permitieron abrir mi mente para definir mi tema de trabajo.

INDICE GENERAL

Lista de Figuras	4
Lista de tablas	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCION	8
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	11
2.2. Objetivo General	11
2.3. Objetivos específicos	11
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Caracterización del área de estudio	12
3.1.1. Ubicación	12
3.1.2. Climatología	13
3.1.3. Geomorfología	15
3.1.4. Suelos	16
3.1.5. Hidrología	16
3.2. Sitios de estudio	18
3.3. Recolección de datos	20
3.3.1. Generación de escorrentía	20
3.3.2. Humedad del suelo	21
3.3.3. Precipitación	21
3.3.4. Características del suelo	21
3.4. Análisis de datos	23
4. RESULTADOS	25
4.1. Precipitación Neta	25
4.2. Ensayos de infiltración y compactación	26
4.3. Análisis de la dinámica del agua del suelo	29
4.4. Balance hídrico	31
4.5. Análisis de generación de escorrentía en zona de pendiente con pasturas	32
4.5.1. Eventos de verano	33
4.5.2. Eventos de primavera	36
4.5.3. Eventos de invierno	37
4.5.4. Relación lluvia-escorrentía.	38
5. DISCUSIÓN	41
6. CONCLUSIONES	44
7. BIBLIOGRAFÍA	46
8. ANEXOS	51

Lista de Figuras

3.1. Ubicación del área de estudio.	12
3.2. Precipitación anual en el período 1962-2011 para la Estancia La Primavera, La Pampa.	13
3.3. Precipitación media mensual para la Estancia La Primavera, La Pampa (1962-2011)	14
3.4. Temperaturas medias diarias Estancia la Primavera	14
3.5. Ubicación en la provincia de La Pampa de: Subregión de Colinas y Lomas y la Subregión de la Planicie con Tosca	15
3.6. Mapa de los recursos hídricos superficiales de la provincia de La Pampa.	17
3.7. Plano de la Estancia La Primavera y detalle de la microcuenca seleccionada como área de estudio.	18
3.8. Modelo digital del terreno (MDT) del área de estudio, Estancia La Primavera	19
3.9. Localización de los instrumentos en la Estancia La Primavera: LF: Limnógrafo, TA: Tensiómetro del sitio de pastizal y cultivos; TB: Tensiómetro del sitio de agricultura con labranza en camellones; PE, Pluviómetro Estancia; PB: Pluviómetro Bosque y TH; sensores de registro continuo de Temperatura y Humedad Relativa.	20
3.10. Distribución espacial de los ensayos de penetrometría en el sitio de Pendiente con Pastizal.	22
3.11. Distribución espacial de los ensayos de penetrometría en el sitio de Camellones a nivel.	23
3.12. Distribución espacial de los ensayos de penetrometría en el sitio de Bosque de caldén	23
4.1. Tasa de infiltración de los sitios de estudio en la Estancia La Primavera	27
4.2. Infiltración acumulada en los sitios de estudio en la Estancia La Primavera	27
4.3. Esquematación de la resistencia a la compactación en el perfil bajo cuatro manejos distintos: a) Pastizal natural y pastura; b) agrícola; c) Camellones siguiendo las curvas de nivel; y d) Bosque de caldén, en la Estancia La Primavera	29
4.4. Evolución del contenido de humedad del suelo y las precipitaciones en Estancia La Primavera, La Pampa.	30
4.5. Marcha de la Tensión del suelo y las precipitaciones en la pendiente con pastizal y la zona de cultivo con camellones siguiendo las curvas de nivel	31
4.6. Balance hídrico del suelo en el ambiente de pendiente con pastizal y cultivos en la Estancia La Primavera.	32
4.7. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial de los eventos: a) 23/01/2012; b) 29/01/2012; c) 30/01/2012; d) 31/01/2012; e) 16/02/2012, f) 18/02/2012 y g) 27/02/2012 en la Estancia La Primavera, provincia de La Pampa.	35
4.8. Hidrogramas de escorrentía subsuperficial y superficial del día 19/03/2012 en la Estancia La Primavera.	36
4.9. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial de los eventos: a) 16/08/2012; b) 17/08/2012; c) 18/08/2012; d) 03/09/2012 y e) 04/09/2012, en la Estancia La Primavera.	37

4.10. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial del día 15/10/2012.	38
4.11. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial de los eventos:a) 18/10/2012; b) 21/10/2012 y c) 22/10/2012, en la Estancia La Primavera.	38
4.12. Relación entre precipitación total del evento y pico de escorrentía en el ambiente de pastizal en pendiente	39
4.13 . Relación entre lluvia antecedente en los cinco días previos y pico de escorrentía, y diez días previos y pico de escorrentía en el ambiente de pastizal en pendiente.	40
4.14. Relación entre pico de intensidad de lluvia y pico de escorrentía en el ambiente de pastizal en pendiente.	40
A1. Ubicación del sensor piezo-resistivo del limnógrafo instalado en el ambiente de pastizal y cultivos.	53
A2. Aparato registrador del limnógrafo instalado y sensor de tensión del suelo Watermark.	53
A3. Ubicación y toma de datos del tensiómetro localizado en el ambiente de cultivos con prácticas agrícolas conservacionistas.	53
A4. Pluviómetro ubicado en el sitio de bosque de caldén.	54
A5. Área con pastizal y cultivos en pendiente.	54
A6. Sitio de cultivo bajo labranza en camellones siguiendo las curvas de nivel.	56
A7. Sitio Bosque de Caldén.	56
A8. Ensayo de infiltración en el ambiente de pasturas y cultivos.	56
A9. Ensayos de infiltración en sitios con prácticas agrícolas conservacionistas (izquierda) y bosque de caldén (derecha).	57

Lista de Tablas

3.1. Uso y cobertura de los distintos lotes comprendidos en la zona de estudio	18
4.1 Precipitación neta en el sitio de Bosque de Caldén y Precipitación total de la Estancia La Primavera.	25
4.2. Parámetros físicos del suelo en los tres ambientes estudiados en la Estancia La Primavera.	27
4.3. Caracterización de eventos de escorrentía en la Estancia La Primavera y de sus correspondientes eventos pluviométricos.	33
A1. Precipitaciones del segundo semestre de 2011 para la Estancia La Primavera	51
A2. Precipitaciones en el período de estudio Enero-Octubre de 2012, en la Estancia La Primavera.	52
A3. Datos obtenidos del ensayo de infiltración en el área de pendiente con pastizal y cultivos.	57
A4. Datos obtenidos del ensayo de infiltración en el área de cultivos bajo labranza en camellones siguiendo las curvas de nivel.	58
A5. Datos obtenidos del ensayo de infiltración en el área bosque de caldén	59

RESUMEN

La provincia de La Pampa ha atravesado a lo largo de las últimas décadas un proceso de cambio de uso del suelo, de bosque nativo a zonas agrícolas para la producción de cultivos de cosecha y pasturas. Dichos cambios han desencadenado procesos de escorrentía superficial y erosión hídrica que se magnifican con el paso del tiempo y el avance de la frontera agrícola. Frente a dichos cambios en el uso del suelo, han surgido prácticas agrícolas tendientes a la reducción de la escorrentía superficial y a la conservación del agua en el suelo.

El trabajo tiene como objetivo la descripción de la respuesta hidrológica en una zona agrícola de la provincia de La Pampa, bajo distintos usos y manejos del suelo. Para dicho fin, se determinó el efecto de distintos factores en la generación de escorrentía y se evaluaron los mecanismos de generación de escorrentía, en zonas con diferente tipo y cobertura vegetal, uso y manejo del suelo y para diferentes eventos pluviométricos. Se analizó además la evolución temporal del contenido de humedad en el suelo, a los efectos de observar la dinámica del agua en el suelo bajo distintos manejos dada la influencia de las condiciones de humedad antecedentes del suelo en la respuesta a eventos puntuales de precipitación.

La compactación superficial en áreas de pastizal resultó en una disminución de la tasa de infiltración ($K_s = 24$ mm/h), y la ocurrencia de eventos de escorrentía superficial y subsuperficial bajo condiciones de humedad antecedente altas, tres de ellos presentaron picos de escorrentía superficial mayores a 90 mm y otros cinco, picos entre 40 y 75 mm. Áreas con un manejo agrícola conservacionista del suelo y con bosque nativo, presentaron mayores valores de conductividad hidráulica saturada (48 mm/h y 120 mm/h) y no evidenciaron escurrimientos superficiales. Áreas cultivadas sin prácticas conservacionistas presentaron respuestas intermedias. Se verificó que los contenidos de humedad de suelo fueron más altos y poseyeron una mayor permanencia temporal en áreas con prácticas agrícolas conservacionistas que zonas de pastizal y bosque, las cuales evidencian una menor capacidad de retención de humedad.

La implementación de prácticas agrícolas conservacionistas contribuye a la reducción de la escorrentía y la protección del suelo contra la erosión hídrica. Por otra parte, la conservación de bosque caldén contribuye en la infiltración del agua en el suelo y evita la generación de escorrentía superficial.

ABSTRACT

Over recent decades, La Pampa province has been affected by a land use change process, from native forest to agricultural areas with crops and pasture production. Such changes have triggered runoff and water erosion process that magnify over time and with the advance of the agricultural frontier. Facing such land use changes, have emerged agricultural practices designed to reduce runoff and conserve soil water.

The aim of this work is the description of the hydrological response in an agricultural area of La Pampa province, under different soil use and management. For this purpose, it was determined the effect of different factors in runoff generation and were evaluated the runoff generation mechanisms, in areas with different land cover, land use and management for different rainfall events. Furthermore, was analyzed the temporal evolution of the soil moisture, in order to observe water soil dynamics under different management due to previous soil moisture influence in the response to particular rainfall events.

Surface compaction in pasture areas resulted in a decrease in the infiltration rate ($K_s=24$ mm/h) and the occurrence of surface and subsurface runoff events under high previous soil moisture conditions, with sheets greater than 40 mm. Areas with soil conservation farming management and native forest, had greater saturated hydraulic conductivity values (48 mm/h y 120 mm/h) and didn't show surface runoff. Cropped areas without conservationist practices showed intermediate responses. Soil moisture contents were greater and had more temporary stay in areas with conservationist farming practices than pasture and forest areas, which showed lower moisture retention.

The implementation of conservation farming practices contributes to reduce runoff and soil protection against water erosion. Otherwise, Calden's forests conservation, contributes in water infiltration into the soil and avoid runoff generation.

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de La Pampa basa sus actividades productivas en la agricultura y la ganadería, las cuales dependen del aporte fundamentalmente de las precipitaciones pluviales. El proceso de expansión agropecuaria en la provincia de La Pampa involucró la incorporación como zonas de cultivos a grandes superficies originalmente cubiertas por bosque natural. Frente a un aparente aumento en las precipitaciones, el aumento de los precios de los granos y una mayor incorporación de tecnología, se desmontaron grandes superficies de bosques de Caldén tradicionalmente destinadas a ganadería, para la producción de cultivos de verano en los últimos 30 años (Viglizzo *et al.*, 1997). Esta situación, derivó en problemas de erosión hídrica, eólica, y la disminución de los rendimientos de los cultivos (SAyDS, 2006).

El cambio del uso del suelo hacia la agricultura ha provocado cambios en la cobertura vegetal y las propiedades físicas del suelo que alteraron la dinámica del ciclo del hidrológico a diferentes escalas (Burt and Slattery, 2006). El proceso de agricultura continua genera cambios en la cobertura vegetal con tendencia a la estacionalidad y la variabilidad asociada al estado fenológico de los cultivos, que resulta en la densificación del suelo en distintas zonas del perfil de acuerdo a la práctica realizada, y al pisoteo del ganado que es introducido en sistemas mixtos (Green *et al.*, 2003; Fiener *et al.*, 2011). Estos cambios generan una menor intercepción de la precipitación por la vegetación, un sellado superficial del suelo por el impacto de gotas que limita la capacidad de infiltración inicial, y una compactación subsuperficial que disminuye la conductividad hidráulica saturada y la porosidad del suelo (Green *et al.* 2003). Quiroga (1994) encontró una relación inversa entre densidad aparente y conductividad hidráulica para Haplustoles en la provincia de La Pampa, y una densificación superficial en sitios con pasturas, en tanto que para cultivos observó que la compactación se evidenciaba entre los 20 y 30 centímetros de profundidad.

Climáticamente, la provincia se encuentra en una zona de transición entre los regímenes de precipitación Subhúmedo al Noreste y Árido al Sudoeste, con una región semiárida intermedia, donde se presenta un marcado déficit hídrico a lo largo del año (Casagrande y Conti, 1980). Esta característica transicional le confiere a la región y especialmente al área de estudio, ubicada en el centro norte de la provincia de La Pampa, escenarios contrastantes que drásticamente modifican la dinámica de los procesos hidrológicos resultan en una mayor fragilidad de los sistemas productivos.

Los factores que controlan la escorrentía en zonas semiáridas son distintos a los que la generan en zonas húmedas. Los agentes más importantes son la irregularidad espacial y temporal de las precipitaciones y de la humedad antecedente, sumados a la topografía, las características superficiales del suelo, las propiedades físicas de éstos, y la heterogeneidad de la cobertura vegetal. (Beven, 2002). Además, la particular combinación de los factores puede variar la respuesta hidrológica (Castillo *et al.*, 2000). En zonas donde existe una densa masa forestal, la intercepción de la precipitación por parte de la vegetación genera una atenuación de la respuesta hidrológica en cuanto al impacto de las gotas en el suelo y la velocidad de caída del agua. La presencia de suelos mejor estructurados y la ausencia de compactación superficial del suelo en zonas con cobertura vegetal arbórea producen mayores tasas de infiltración y condiciones desfavorables para la generación de escorrentía superficial. Diversos autores compararon distintos tipos de cobertura vegetal, encontrando que a mayores niveles de cobertura, los estratos arbustivos generan menores valores de escorrentía debido a la intercepción y una mejor infiltración por la óptima estructuración del suelo (Chirino *et al.*, 2003). En la región semiárida pampeana se determinó un 23% de intercepción de la precipitación por parte de la vegetación arbustiva, específicamente para Chuquiraga erinacea (Avecilla, 2011). La respuesta es más alta cuando disminuye la intercepción y toma valores elevados para suelo desnudo por el efecto de la compactación superficial que provoca el golpe de las gotas de lluvia y el uso del suelo (Adema *et al.*, 2001; Bienes *et al.*, 2001; Chirino *et al.*, 2003; Quiroga *et al.*, 2005). Zhang *et al.* (2010) estudiaron, cuencas de distinto tamaño, observando la reducción en la producción de escorrentía que ocurren por los cambios de uso del suelo, con la reforestación y la implementación de prácticas agrícolas conservacionistas, las cuales consideran de suma importancia para realizar el manejo del suelo en regiones con pendientes considerables.

Como respuesta a las pérdidas de agua de suelo por escorrentía en zonas de pendiente y el asociado transporte de sedimentos hacia zonas bajas, se comenzaron a implementar prácticas conservacionistas del agua en sistemas agrícolas que atenúen el déficit hídrico evidenciado para la región semiárida, tales como la labranza en camellones siguiendo las curvas de nivel (FAO, 2005). Sin embargo, existe un factor que provoca una diferencia entre los distintos eventos ocurridos para un mismo ambiente, la humedad antecedente. En la región pampeana occidental, la irregularidad temporal de las precipitaciones genera una distribución heterogénea del contenido de

humedad del suelo dentro de cada cuenca. Quiroga *et al.* (2005) mostraron para la región pampeana la influencia del manejo de cobertura en la disponibilidad del agua del suelo. En épocas húmedas, la humedad antecedente adquiere un papel preponderante en la respuesta hidrológica, más importante que el de la densidad y la cobertura vegetal, a tal punto de atenuar las diferencias entre distintos ambientes (Burch *et al.*, 1987; Grayson *et al.*, 1997) y el efecto de la intensidad de la precipitación (Serrano Muela *et al.*, 2005). Western and Grayson (1998), encontraron para zonas semiáridas que la generación de escorrentía se producía en épocas húmedas donde se dan los mayores contenidos de humedad del suelo, por exceso de saturación en áreas de convergencia topográfica, en tanto que desestimaron la ocurrencia de exceso de infiltración. Dada la no linealidad que genera este factor en la generación de escorrentía, es muy importante conocer la evolución espacio-temporal del contenido de agua en el suelo con la finalidad de comprender mejor el funcionamiento hidrológico de los ambientes.

Esmoriz y Serrano (2011), definieron segmentos de escorrentía que atribuyen la generación de escorrentía a determinados factores, según la altura de lámina precipitada. Dichos autores determinaron un umbral mínimo de 12 mm en el cual comienza la generación de escorrentía sin depender de los factores intervinientes, entre 12 y 50 mm, encontraron la mayor variabilidad en la respuesta asociada a distintos factores, entre los que se destaca el contenido de humedad antecedente y la lluvia en los cinco días previos, y un umbral de 50 mm, a partir del cual la escorrentía se vería estrechamente relacionada con las características del evento pluviométrico. Castiglioni *et al.* (2006) encontró que bajo labranza tradicional, se generaban eventos de escorrentía con menor tiempo al pico y mayor pico de escorrentía que bajo un manejo de siembra directa. Resultados similares fueron observados por Castillo *et al.* (2003), quien determinó una mayor respuesta hidrológica frente a eventos de alta intensidad, mientras que eventos de baja intensidad producirían escorrentía bajo condiciones antecedentes de humedad alta.

A pesar de la dominancia de flujos verticales en zonas de llanura, la generación de escorrentía en la Región Pampeana occidental puede ser muy importante y su descripción permitirá incorporar dichos mecanismos en los modelos hidrológicos, y evaluar el eventual efecto del cambio de uso de suelo en el ciclo hidrológico en la Región Pampeana occidental.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

El desarrollo de la agricultura en áreas cubiertas originariamente por bosque nativo, modificó las propiedades físicas del suelo y su dinámica hidrológica. Como resultado de ello existe una disminución de la infiltración por compactación y una mayor dominancia del escurrimiento superficial.

La heterogeneidad espacial del paisaje resultante del tipo de manejo y cobertura, permite inferir una mayor variación espacio-temporal de la dinámica de los procesos hidrológicos como la infiltración y la escorrentía.

2.1. Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es describir la respuesta hidrológica en tres ambientes de una zona agrícola ganadera de la provincia de La Pampa.

2.2. Objetivos específicos

En particular, se propone:

- a) Determinar la capacidad de infiltración en ambientes contrastantes desde el punto de vista de su ubicación topográfica, uso de suelo, cobertura vegetal y tipo de suelo.
- b) Identificar el tipo de respuesta hidrológica (ej. escorrentía superficial, flujo hipodérmico) en dichos ambientes.
- c) Determinar la eventual existencia de un umbral de precipitación para la ocurrencia de escorrentía o flujo hipodérmico y asociar dichos procesos con mecanismos generadores de escorrentía.

3. METODOLOGÍA

La metodología incluyó las tareas de gabinete que permitieron la caracterización del área a partir de información y bibliografía existente y el posterior análisis de datos; las tareas de campo que incluyeron la selección del sitio de estudio, la instalación de instrumentos y sensores (pluviómetro, limnógrafo, sensores de humedad de suelo), la toma de muestras de suelo y la realización de ensayos de infiltración y penetrometría; y las tareas de laboratorio que involucraron la determinación de parámetros físicos del suelo (densidad aparente, humedad gravífica, capacidad de campo y punto de marchitez permanente).

3.1. Caracterización del Área de estudio

3.1.1. Ubicación

El trabajo se llevó a cabo en la Estancia La Primavera, situada en el departamento Capital, Lote 2, Sección II, Fracción D, 25 km norte de la ciudad de Santa Rosa, y delimitada por las coordenadas $36^{\circ}21'16''$ - $36^{\circ}26'39''$ lat. Sur, y $64^{\circ}16'47''$ - $64^{\circ}23'22''$ long. Oeste (Fig. 3.1). Posee una superficie de 9.344 ha, y su actividad principal es agrícola-ganadera.

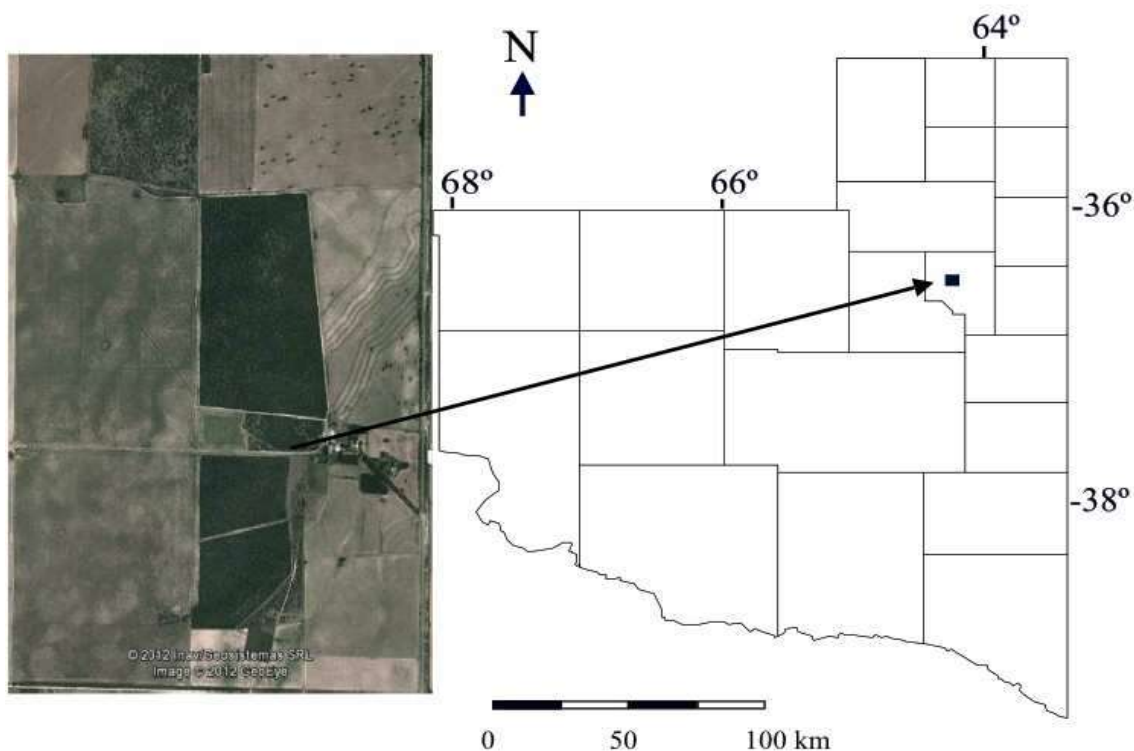


Figura 3.1. Ubicación del área de estudio. Fuente Imagen Satelital: Google Earth.

3.1.2Clima

El área de estudio se encuentra en la transición entre los regímenes de humedad Subhúmedo Seco y Semiárido y se ubica entre las isohietas de 700 y 800 mm (Casagrande y Conti, 1980; Casagrande *et al.*, 2006). Las precipitaciones tienen un origen frontal a partir de la influencia los anticiclones ubicados sobre el Océano Atlántico y el Océano Pacífico con mayor influencia en los meses transicionales. En los meses estivales las precipitaciones tienen además un origen convectivo/ciclónico. Dicho régimen se ve acentuado o minimizado por el fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Grimm *et al.*, 2000),

La precipitación media para el establecimiento en el período 1962-2011 es de 750 mm y se corresponde con la precipitación de Santa Rosa de 700 mm. A partir del registro pluviométrico disponible se puede observar un período con precipitaciones ampliamente superiores a la media de 1980 a 2001, mientras que en la última década los valores son inferiores o similares a la media (Fig. 3.2). La precipitación para el año 2012 fue de 966 mm, que lo ubica como un año húmedo en cuanto al total anual.

Las mismas precipitaciones se concentran en el período Octubre-Marzo, siendo el mes de Marzo el de mayor pluviometría. A pesar del régimen de precipitación descrito, la marcha anual de las precipitaciones puede presentar significativas diferencias tanto en su distribución temporal como espacial. En particular, años con similares totales precipitados pueden presentar desde una distribución relativamente uniforme a períodos con marcados excesos y/o déficits hídricos (Gatto Cáceres y Dornes, 1996, Buss *et al.*, 2011). La Figura 3.3 compara los valores medios mensuales históricos con los registrados en el año 2012 para la Estancia La Primavera.

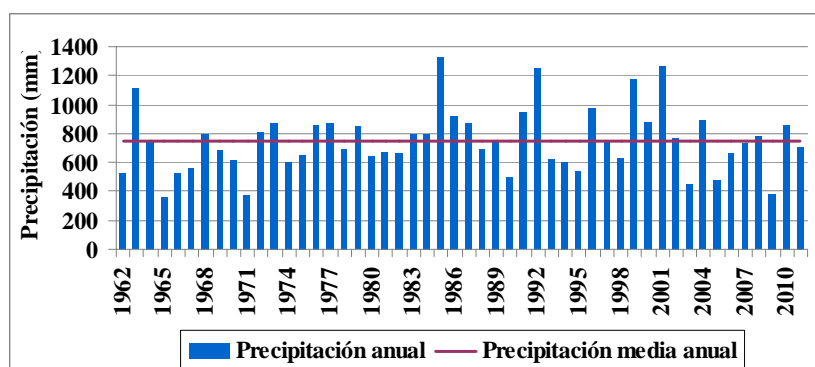


Figura 3.2. Precipitación anual en el período 1962-2011 para la Estancia La Primavera, La Pampa.

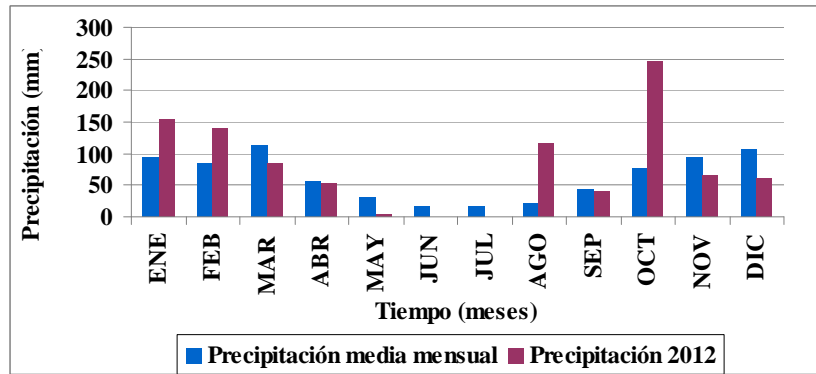


Figura 3.3. Precipitación media mensual para la Estancia La Primavera (1962-2011) y precipitación mensual del año 2012.

El área de estudio se encuentra entre las isotermas media anuales de 15,5 °C y 16 °C, con temperaturas máximas en Enero cercanas a 24 °C y mínimas en Julio entre las isotermas de 7 °C y 8 °C (Casagrande *et al.*, 2006). La marcha anual de temperaturas medias diarias para el año 2012 en el sitio de estudio se ilustra en la Figura 3.4. Las temperaturas fueron obtenidas por un sensor/registrador HOBO en abrigo meteorológico ubicado en la zona de bosque nativo (ver figura 3.9). Se aprecian valores muy altos a comienzos de año coincidentes con un período sin precipitación que resaltan las condiciones esporádicas de déficit hídrico debido a los muy altos valores de evapotranspiración.

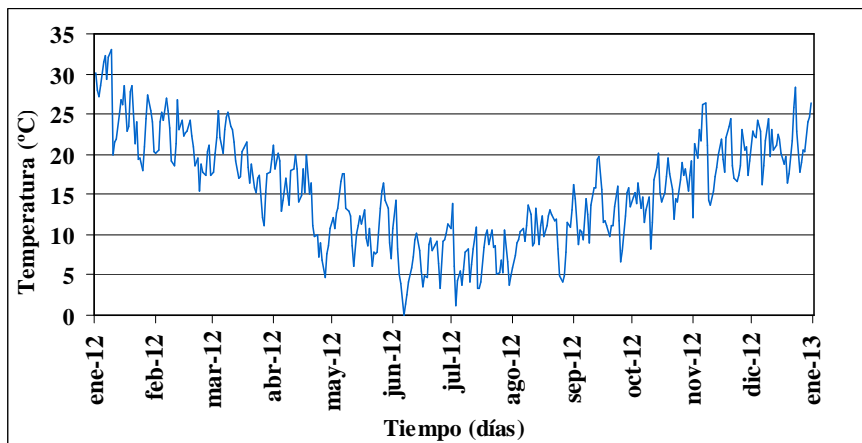


Figura 3.4: Temperaturas medias diarias Estancia la Primavera.

Los vientos predominantes son del S-SO y N-NE, con una velocidad media de 10-12 km/h (Casagrande y Conti, 1980). Valores medios para Santa Rosa y para el periodo 1980-2011 se ubican entre los 12 y 13 km/h.

3.1.3. Geomorfología

Geomorfológicamente, el área de estudio se encuentra en la zona de transición entre la subregión de Planicie con Tosca y la subregión de Colinas y Lomas (Fig. 3.5). En el área de muestreo se evidencian características contrastantes debido fundamentalmente a la presencia de encostramientos calcáreos y suaves lomadas.

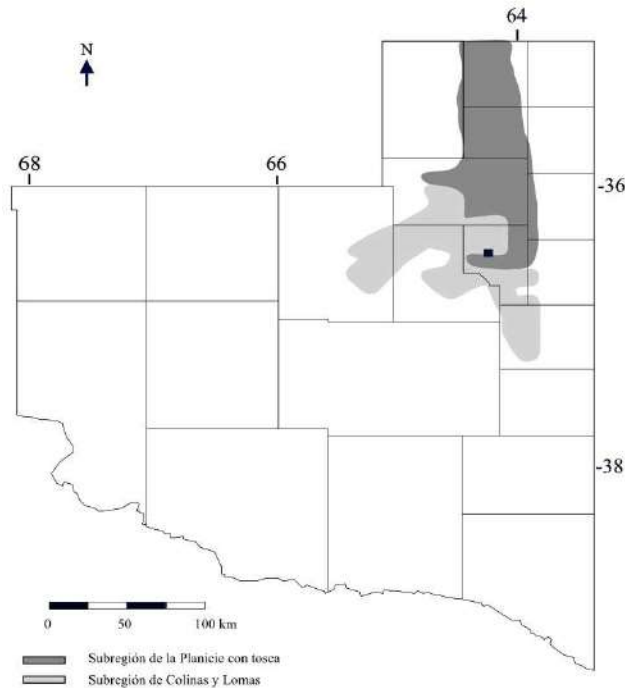


Figura 3.5. Ubicación en la provincia de La Pampa de: Subregión de Colinas y Lomas (gris claro) y la Subregión de la Planicie con Tosca (gris oscuro). Modificado de Salazar Lea Plaza (1980).

El relieve originario de la región fue el de pediplanicie. Los procesos morfogenéticos de origen hídrico actuaron predominantemente destruyendo y disectando la costra calcárea. La acción eólica posterior contribuyó al modelado del paisaje, aportando sedimentos arenosos en las partes deprimidas del terreno, conformando un relieve muy ondulado (Salazar Lea Plaza, 1980).

La presencia de una costra calcárea difundida sobre los sedimentos loésicos del pampeano presenta características descritas por Vogt *et al.* (1999) y Gai y Visconti (2002). Sin embargo el rol hidrológico de dichos encostramientos en la percolación de excedentes hídricos y la eventual formación de una falsa freática que pudiera saturar el suelo y así generar escurrimientos puntuales, no está propiamente definido. Quiroga y Paccapelo (1988) mencionaron la formación de una falsa freática sobre la tosca, mientras que Malán y Mariño (1999) corroboraron que la recarga se ve favorecida en zona de mayor adelgazamiento del espesor calcáreo. Gai y Visconti (2002) observaron

la formación de una falsa freática en la zona de Eduardo Castex con una capacidad de percolación en función del tipo de tosca, sin embargo advirtieron sobre la necesidad de contemplar la influencia de la variabilidad espacial de la misma sobre los procesos hidrológicos.

3.1.4. Suelos

En el área de estudio se encuentran materiales de clase textural arenosa o franco arenosa con presencia de carbonatos, que presentan un espesor variable dependiendo de la posición en el relieve. En las partes altas poseen espesores menores al metro, mientras que en partes bajas de la pendiente poseen una profundidad mayor a 1,50 metros (Peña Zubiate *et al.*, 1980). Subyacente a estos depósitos se encuentran los sedimentos loésicos de la Formación Cerro Azul. (Linares *et al.*, 1980).

Los suelos descriptos por Peña Zubiate *et al.* (1980) dentro de la Subregión conforman una asociación en la que se distinguen:

- Suelos dispuestos en las lomas. Son Haplustoles énticos, familia franco gruesa, mixta, térmica. Tiene poca evolución edafogenética, presenta un perfil sencillo de tipo A-AC-C. El horizonte superficial tiene buena provisión de materia orgánica.
- Suelos dispuestos en pendientes. Son Ustipsamments típicos, familia silíceo, térmica. Son suelos muy arenosos, moderado a fuertemente inclinados, pobres en materia orgánica, con baja capacidad de retención de agua, susceptibles a erosión eólica e hídrica.
- Suelos dispuestos en los bajos. Son Haplustoles énticos, familia franco fina, mixta, térmica. Sus características son similares a los de las lomas pero tienen mayor capacidad de almacenamiento de agua por su textura más fina (franco limosa), Presentan mayor cantidad de materia orgánica y son menos susceptibles a sufrir procesos de degradación por erosión eólica, hídrica y sequías.

Particularmente, para el área de estudio, Martínez Uncal (2005) clasificó los suelos como Molisoles y dentro de este orden caracterizó como Haplustoles a los suelos que dominan el paisaje. La textura la definió como Franca para dicha área.

3.1.5. Hidrología

El área de estudio considerando las regiones y cuencas hídricas de la provincia de La Pampa (Giraut *et al.*, 2006), se ubica en la transición entre la región de la planicie pampeana central y la región de los valles transversales.

En general, la Región Pampeana se caracteriza por sus bajas pendientes topográficas y se corresponde a una llanura de acumulación con sedimentos de origen continental, compuestos predominantemente por depósitos de arenas finas, limos, arcillas, y cenizas del cuaternario (Kruse y Laurencena, 2005; Zárate, 2007). El comportamiento hidrológico está definido en función de la presencia de mantos arenosos y las bajas pendientes, que facilitan el proceso de infiltración determinando que los movimientos de agua más importantes sean del tipo vertical. En épocas húmedas existe un drenaje interconectando zonas deprimidas (Kruse y Zimmermann, 2002). La presencia de encostramientos calcáreos es importante como factor limitante de la infiltración, aunque no es claro su rol hidrológico en la percolación de excedentes hídricos y la formación de una falsa freática que pudiera saturar el suelo (Giai y Visconti, 2002). No existen arroyos, aunque si es común la presencia de depresiones alargadas donde se acumula agua pluvial. En general, es un área que se caracteriza por la falta de un sistema de drenaje jerarquizado, sin embargo la presencia de un relieve ondulado y suelos de textura franca con alto contenido de limo, resulta en la formación de cárcavas que ponen de manifiesto fenómenos de escorrentía superficial. Los niveles saturados son profundos, situándose en general a más de 10 m.

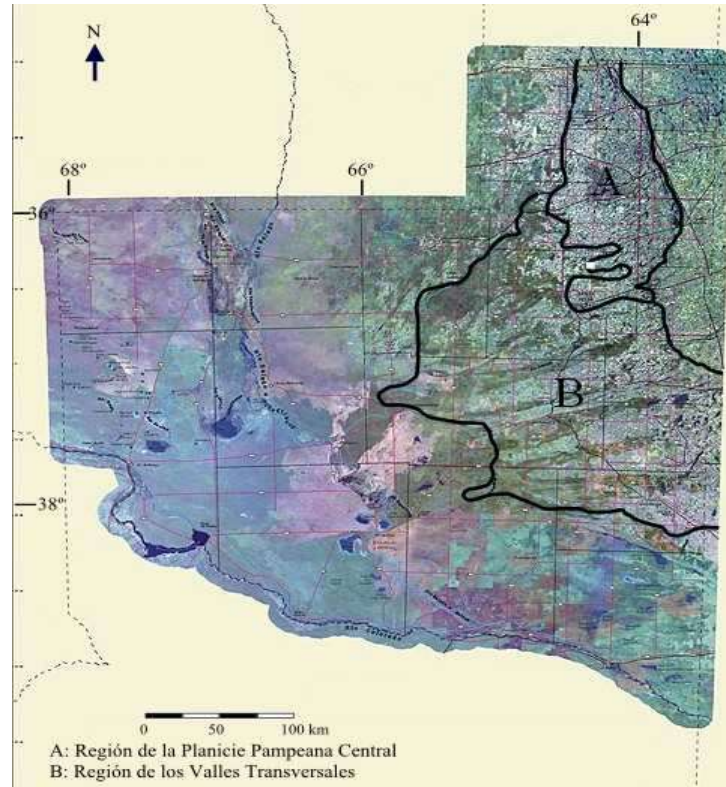


Figura 3.6. Mapa de los recursos hídricos superficiales de la provincia de La Pampa. Modificado de Giraut *et al.* (2006)

3.2. Sitios de estudio

Dentro del establecimiento se seleccionaron tres sitios diferentes con características contrastes de manejo de suelo, tipos de cobertura vegetal y topografía (Tabla 3.1). Los sitios seleccionados comprenden, pendiente con pastizal y cultivo (P), pendiente con camellones en curvas de nivel (CN) y pendiente con bosque nativo (B). Los sitios fueron ubicados en una microcuenca (Fig. 3.7) localizada en el extremo Este de la Estancia La Primavera y que comprende los lotes 3, 4, 5, 6, 8, 9 y 10.

Tabla 3.1. Uso y cobertura de los distintos lotes comprendidos en la zona de estudio.

Lote	Sitio	Uso	Cobertura	Pendiente (%)	Aspecto
3	CN	Agrícola	Cultivos en curvas de nivel	2,9	Antiguas cárcavas y huellas
5	P	Agrícola	Cultivos	2,1	Cárcavas cultivadas
6	P	Agrícola	Pastura perenne	2,4	Cárcava definida y pequeño bosquecillo
8	B	Ganadero	Bosque nativo	4	Cárcava inactiva

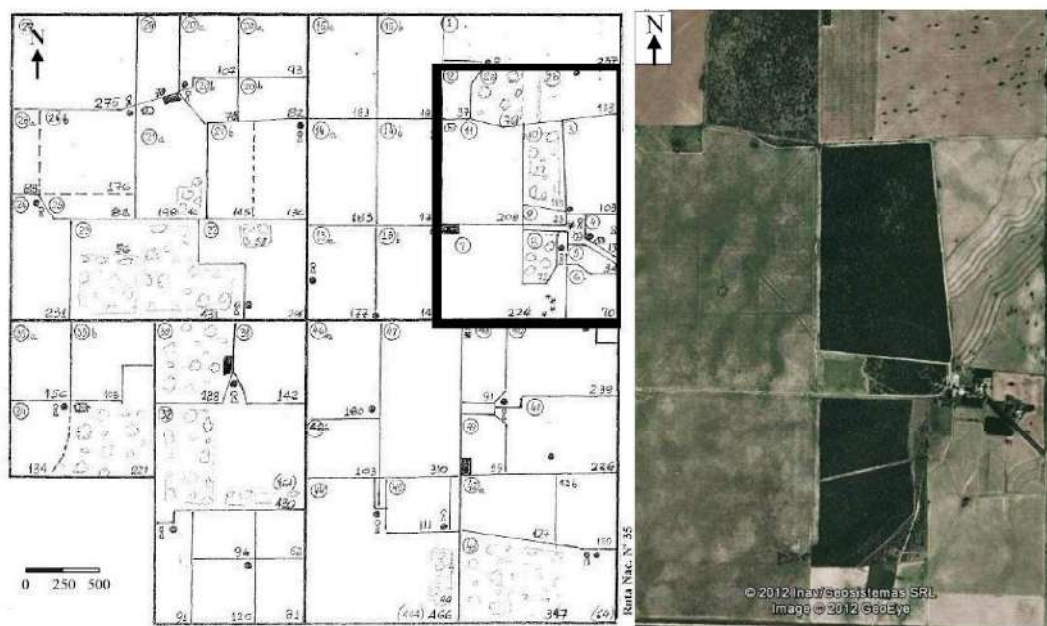


Figura 3.7. Plano de la Estancia La Primavera y detalle de la microcuenca seleccionada como área de estudio.

La definición de los sitios de estudio se basó en observaciones *in situ* que permitieron el reconocimiento de pendientes, tipos de cobertura y manejo, y la identificación de elementos del paisaje hidrológicamente relevantes como la presencia de cárcavas. Además, se elaboró un Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDT)

con el programa Landserf 2.3, a partir de las imágenes del sistema radar SRTM. Dichas imágenes poseen un tamaño de 1° x 1°, luego fueron delimitadas de acuerdo al área ocupada por el sitio de estudio. El MDT permite visualizar zonas del área de estudio que de acuerdo a su posición topográfica posean condiciones de concentración de flujo superficial y subsuperficial. La Figura 3.8 permite observar la correspondencia entre las áreas con concentración de flujos en el MDT y la presencia de cárcavas, pendientes y distintos manejos en la imagen satelital, que ilustran la existencia de escurrimientos superficiales a partir de la evidencia de procesos de erosión hídrica

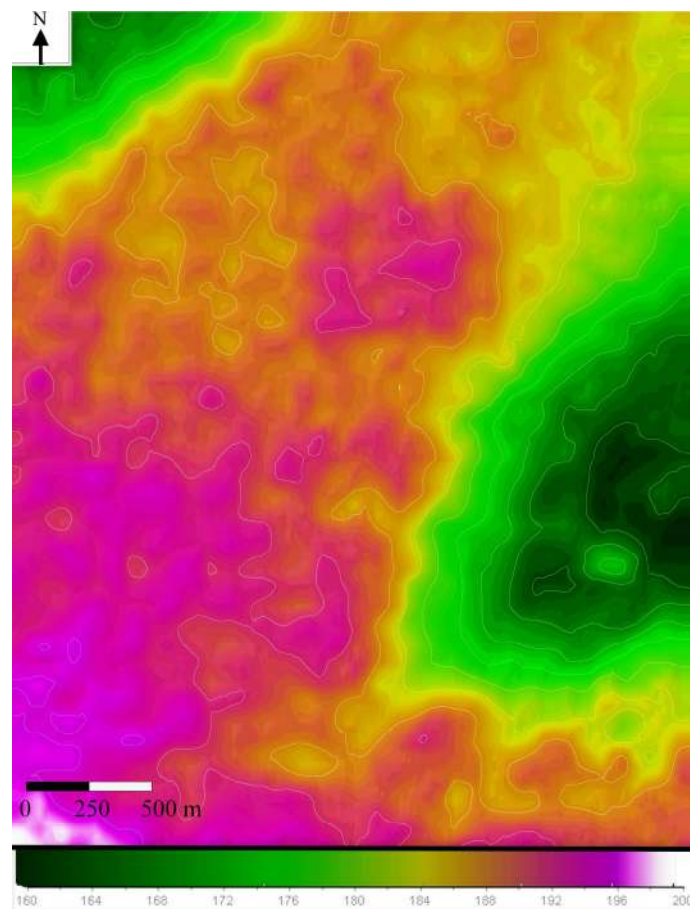


Figura 3.8. Modelo digital del terreno (MDT) del área de estudio, Estancia La Primavera. Fuente MDT: US Geological Survey.

3.3 Recolección de datos e instalación de instrumental

La Figura 3.9 ilustra la ubicación del instrumental y sensores instalados además de los sitios donde se efectuaron las recolecciones de muestras de suelos y ensayos de infiltración y penetrometría.



Figura 3.9. Localización de los instrumentos en la Estancia La Primavera: LF: Limnógrafo, TA: Tensiómetro del sitio de pastizal y cultivos; TB: Tensiómetro del sitio de agricultura con labranza en camellones; PE, Pluviómetro Estancia; PB: Pluviómetro Bosque y TH; sensores de registro continuo de Temperatura y Humedad Relativa. Fuente: Google Earth.

3.3.1. Precipitación

Los datos de precipitación diaria fueron registrados en la Estancia La Primavera a partir del pluviómetro del establecimiento. La precipitación neta (P_n) se evaluó en área de bosque nativo a partir de la abstracción de los volúmenes interceptados por la vegetación (caldén), a partir de la instalación de un pluviómetro debajo de la cubierta arbórea del sitio (Anexo 2). La ubicación de ambos pluviómetros se ilustra en Figura 3.9. La determinación de la P_n se basó en la comparación de los registros pluviométricos en ambos sitios a partir de valores totalizados en diferentes períodos (diario, semanal) debido a que la frecuencia de medición del pluviómetro sito en el bosque de caldén no siempre fue la misma.

Los datos de intensidad de precipitación fueron obtenidos para duraciones de diez minutos a partir de las grillas pluviométricas del Radar Meteorológico del INTA EEA Anguil ubicado a 30 km al sureste. Cada celda de la grilla tiene una dimensión de 1 km^2 . A los efectos de contrastar los valores inferidos por el radar, se verificó que la suma de los volúmenes totalizados para cada intervalo de tiempo coincidiera con los registros del pluviómetro. El criterio de corrección en caso de diferencias fue modificar la altura de precipitación de los distintos intervalos del hietograma, manteniendo su

distribución temporal, de manera que la suma coincida con lo registrado por el pluviómetro.

3.3.2. Generación de escorrentía.

En sitio de pendiente con pastizal (Fig. 3.9.) situado próximo a la Ruta Nacional N° 35, se instaló un limnígrafo-freatígrafo de lectura continua (modelo LR-203) dotado de un sensor piezo-resistivo a 20 cm de profundidad, a fin de registrar posibles eventos de escorrentía superficial y subsuperficial. El intervalo de lectura se seleccionó en 10 minutos en concordancia con los datos disponibles de intensidad de precipitación registrados por el Radar Meteorológico del INTA EEA Anguil.

El limnígrafo se ubicó en el sector medio de una pendiente, en la zona de límite entre dos parcelas con usos distintos al margen de un bosquecillo de caldén (ANEXO II). En la parte alta existen pasturas perennes de Pasto Llorón (*Eragrostis curvula*) y un área de pastos naturales (*Stipa sp.*) cercana al limnígrafo. En la parte baja se realizó un cultivo de invierno, trigo, el cual fue dejado para alimento del ganado durante el verano. En esta pendiente se puede observar la influencia de los procesos erosivos a través de la formación de una cárcava definida en la parte alta y en menor medida en la parte baja.

3.3.3. Humedad de Suelo

A los efectos de observar la dinámica temporal del contenido de humedad del suelo se colocaron dos sensores de tensión del suelo Watermark en los sitios con pendiente y con camellones siguiendo las curvas de nivel (Fig. 3.9). Los sensores se ubicaron a una profundidad de 30 cm y se realizaron lecturas periódicas (ANEXO II)

Además se tomaron muestras de suelo para la determinación de humedad gravimétrica en los sitios mencionados y el bosque de caldén. Las muestras consistían de un duplicado por sitio.

3.3.4. Parámetros edáficos

En los tres sitios se colectaron muestras de suelos con cilindros y a una profundidad de 10 cm para la determinación de densidad aparente en el laboratorio de la Facultad de Agronomía (UNLPam). Además en cada sitio, se colectaron muestras para las determinaciones de punto de marchitez permanente y capacidad de campo.

Los sondeos realizados en los tres sitios permitieron comprobar que no existen encostramientos calcáreos someros o en superficie.

Ensayos de infiltración

Se realizaron en cada ambiente las pruebas de infiltración por medio del método del cilindro infiltrómetro de doble de doble anillo (ANEXO IV), con lecturas cada 1 minuto durante los primeros 10 minutos, cada 2 minutos hasta los 30 minutos, y cada 5 minutos desde los 30 hasta el final de la prueba de aproximadamente 2 horas cuando se estabilizaron los valores. A partir de la elaboración de las curvas de infiltración respectivas se determinó la conductividad hidráulica saturada.

Ensayos de Penetrometría

En los tres sitios seleccionados se realizó un ensayo de penetrometría. La determinación de la compactación del perfil del suelo se efectuó con el penetrómetro de impacto mecánico de punta cónica, con registro de cantidad de golpes cada 5 cm de descenso, hasta una profundidad de 70 cm. El diseño de los ensayos de penetrometría se detalla a continuación y su distribución espacial.

- Sitio P: 5 transectas de 5 ensayos cada una en sentido transversal a la cárcava que atraviesa el sitio del pastizal y la zona de cultivo de la parte baja de ese lote.
- Sitio CN: 5 transectas de 5 ensayos cada una en sentido longitudinal a dos camellones contiguos ubicados en el centro del lote.
- Sitio B: 3 transectas de 5 ensayos cada una, en sentido Oeste-Este, en sentido de la pendiente.



Figura 3.10. Distribución espacial de los ensayos de penetrometría en el sitio de Pendiente con Pastizal. Círculos blancos indican sitios de ensayo.



Figura 3.11. Distribución espacial de los ensayos de penetrometría en el sitio de Camellones a nivel. Círculos blancos indican sitios de ensayo.



Figura 3.12. Distribución espacial de los ensayos de penetrometría en el sitio de Bosque de caldén. Círculos blancos indican sitios de ensayo.

3.4. Balance hídrico del suelo.

Para evaluar el efecto de las condiciones antecedentes en los procesos generadores de escorrentía, se confeccionó un balance hídrico de suelo. El paso temporal seleccionado fue el semanal debido a la falta de observaciones diarias de humedad de suelo en el período comprendido entre noviembre de 2011 y octubre de 2012 inclusive.

La reserva de agua útil (RAU) se determinó a partir de la Ecuación 1 y como se detalla en sección 4.4.

$$RAU = (CC - PMP) \cdot da \cdot h \quad (1)$$

Donde:

RAU: Reserva de agua útil (mm)

CC: Capacidad de campo (%)

PMP: Punto de marchitez permanente (%)

Da: Densidad aparente

h: profundidad del suelo (m).

La elección de un modelo de evapotranspiración fue la propuesta por Penman (1948) y adaptada por FAO (Allen, 2004), dado que es un método de base física que puede ser aplicado a pasos de tiempo menores al mensual a los efectos de replicar la dinámica del balance hídrico del suelo. La evapotranspiración potencial se asumió igual a la de referencia y se obtuvo totalizando los valores diarios calculados por el programa CROPWAT 8.0 (Ecuación 2) diseñado por FAO, utilizando los datos de precipitación diaria, temperatura media diaria, y humedad relativa media diaria obtenidos *in situ*. Además, se utilizaron los valores de heliofanía diaria para el cálculo de la radiación neta, flujo de calor del suelo y velocidad del viento diaria, obtenidos de la base de datos del programa, calculados según latitud.

$$ET_0 = \frac{0,408(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

Donde:

ET₀: Evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹],

Rn: radiación neta [MJ m⁻² día⁻¹],

G: densidad del flujo de calor del suelo [MJ m⁻² día⁻¹],

T: Temperatura media diaria a 2m de altura [°C],

u₂: Velocidad media del viento a 2m de altura [m s⁻¹],

e_s: Presión de saturación de vapor de agua [kPa],

e_a: Presión actual de vapor de agua [kPa],

e_s - e_a: Déficit de presión de vapor de saturación [kPa],

Δ: Pendiente de la curva de saturación de vapor [kPa °C⁻¹],

γ: Constante psicrométrica [kPa °C⁻¹].

4. RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados obtenidos en los ambientes analizados. De esta manera es presentado, el cálculo de la modificación de la función de entrada debido a la cobertura vegetal en el bosque de caldén, el cálculo de la tasa de infiltración, la compactación y el contenido de humedad en los tres sitios. Se presenta además, un cálculo del balance hidrológico y resultados de escorrentía en la zona de pendiente por ser el único sitio donde se verificó por observaciones a campo su existencia.

4.1. Precipitación neta

El estudio de la abstracción de la precipitación (Pn) por la intercepción vegetal, se basó en el registro de la precipitación en un sitio abierto (PE) y un área con cobertura arbórea en el bosque de caldén (PB). La determinación se efectuó a partir de volúmenes totalizados en eventos pluviométricos debido a que el registro en el pluviómetro PB tuvo una frecuencia mayor que la diaria del pluviómetro PE. La Tabla 4.1 ilustra los valores determinados de Pn

Tabla 4.1 Precipitación neta en el sitio de Bosque de Caldén y Precipitación total de la Estancia La Primavera.

Período				Precipitación		Intercepción (%)
Inicio	Fin	Estación	Nº de días	Pn (mm)	Ptotal (mm)	
30/11/2011	03/12/2011	Primavera	3	16	18	11
03/12/2011	19/12/2011	Primavera	16	7	10	30
20/01/2012	24/01/2012	Verano	4	65.5	81	19
24/01/2012	17/02/2012	Verano	24	71	113	37
16/03/2012	31/03/2012	Otoño	15	50	74	32
31/03/2012	19/04/2012	Otoño	19	20	33	39
07/08/2012	13/08/2012	Invierno	6	46	47	2
13/08/2012	20/08/2012	Invierno	7	60	68	12
02/09/2012	05/09/2012	Invierno	5	28	37	24
18/09/2012	11/10/2012	Primavera	23	22	27	19
24/10/2012	31/10/2012	Primavera	6	13	16	19

El valor medio obtenido muestra que la Pn es de 76% de la precipitación total. Dicho valor presenta incertidumbres asociadas fundamentalmente a la longitud del intervalo de totalización, donde debido a la evaporación se podría inferir una mayor intercepción. Tal fenómeno pareciera evidenciarse en los periodos de mayor longitud

donde la intercepción se aproxima al 38%. Es de destacar que no se evaluó la fenofase foliar del caldén que se extiende desde finales de octubre a fin de abril. Dicho efecto, pareciera observarse en invierno y comienzos de primavera donde los valores de intercepción son todos inferiores al 25%. Un análisis estacional muestra que los menores valores de intercepción se registran en invierno (13%) y los mayores en otoño (36%). Por otro lado, lecturas inmediatamente posteriores al evento de precipitación indicaron un valor de P_n del orden del 85%.

4.2. Ensayos de infiltración y compactación

Los ensayos de infiltración fueron realizados en los tres ambientes (P, CN y B) mediante la utilización de un infiltrómetro de doble anillo (ANEXO IV). La Figura 4.1 ilustra la tasa infiltración para los tres sitios.

El área P presentó una lámina de infiltración de 86 mm en 120 min que resultó en la menor tasa de infiltración y en una conductividad hidráulica saturada (K_s) de 24 mm/h. Esto podría deberse a la compactación superficial por ser un área de pastura, con pasto llorón y pastizal natural en la parte alta y baja de la pendiente respectivamente, que se manifiesta en un mayor valor de densidad aparente (Tabla 4.2). También podría contribuir el mayor contenido de partículas finas del suelo por encontrarse el sitio en una zona con evidencias de escorrentía superficial. Quiroga (1994) observó que el pasto llorón produce una alta densidad aparente en superficie, con la consiguiente disminución en la conductividad hidráulica.

En el sitio CN, la lámina infiltrada para 120 min fue de 119 mm que resultó en un valor de K_s de 48 mm/h. La falta evidencia de formación de cárcavas a partir de la interrupción de la pendiente por los camellones a nivel, permiten inferir que la escorrentía se ve positivamente reducida, y conjuntamente con la remoción del suelo para cultivo, serían la causas de los valores más elevados de los parámetros hidráulicos que describen la infiltración.

En B, se observó una lámina infiltrada de 308 mm en 120 min, que resultó en una mayor tasa instantánea de infiltración y en un valor de K_s de 120 mm/h. Estos resultados se pueden asociar a la baja densidad aparente en los primeros centímetros del perfil (Tabla 4.2) y la ausencia de prácticas agrícolas que generan una densificación en el perfil de suelo.

Tabla 4.2. Parámetros físicos e hidráulicos del suelo en los tres ambientes estudiados en la Estancia La Primavera.

Sitio	CC (%)	PMP (%)	RAU (%)	Ks (mm/h)	Da (kg/cm ²)
CN	21.61	14.39	7.22	48	1.32
P	19.41	12.02	7.39	24	1.25
B	21.75	14.05	7.70	120	1.15

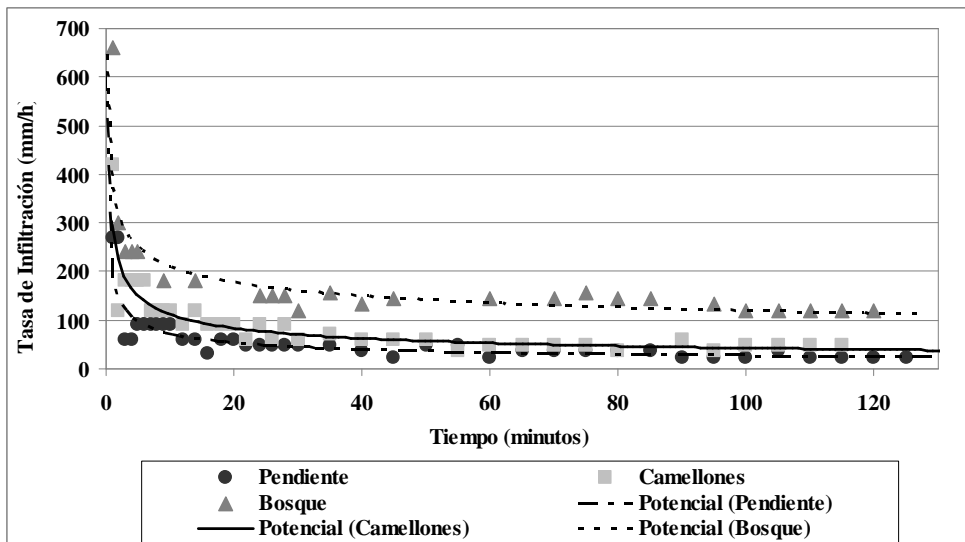


Figura 4.1. Tasa de infiltración de los sitios de estudio en la Estancia La Primavera.

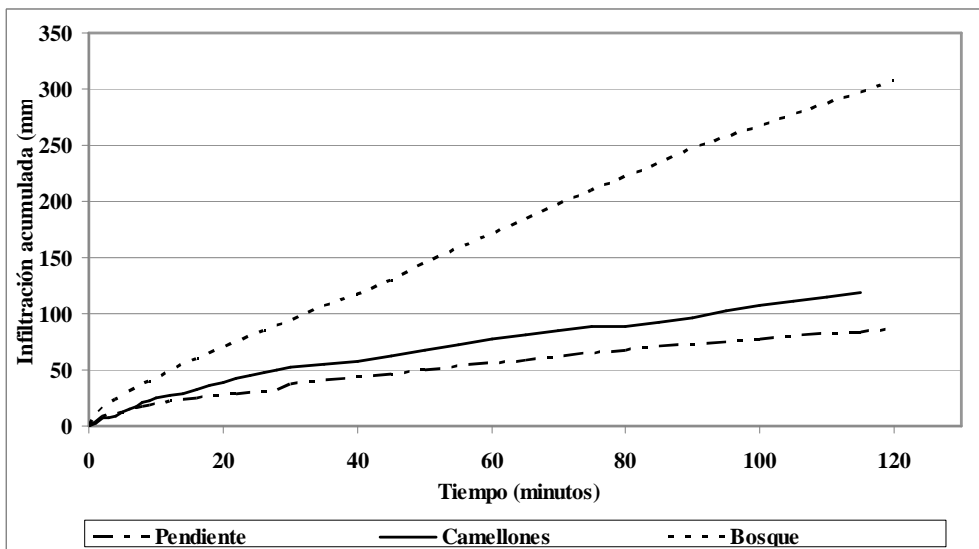


Figura 4.2. Infiltración acumulada en los sitios de estudio en la Estancia La Primavera.

Las pruebas de compactación, realizadas en los mismos sitios sobre grillas definidas a partir de puntos ubicadas aproximadamente equidistantes, se ilustran en la Figura 4.2.

En P se registró una mayor compactación en los primeros 10 cm, fundamentalmente en el área con pasto llorón, debido presumiblemente al pisoteo de los animales y al impacto de las gotas de lluvia debido a la presencia de suelo desnudo entre matas de *Eragrostis curvula*. En la zona con pastizal natural se encontró una compactación subsuperficial más importante, sin la presencia de la costra superficial. Esta característica particular se puede deber a una mayor cobertura de varias especies de gramíneas.

La compactación en el área CN se evaluó entre camellones y presentó una mayor variación en los primeros 20 cm. Dichas diferencias se condice con la práctica mixta realizada en el mismo, donde se realiza agricultura utilizando implementos que roturan los primeros centímetros del perfil. Se observa así, una mayor compactación en los primeros 15 cm del perfil en todas las zonas analizadas de la pendiente (ver Figura 4.2). Una transecta transversal entre camellones ilustra una mayor compactación en la zona media. En cuanto a la variación paralela a los camellones, no se encontró un patrón definido que indique la presencia de zonas con concentración de esorrentía, tal como fue encontrado en la pendiente con pastizal.

En el ensayo de compactación realizado en B, se observaron valores bajos de compactación, con una relativa homogeneidad en el perfil. Solamente la zona baja de la pendiente evidenció valores más altos de compactación. La densidad aparente en esta zona, sin embargo, es menor que la presente en los demás sitios.

Los procesos de compactación en general no se relacionan directamente con la ubicación topográfica, aunque sí presentan valores asociados a las prácticas agrícolas que se realizan.

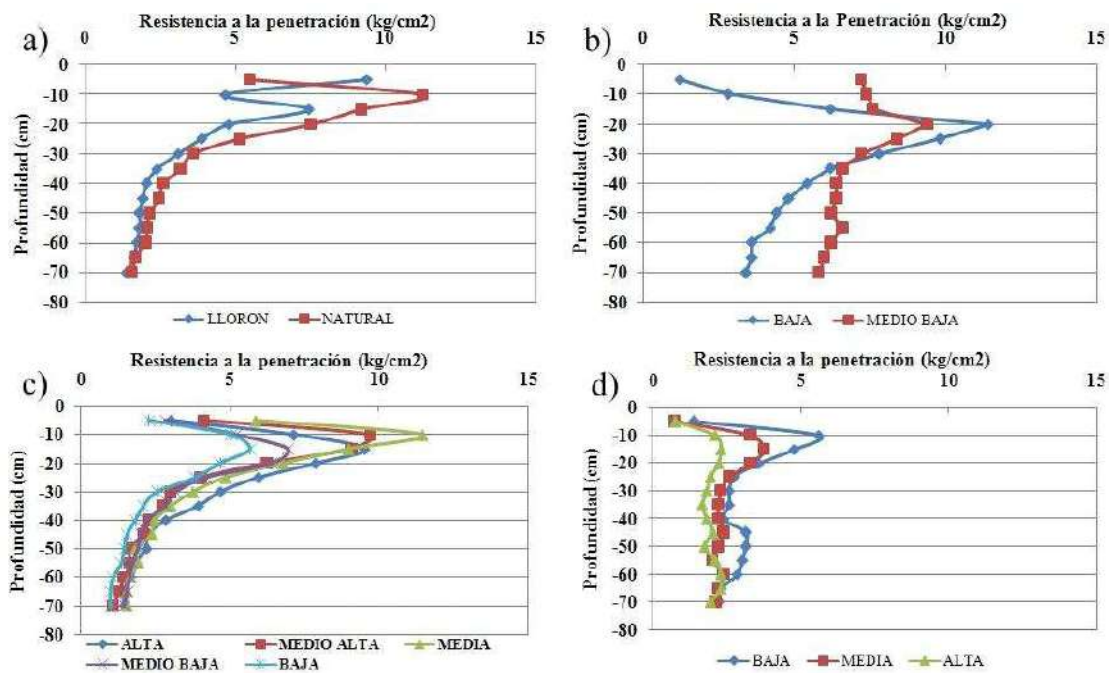


Figura 4.3. Esquematización de la resistencia a la compactación en el perfil bajo cuatro manejos distintos: a) Pastizal natural y pastura; b) agrícola; c) Camellones siguiendo las curvas de nivel; y d) Bosque de caldén, en la Estancia La Primavera.

4.3. Análisis de la dinámica del agua del suelo

A partir de los contenidos de humedad gravimétrica determinados para los tres sitios de estudio y del registro de la tensión de succión de suelo en los sitios de pendiente y de camellones a nivel, se confeccionaron gráficos de la marcha de la humedad de suelo en los tres ambientes en conjunto con la precipitación ocurrida para el mismo período.

Las observaciones de humedad (Fig. 4.4) y tensión del suelo (Fig. 4.5) comenzaron luego de la época de mayor lluvia en el verano y otoño respectivamente. Los valores más elevados de humedad de suelo determinada por el método gravimétrico se registraron en la zona de prácticas agrícolas conservacionistas (CN), valores medios en el bosque (B) y valores menores en la zona de pendiente con pastizal (P). A partir de esa fecha, comenzó un período con escasas precipitaciones a excepción de las ocurridas en el mes de abril, que elevaron el contenido de humedad en todos los sitios. Posteriormente, se sucedió un importante período sin precipitaciones hasta los primeros días de agosto. En este lapso, los contenidos de humedad decayeron rápidamente en la zona de bosque y pastizal por debajo del punto de marchitez permanente ($PMP_P = 12\%$, $PMP_B = 14\%$), por el contrario, en la zona con camellones siguiendo las curvas de nivel, el contenido de humedad disminuyó más lentamente, manteniéndose varias semanas

después de la última lluvia con valores de humedad dentro del rango de agua útil para las plantas ($PMP_{CN}= 14\%$). En el mes de agosto, las precipitaciones de gran magnitud elevaron los contenidos de humedad de los sitios estudiados hasta principios de septiembre resultando en valores superiores a la capacidad de campo ($CC_P= 19\%$, $CC_{CN}= 21\%$, $CC_B= 21\%$). Posteriormente, los muestreos de septiembre y octubre mostraron valores de humedad de suelo algo menores aunque en capacidad de campo, a excepción del bosque que registró menores valores.

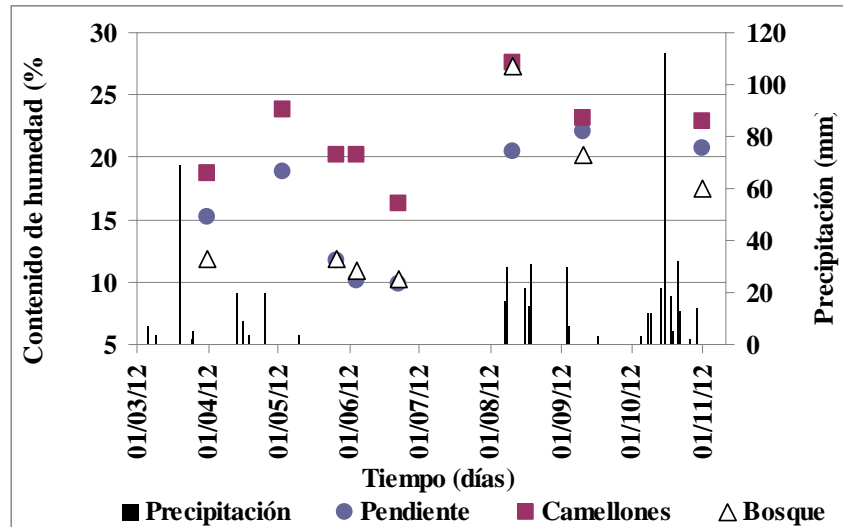


Figura 4.4. Evolución del contenido de humedad del suelo y las precipitaciones en Estancia La Primavera.

La tensión del suelo mostró para la época sin precipitaciones, un comportamiento diferencial. Mientras que para la zona con prácticas agrícolas conservacionistas los valores se mantuvieron relativamente constantes con un leve aumento hacia el final de este período, un drástico aumento de la tensión de suelo se registró en la zona de pendiente con pastizal. En el mes de agosto, las precipitaciones de gran magnitud disminuyeron los valores de tensión en ambos sitios hasta principios de septiembre. Posteriormente se verificó el comportamiento anteriormente descrito, un marcado aumento de la tensión en la zona de pendiente mientras que los valores de tensión de suelo se mantuvieron o aumentaron lentamente en la zona de camellones. Finalmente, se observa una rápida respuesta de la tensión de suelo en la zona de pendiente a las precipitaciones de octubre. Dicho comportamiento no fue observado en la zona de camellones presumiblemente debido a la pérdida de agua de suelo por la siembra de maíz en octubre.

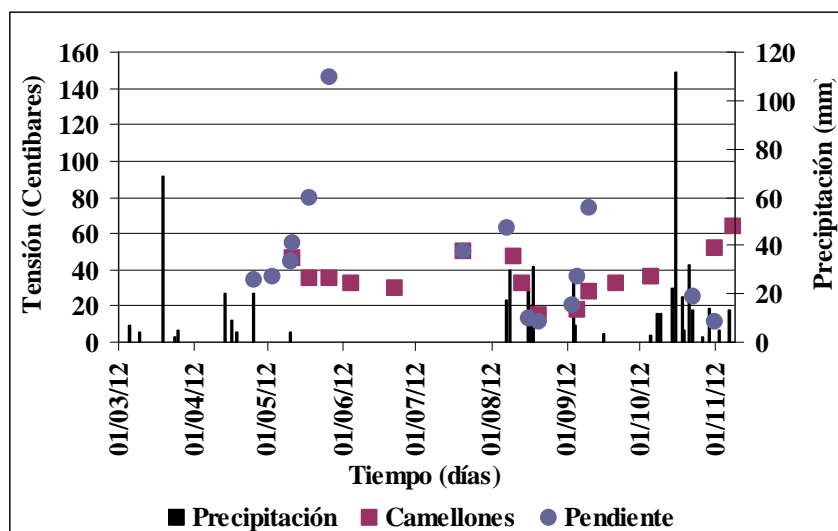


Figura 4.5. Marcha de la Tensión del suelo y las precipitaciones en la pendiente con pastizal y la zona de cultivo con camellones siguiendo las curvas de nivel.

4.4. Balance hídrico

La resolución del balance hídrico de suelo en la zona donde se analizó la escorrentía superficial tuvo por finalidad relacionar eventos particulares de escorrentía con el contenido de humedad del suelo, dada la baja frecuencia de toma de datos de humedad y la ausencia de registros entre los meses de diciembre y marzo.

La reserva de agua útil para una profundidad de suelo (h) seleccionada de 0.8 m y una densidad aparente (da) de 1.25 kg/cm^3 , se determinó en 70 mm como se detalla a continuación:

$$RAU = (CC - PMP) \cdot da \cdot h = (0.19 - 0.12) \cdot 1.25 \cdot 0.8\text{m} = 0.07\text{m} = 70 \text{ mm}$$

El balance se planteó siguiendo la metodología de Thornthwaite y Mather (1955) donde la generación de excedentes y déficits resultan cuando se satisface o se vacía el volumen de la RAU, respectivamente. La evolución de la RAU (Fig. 4.6) coincidió en la mayoría de los casos con el contenido de humedad de suelo obtenido por el método gravimétrico, a excepción de períodos próximos a eventos de precipitación donde el suelo poseía contenidos que superaban los valores de capacidad de campo. Cuando la determinación de la humedad de suelo resultó inferior al punto de marchitez, el valor se asumió igual a cero. Los períodos de mayor precipitación generaron una mayor disponibilidad de agua en el suelo, en ocasiones con excesos en los meses de enero, marzo, agosto y octubre. Contrariamente, en los períodos sin precipitación la RAU fue descendiendo paulatinamente hasta agotarse en los meses de noviembre-diciembre de

2011 y en junio-julio de 2012. Los períodos con disponibilidad de agua en la reserva del suelo, se extendieron desde enero a mayo y de agosto a octubre.

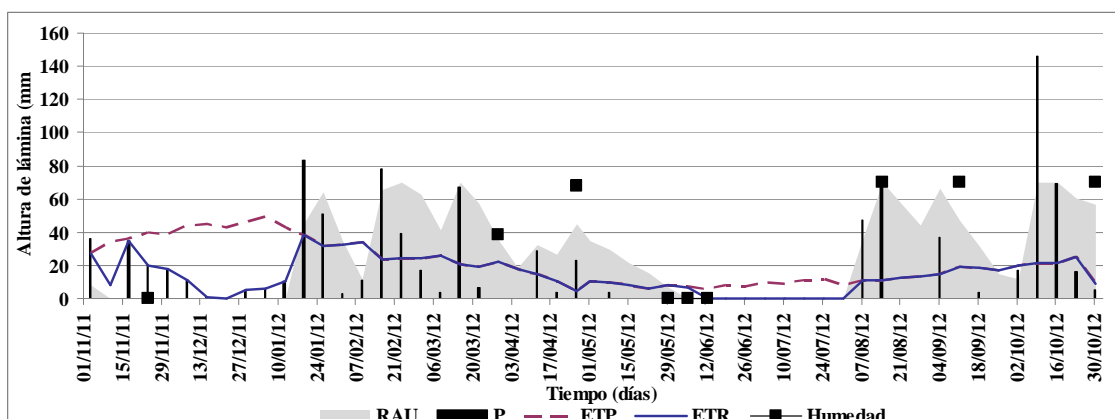


Figura 4.6. Balance hídrico del suelo en el ambiente de pendiente con pastizal y cultivos en la Estancia La Primavera.

4.5. Análisis de generación de escorrentía en zona de pendiente con pasturas

El análisis de los eventos de lluvia-escorrentía y los factores con mayor influencia en la respuesta hidrológica se determinó fundamentalmente a partir de la relación entre hietogramas e hidrogramas, y las condiciones antecedentes de humedad del suelo. De esta manera, se evaluó las características de los eventos pluviométricos como su duración e intensidad y la precipitación acumulada durante los días previos al evento de escorrentía.

En la Tabla 4.3 se ilustran las principales características de los eventos de lluvia-escorrentía, donde se detallan el pico de escorrentía, el total de de precipitación, y las lluvias en los días previos a dicho evento. En particular, se seleccionó el total acumulado en los 5 y 10 días previos a los efectos de dos situaciones que potencialmente modifiquen la respuesta hidrológica. La consideración de períodos antecedentes más extensos se asume no relevante.

Tabla 4.3. Caracterización de eventos de escorrentía en la Estancia La Primavera y de sus correspondientes eventos pluviométricos.

Fecha	Precipitación (mm)	Lluvia antecedente 5 días (mm)	Lluvia antecedente 10 días (mm)	Intensidad Máxima (mm/h)	Pico de escorrentía (mm)
23-ene	48	32	42	100,0	172
29-ene	17	3	81	23,9	205
30-ene	17	17	98	49,7	75
31-ene	17	34	115	96,1	162
16-feb	15	30	30	41,1	106
18-feb	30	59	59	18,4	290
27-feb	20	19	63	19,6	259
19-mar	35	0	0	95,7	291
19-mar	14	35	37	30,2	244
19-mar	18	49	47	40,5	106
16-ago	22	0	48	50,4	50
17-ago	15	22	70	27,4	100
17-ago	31	37	107	5,7	140
03-sep	30	0	0	10,8	56
04-sep	7	30	30	6,2	103
14-oct	22	12	27	7,0	164
15-oct	114	24	46	67,8	294
18-oct	19	134	46	50,4	271
21-oct	21	24	58	76,1	274
22-oct	11	56	90	10,8	82

A partir de los datos de escorrentía obtenidos por el limnógrafo digital ubicado en la zona de pendiente con pastizal, y los datos de intensidad de precipitación provistos por el Radar Meteorológico, se confeccionaron los hidrogramas de escorrentía con sus respectivos hietogramas para 17 eventos de precipitación con un paso temporal de 10 minutos. El análisis se abordó agrupando los eventos estacionalmente, de esta manera se analizaron eventos de verano, de invierno y de primavera.

4.5.1. Eventos de verano

La combinación de intensidad de precipitación y condiciones antecedentes de humedad, determinan respuestas hidrológicas diferenciales. La generación de escorrentía en el período estival se observó por primera vez el 23 de enero, luego de una tormenta de 48 mm de precipitación total, con una intensidad máxima de lluvia de 100 mm/h para una duración de 10 min, que resultó en un pico de escorrentía de 172 mm (Fig. 4.7a). Dicho valor de escorrentía, dado la posición del sensor, determina que fue

un evento de escorrentía subsuperficial. La generación de escorrentía (comienzo de la rama ascendente) se verificó 30 min después del intervalo de máxima intensidad inicial. La continuación de la lluvia con una baja intensidad mantuvo aunque con un descenso la escorrentía que volvió a aumentar inmediatamente en respuesta a los intervalos de intensidad de precipitación de aproximadamente 20 mm/h. Previo a esta tormenta y bajo condiciones de humedad baja, ocurrió el 21 de enero una precipitación de 30 mm que no generó escorrentía pero si implicó el cambio de la condición antecedente. En las Figuras 4.7b y g se observa que varios pulsos consecutivos de precipitación de intensidad menor a 20 mm/h generaron escorrentía 50 min y 20 min luego de iniciada la precipitación respectivamente. En cada caso los picos de escorrentía superficial se registraron 60 min y 40 min luego del comienzo de la precipitación. De igual manera se observa en la Figura 4.7f, que se genera escorrentía superficial importante a pesar de la baja la intensidad de precipitación pero con una alta condición antecedente de humedad dadas por las lluvias de los tres días previos. Por otra parte, bajo condiciones de humedad igualmente altas, lluvias de menor o igual magnitud pero con hietogramas generalmente de menor duración, registraron hidrogramas de escorrentía subsuperficial con picos menores a 170 mm (Figura 4.7c., Figura 4.7d. y Figura 4.7e.).

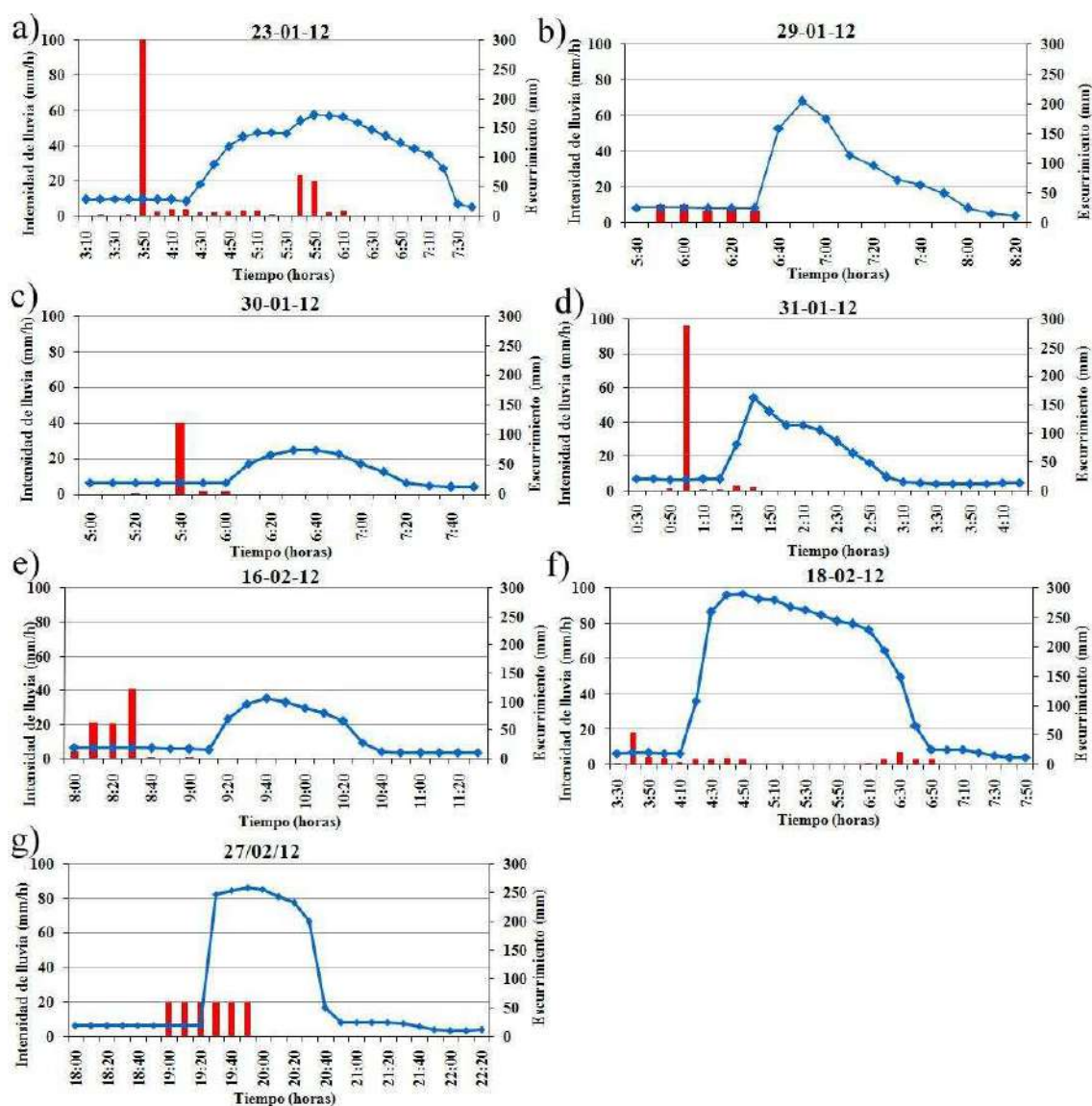


Figura 4.7. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial de los eventos: a) 23/01/2012; b) 29/01/2012; c) 30/01/2012; d) 31/01/2012; e) 16/02/2012, f) 18/02/2012 y g) 27/02/2012, en la Estancia La Primavera.

Un evento particular correspondió al 19 de marzo, Figura 4.8, donde bajo condiciones iniciales de humedad medias se produjo un hidrograma con tres picos, todos ellos asociados a alta intensidad de lluvia y en algunos casos, a la alta magnitud del evento pluviométrico. Dos de estos picos correspondieron a eventos de escorrentía superficial y generaron a su vez las condiciones de saturación para eventos posteriores.

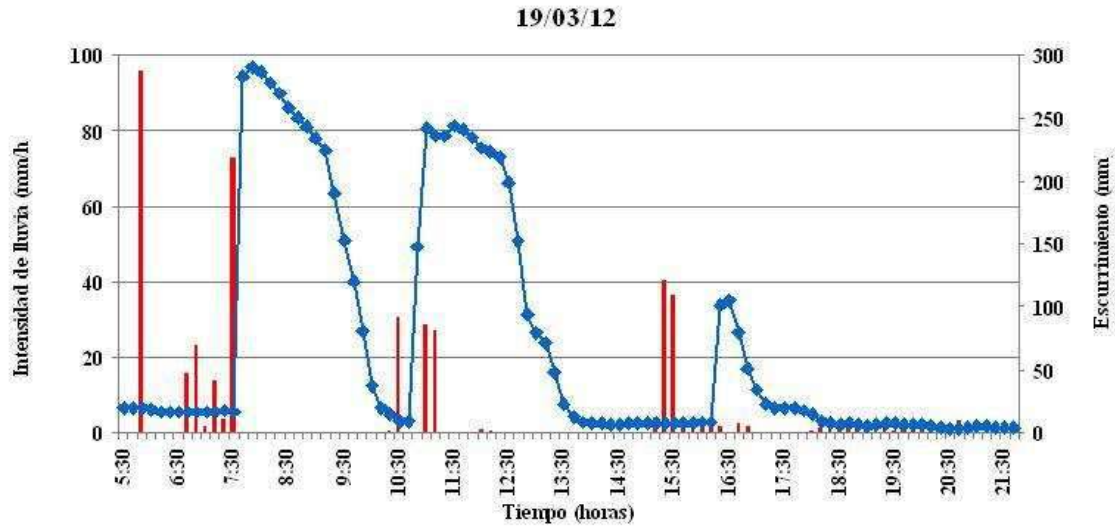


Figura 4.8. Hidrogramas de escorrentía subsuperficial y superficial del día 19/03/2012 en la Estancia La Primavera.

4.5.2. Eventos de invierno

Los eventos de escorrentía registrados en invierno fueron los originados al final del mismo como respuesta a las precipitaciones ocurridas en el mes de agosto, luego de un periodo 3 meses sin precipitaciones. Se caracterizan por ser repuestas a precipitaciones de relativa baja intensidad aunque de duraciones mayores a las observadas en verano.

Las lluvias del 7 y 8 de agosto de 17 y 30 mm respectivamente no generaron escorrentía aunque si contribuyeron a la recarga del perfil del suelo. Posteriormente, se destaca la tormenta del 16 al 18 de agosto, que generó tres hidrogramas de escorrentía subsuperficial definidos (Figs. 4.9a, b y c). Se destaca el día 18, el efecto de las condiciones antecedentes altas, ya que con un hietograma de intensidades menores a 10 mm/h aunque de mayor duración, resultó en un pico de escorrentía de 140 mm y mayor a los registrados en los dos días previos. Similarmente, en el mes de septiembre luego de dos tormentas consecutivas, que totalizaron 30 mm en los días 3 y 4 (Figs. 4.9d y e) se observa un pico de escorrentía subsuperficial que se incrementa luego del segundo evento alcanzando un valor máximo de 106 mm.

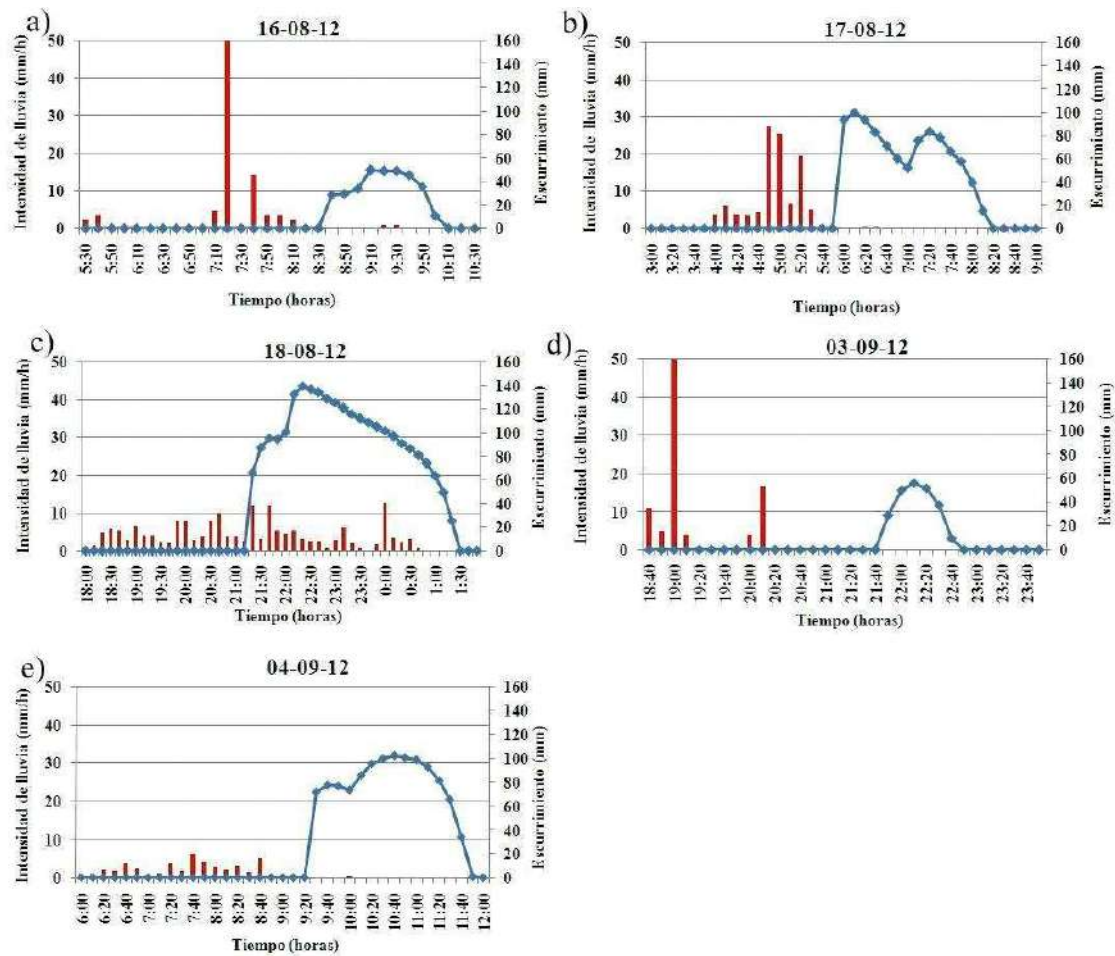


Figura 4.9. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial de los eventos: a) 16/08/2012; b) 17/08/2012; c) 18/08/2012; d) 03/09/2012 y e) 04/09/2012, en la Estancia La Primavera.

4.5.3. Eventos de primavera

Los eventos de escorrentía registrados en la primavera fueron respuesta a precipitaciones de intensidad y duración variable cuando las condiciones antecedentes de humedad lo permitieron. Estas situaciones se asemejaron más a las presentadas en el verano. Por ejemplo las precipitaciones del 5, 8 y 9 de octubre que totalizaron 3, 12 y 12 mm respectivamente, no generaron escorrentía.

En la Figura 4.10 se observa un hidrograma para una tormenta de gran duración, magnitud y con pulsos de alta intensidad. El primer evento de escorrentía subsuperficial se observó a la mañana, presentó una rama ascendente poco pronunciada en respuesta a una tormenta de baja intensidad aunque con condiciones antecedentes de humedad alta debido a las precipitaciones del día anterior y las previamente mencionadas de los días 5, 8 y 9 de octubre. En cambio, una respuesta mucho más inmediata y con escurrimiento superficial se observó esa misma tarde (Fig. 4.10) como consecuencia de un evento de precipitación de intensidad y duración importante.

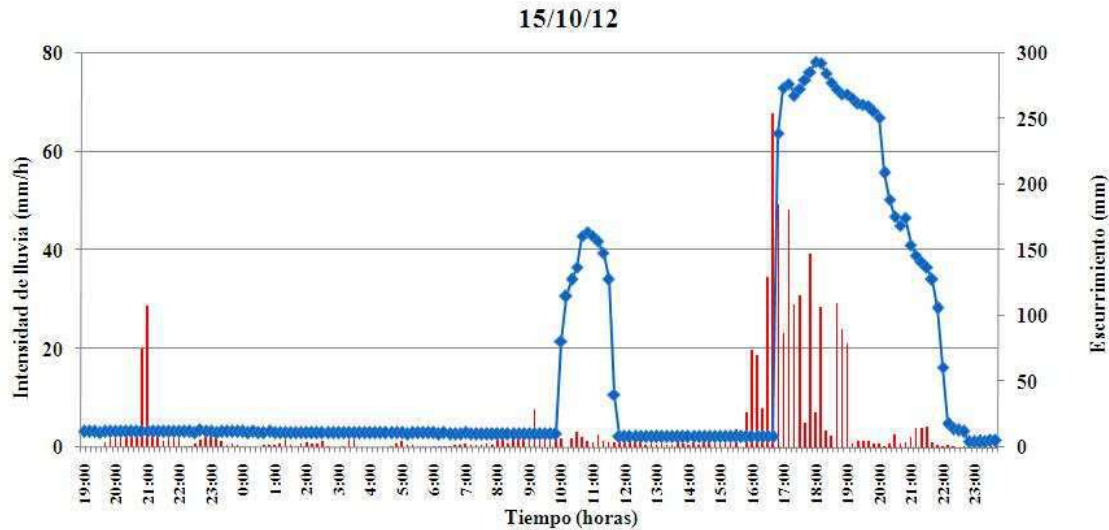


Figura 4.10. Hidrogramas de escorrentía subsuperficial y superficial del evento del día 15/10/2012 en la Estancia La Primavera.

Las Figuras 4.11a y b presenta un comportamiento similar con picos de escorrentía superficial mayores a 50 mm. La tormenta de menor intensidad y magnitud del día 22 de octubre (Fig. 4.11c), generó un pico de escorrentía subsuperficial menor a 100 mm.

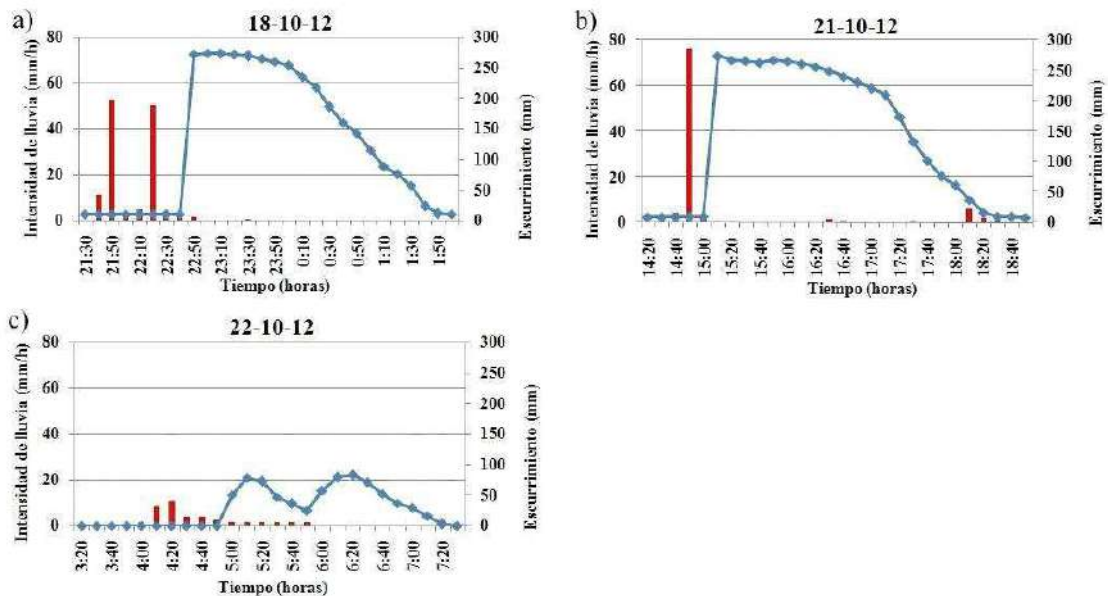


Figura 4.11. Hidrogramas de escorrentía superficial y subsuperficial de los eventos: a) 18/10/2012; b) 21/10/2012 y c) 22/10/2012, en la Estancia La Primavera.

4.5.4. Relación lluvia-escorrentía.

De la caracterización de los eventos de escorrentía y su relación con los respectivos hietogramas de precipitaciones y las condiciones antecedentes de humedad

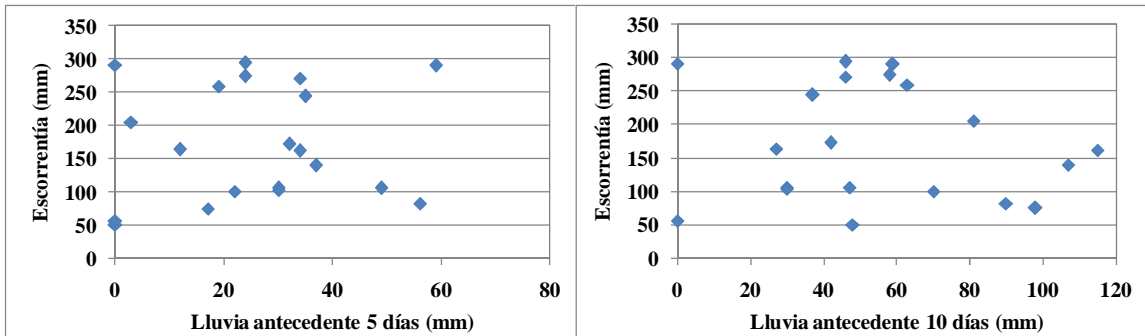


Figura 4.13. Relación entre lluvia antecedente en los cinco días previos y pico de escorrentía (izquierda) y relación entre lluvia antecedente en los diez días previos y el pico de escorrentía (derecha) en el ambiente de pastizal en pendiente.

La intensidad de lluvia es un parámetro reconocido como un factor importante en la generación de escorrentía en regiones subhúmedas y semiáridas, donde es frecuente la generación de un flujo hortoniano dada la nula influencia de los niveles saturados. En el caso particular de la zona de pendiente con pastizal, tal como se observa en la Figura 4.14, se visualiza aunque no claramente, que la escorrentía superficial (>200 mm) se produjo con una intensidad máxima de más de 20 mm/h. Sin embargo, la dispersión de los valores no permite concluir acerca de un umbral de intensidad de precipitación para la generación de escorrentía.

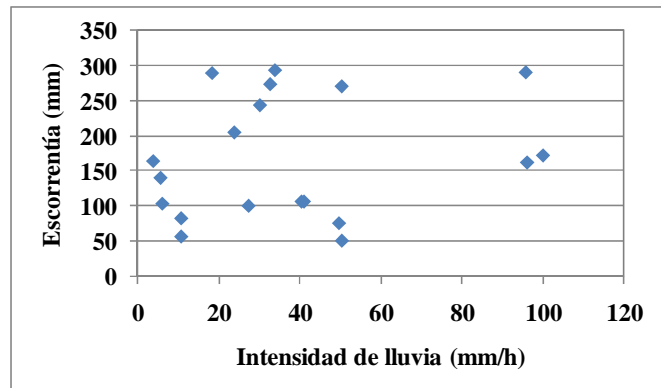


Figura 4.14. Relación entre pico de intensidad de lluvia y pico de escorrentía en el ambiente de pastizal en pendiente.

5. DISCUSIÓN

El análisis de las condiciones de cobertura vegetal, uso del suelo y topografía permitió caracterizar cada ambiente estudiado, para luego contrastarlo con los comportamientos hidrológicos observados durante el período de estudio. La combinación de tales factores, asociado a la dinámica temporal de las precipitaciones, determinó que la respuesta hidrológica tuviera una alta variabilidad temporal, de manera que resulta conveniente el análisis particular para cada sitio.

Respuesta hidrológica en zona de pendiente con pasturas y cultivos.

En este ambiente se registró la ocurrencia de escorrentía superficial. La mayor parte de los eventos se asocia con condiciones de humedad antecedente altas, aunque la respuesta hidrológica dependió de otros factores como la intensidad o la magnitud del evento pluviométrico. La generación de escorrentía en esta zona se ve afectada por el manejo que incluye la falta de laboreo debido a la implantación de una especie gramínea perenne con una cobertura parcial con suelo desnudo entre matas, la cual favorece el sellado superficial del suelo. Este sellado provoca la disminución de la infiltración que resultó ser la menor de los tres ambientes estudiados, con una conductividad hidráulica saturada ($K_s = 24 \text{ mm/h}$) y consecuente formación de escorrentía superficial. Dicho proceso se evidencia también a través de la presencia de cárcavas observadas en ese ambiente. Particularmente, tanto el área con pasto llorón con el de pastizal natural mostraron altos valores de compactación en los primeros 15 cm.

La evolución de la humedad y de la tensión de suelo evidencia una gran variabilidad en respuesta a las precipitaciones. En períodos sin precipitación la reserva de agua en el suelo decae drásticamente por debajo del PMP, mientras que luego de las lluvias el contenido de humedad supera la CC. Del análisis particular de los eventos de escorrentía se puede destacar que la combinación de la condición inicial del contenido de humedad del suelo y las características del evento de precipitación, generan un abanico de respuestas de distinta magnitud y duración. Se evidencia una respuesta asociada a pulsos individuales de alta intensidad de precipitación que superan el valor de la K_s , y a pulsos consecutivos de mediana intensidad pero bajo condiciones de humedad alta. En general, se registra la ocurrencia de escurrimiento subsuperficial en las primeras horas de una tormenta aislada, si las precipitaciones continúan o se intensifican es frecuente observar eventos de escorrentía superficial.

La presencia de períodos de excesos de precipitación resaltó la importancia de los manejos del suelo como factores implicados en la generación de escorrentía, dada la disminución de las tasas de infiltración generada por prácticas agrícolas de cultivos y pasturas y el efecto de la variación estacional de la cobertura vegetal en la intercepción de la precipitación. La evidencia de escorrentía superficial sugiere un efecto del manejo y la cobertura del suelo en la concentración de flujos en zonas particulares del relieve que se activan bajo condiciones de saturación. La ocurrencia de períodos sin precipitación vislumbra una importancia del manejo del suelo en la retención de humedad y la estabilidad temporal de tal parámetro, de tal modo que no descienda del punto de marchitez permanente.

Respuesta hidrológica en zonas con prácticas conservacionistas.

El análisis de la marcha de humedad y de la tensión de suelo evidencia en este ambiente una permanencia temporal de los valores para ambos parámetros, dentro de límites que se corresponden con la disponibilidad del agua útil en el suelo, aún durante largos períodos sin precipitación. Sin embargo, estas conclusiones se basan en observaciones puntuales y no continuas. La conductividad hidráulica saturada para este sitio ($K_s = 48 \text{ mm/h}$) es mayor que la determinada en la zona de pendiente sin prácticas conservacionistas, por lo tanto sólo se verificaría un flujo superficial hortoniano en aquellos casos en que K_s se vea superada por los pulsos de precipitación. Tal situación fue muy poco frecuente a lo largo del período de estudio. Las condiciones para la generación de escorrentía estarían dadas en aquellos casos en que se verifiquen eventos de gran intensidad de precipitación que logren superar este umbral de infiltración y bajo condiciones antecedentes de humedad de suelo altas. Sin embargo, la presencia de camellones a nivel, interrumpe la pendiente y contribuye a aumentar la detención superficial, lo cual facilita la infiltración y reduce, a pesar de mantener los valores de humedad de suelo, la posibilidad de generación y concentración del flujo superficial.

La no ocurrencia de escorrentía superficial fue evidenciada también mediante el análisis de imágenes satelitales y a través de la observación del estado de antiguas cárcavas, que actualmente se encuentran revegetadas.

Respuesta hidrológica del bosque de Caldén

En este ambiente la marcha de la humedad de suelo posee un comportamiento muy disímil respecto de los otros ambientes analizados. En períodos sin precipitaciones,

el contenido de humedad de suelo disminuyó a valores críticos por debajo del PMP, en mayor medida que la zona de pendiente con pasturas, presumiblemente debido al consumo de agua por parte de la vegetación. En períodos posteriores a las precipitaciones presenta valores altos del contenido de agua en el suelo similares al área de camellones a nivel, debido principalmente a la alta tasa de infiltración del suelo como consecuencia de la ausencia de laboreo. La combinación de factores como la abstracción de la precipitación por intercepción vegetal, la gran capacidad de infiltración del sistema suelo ($K_s = 120 \text{ mm/h}$) sería la condicionante de no generación de flujos de escorrentía superficial relevantes, a pesar que es el sitio de mayor pendiente. Sin embargo, existe una cárcava revegetada que evidencia la existencia de escurrimiento encausado probablemente con otra estructura boscosa.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el efecto del manejo y de atributos del paisaje sobre la respuesta hidrológica y la generación de escorrentía para una zona ondulada de la provincia de La Pampa.

El estudio mostró una respuesta hidrológica diferencial en los distintos ambientes a pesar que los mismos tienen aproximadamente la misma área de aporte y valores de pendiente. De esta manera, la combinación de uso de suelo, cobertura vegetal, topografía, contenido antecedente de humedad de suelo y características del evento de precipitación resultó en la generación de procesos de escorrentía.

En el sitio con pastura perenne y pastizal natural se evidenció la generación de escorrentía donde la condición antecedente de humedad del suelo mostró ser uno de los factores más influyentes en la generación de escorrentía. El balance hídrico del suelo indicó que los eventos de lluvia-escorrentía se produjeron en momentos donde la reserva se encontraba completa o con un contenido alto de agua en el suelo, para una de eventos pluviométricos de distinta magnitud, intensidad y duración. La ocurrencia de compactación en los primeros centímetros del perfil de suelo y la consecuente menor capacidad de infiltración, determinaron que la escorrentía se produzca a partir de la combinación de dos mecanismos de generación. De tal forma, se produce escorrentía por exceso de precipitación durante eventos de gran intensidad y por exceso de saturación en los primeros centímetros del suelo, que resultan en la generación de flujos de escorrentía subsuperficial y superficial dependiendo de la duración de la lluvia. La dominancia de uno u otro mecanismo no es del todo clara, aunque manifiestan una estrecha coexistencia. Además, no se vislumbró un umbral definido de precipitación para la generación de escorrentía, lo que sustenta la dependencia de varios factores concurrentes.

En zonas de bosque de caldén y de prácticas agrícolas conservacionistas, la cobertura vegetal y el manejo, son los factores más importantes que evitan la generación de escorrentía favoreciendo la interceptación vegetal y la infiltración, y que resulta en una predominancia de movimientos verticales por sobre los movimientos horizontales del agua.

Se observa una marcada variación de la infiltración asociada al manejo, donde los altos valores registrados en la zona con bosque de caldén se ven notablemente reducidos en las áreas con prácticas agrícolas, fundamentalmente en aquellas sin manejo

conservacionista. Los resultados de los ensayos de infiltración y compactación resaltan el rol hidrológico de las formaciones boscosas en la reducción de la escorrentía y la influencia del manejo, como la construcción de camellones a nivel, que favorece la conservación de agua en el suelo, y constituyen una alternativa de manejo por sus efectos positivos en la reducción de la escorrentía y la detención del proceso de erosión hídrica.

Se concluye que la agricultura modifica las propiedades físicas del suelo y que ello influye notablemente en su dinámica hidrológica resultando en una disminución de la infiltración por compactación y una mayor dominancia del escurrimiento superficial. Además, la heterogeneidad espacial del paisaje debido a los distintos tipos de manejo, resulta en una mayor variación espacio-temporal de la dinámica de dichos procesos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Adema E., F. J. Babinec, D. E. Buschiazzo, M. J. Martín y N. Peinemann. (2001). Pérdida de nutrientes por erosión hídrica en dos suelos del caldenal pampeano. *Ciencia del suelo* 19 (2) 2001.
- Allen, R.G.; Smith, M.; Perrier, A. & Pereira, L.S. (2004). An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bull.* 43 (2), 1-34.
- Avecilla F. (2011). Estimación de la fracción de lluvia interceptada por Chuquiraga erinacea en montes nativos del semiárido de La Pampa. Tesina de Grado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, 34 p.
- Beven, K. (2002). Runoff production in semiarid areas. In: *Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. Bull, L. and Kirkby, M. (Eds.). 57-116. John Wiley, Chichester, U.K..
- Bienes R., J. Guerrero Campo, J. Aroca, B. Gómez, J. Nicolau y T. Espigares. (2001). Evolución del coeficiente de escorrentía en campos agrícolas del centro de España con diferentes usos de suelo. *Ecología*, 15: 23-36
- Burch, G.J., R.K. Bath, I.D. Moore, and E.M. O'Loughlin. (1987). Comparative hydrological behaviour of forested and cleared catchments in southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, 90:19-42.
- Buss, R.; N. Secco y P. Dornes. (2011). Análisis de la distribución espacial de la precipitación en la provincia de La Pampa. En: *Actas del XXIII Congreso Nacional del Agua 2011*. 333-343. Resistencia, Chaco, Argentina.
- Burt, T. and M. Slattery. (2006). Land Use and Land Cover Effects on Runoff Processes: Agricultural Effects. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Anderson, M.(Ed). 1857-1868. John Wiley, Chichester, U.K.
- Casagrande, G y H. Conti. (1980). "Clima". En: *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa*. INTA, Gob. de La Pampa y UNLPam (Eds.). p. 19-32. Buenos Aires, Argentina.

- Casagrande, G.; G. Vergara y Y. Bellini (2006). Cartas agroclimáticas de temperaturas, heladas y lluvia de la provincia de La Pampa. Revista de la Facultad de Agronomía, 17 (1): 15-22.
- Castiglioni, M., C. Chagas, M. Massobrio, O. Santanatoglia y A. Buján. (2006). Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. Ciencia del Suelo 24: 169-176.
- Castillo V., A. Gómez Plaza, M. Martínez Mena y J. Albaladejo. (2000). Respuesta hidrológica en medios semiáridos: Las cuencas experimentales del Picarcho, Murcia, España. Cuadernos de investigación científica, 26: 81-94.
- Castillo V., A. Gómez Plaza y M. Martínez Mena. (2003). The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. Journal of Hydrology, 284:114-130.
- Chirino E., J. Bellot, A. Bonet y J.M. Andreu. (2003). Efecto de diferentes tipos de cubierta vegetal en el control de la erosión en clima Semiárido. SE- España. EDAFOLOGÍA, 10 (3): 39-48.
- Esmoriz G, y F. Serrano. (2011). Factores determinantes en generación de la escorrentía en una microcuenca agrícola en la Región Central de Córdoba. En: Actas del XXIII Congreso Nacional del Agua. 60-67. Resistencia, Chaco.
- Fiener, P., K. Auerswald and K. Van Oost. (2011). Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments – a review. Earth-Sci.Rev. 106: 92-104.
- Food Agricultural Organization (FAO). (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. Roma, FAO. Boletín de Suelos N° 79, 131 p.
- Gatto Cáceres, R. y P. Dornes (1996). “Precipitaciones Pluviales en La Pampa. Aporte al Estudio de su Distribución Espacial”. XVI Congreso Nacional del Agua. 19-22 Noviembre. San Martín de los Andes, Neuquén. Argentina. Trabajo N° 136.

- Giai, S.B. y G. Visconti. (2002). Notas sobre el comportamiento hidrogeológico de la tosca. *Groundwater and Human Development*. Bocanegra, E. Martínez, D., Mazzone, H.(Eds). 645-651. Mar del Plata, Argentina.
- Giraut, M., Lupano, C., Schulz, C y Rey, C., 2006. “Cartografía hídrica superficial de la Provincia de La Pampa”. En: IIIº Congreso de la Ciencia Cartográfica – Xº Semana Nacional de Cartografía, 12 pp. Buenos Aires, Argentina.
- Grayson, R.B., Western, A.W., Chiew, F.H.S., Blöschl, G., 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. *Water Resources Research* 33 (12), 2897–2908.
- Green, T., L. Ahuja and J. Benjamin. (2003). Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 116: 3–27
- Grimm A., V. Barros y M. Doyle (2000): Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13:35-58.
- Kruse, E. y E. Zimmermann. (2002). Hidrogeología de Grandes Llanuras. Particularidades en la Llanura Pampeana (Argentina). En *Groundwater and Human Development*. Bocanegra, E. Martínez, D. y Mazzone, H. (Eds). 400: 2025–2038. Mar del Plata, Argentina.
- Kruse, E. y P. Laurencena. (2005). Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. En: *Geología y recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires*. (Eds.). 313-326. Buenos Aires, Argentina.
- Linares, E., E. J. Llambías y C. O. Latorre, 1980. Geología de la provincia de la Pampa, República Argentina y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, XXXV(1): 87-146.
- Malán, J. M. y E. Mariño. (1999). Impacto de las características geomorfológicas sobre la infiltración eficaz y la calidad del agua en un sector del sureste pampeano. En:

Actas Primer Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, 35-38. Santa Rosa.

Martínez Uncal, M. (2005). Estudio de algunas propiedades de un suelo de la región del caldenal, con distintos sistemas de manejo. Tesina de Grado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa, 72 p.

Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 193(1032), 120-145.

Peña Zubiate C., D. Maldonado Piñedo, H. Martínez y R. Hevia (1980). "Suelos". En: Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. INTA, Gob. de La Pampa y UNLPam (Eds.). p. 300-301. Buenos Aires, Argentina.

Quiroga, A. (1994). Influencia del manejo sobre las propiedades de los suelos. Su relación con la granulometría y contenidos de materia orgánica. Tesis MSc. UNS, Bahía Blanca.

Quiroga, A.R. y H.A. Paccapelo. (1988). Fertilización nitrogenada en Trigo: influencia sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua. Región semiárida pampeana. UNLPam, Rev. Fac. De Agronomía, 3 (1): 57-67. Santa Rosa.

Quiroga A., D. Funaro, R. Fernández y Noellemeyer E. (2005). Factores edáficos y de Manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la Región Pampeana. Ciencia del Suelo, 23 (1): 79-86.

Salazar Lea Plaza J. (1980). "Geomorfología". En: Inventario Integrado de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. INTA, Gob. de La Pampa y UNLPam (Eds.). p. 295. Buenos Aires, Argentina.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS). (2006). Estado de Conservación del Distrito Caldén. En: Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Segunda Etapa. Inventario de Campo de la Región Espinal Distritos

Ñandubay y Caldén. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (eds). p. 1. Buenos Aires, Argentina.

Serrano Muela P., D. Regués, J. Latrón, C. Martí Bono, N Lana Renault y E. Nadal Romero (2005). Respuesta hidrológica de una cuenca forestal en la montaña media pirenaica: El Caso de San Salvador. Cuadernos de Investigación Científica, 31: 59-76.

Thornthwaite, C. W. y J. R. Mather, (1955). The water balance. Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, VIII(1):104 p, New Jersey.

Viglizzo. E., Z. Roberto, F. Lértora, E. López Gay, y J. Bernardos. (1997). Climate and land use change in field-crop ecosystems of Argentina. Agriculture, Ecosystems and Environment, 66: 61-70.

Vogt, T., O. Carballo y A. P. Calmels.(1999). Un esbozo de explicación de la génesis de las toscas de la meseta de La Pampa. En: Actas Primer Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, 195-205. Santa Rosa.

Western, A. and R. Grayson. (1998). The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics and hydrological flux measurements. Water Resour. Res., 34(10): 2765–2768.

Zárate, M. (2007). South American Loess record. In: Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier Science. 1466-1479

Zhang Xiaoming, Cao Wenhong, Guo Qingchao, and Wu Sihong (2010). Effects of land use change on surface runoff and sediment yield at different watershed scales on the Loess Plateau. International Journal of Sediment Research, 25: 283-293.

8. ANEXOS

Anexo I. Datos de precipitación del período de estudio.

Tabla A1. Precipitaciones del segundo semestre de 2011 para la Estancia La Primavera.

Día	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1							
2							
3					21	18	
4							
5				2			
6					15		
7				10			
8							
9				31			
10						11	
11				4			
12				38			
13							
14							
15	1,5	8					
16							
17							
18	24				16		
19							
20					19	1	
21							
22							
23			7				
24							
25	2						
26							
27					20		
28							
29						1	
30							
31							
Total	27,5	8	7	85	91	31	248,5

Tabla A2. Precipitaciones en 2012, en la Estancia La Primavera.

Día	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1													
2	4										5	9	
3									30				
4		3							7				
5			7							3		28	
6											13	11	
7								17			4		
8					1			30		12			
9			4							12			
10	6				4								
11													
12													
13				20									
14		11								22			
15		19						22		112			
16		15		9				15	3,5				
17	10	14						31					
18	2	30		4						19			
19			67							5			
20											2	4	
21	30									32	10	2	
22										13			
23	48												
24	3		2										
25		19	5	20									
26										2			
27		20											
28													
29	17	10								14			
30	17										32		
31	17											6	
Total	154	141	85	53	5	0	0	115	41	246	66	60	965,5

Anexo II. Imágenes de los sensores instalados y la medición realizada.



Figura A1. Ubicación del sensor piezo-resistivo del limnígrafo instalado en el ambiente de pastizal y cultivos.



Figura A2. Aparato registrador del limnígrafo instalado y sensor de tensión del suelo Watermark.



Figura A3. Ubicación y toma de datos del tensiómetro localizado en el ambiente de cultivos con prácticas agrícolas conservacionistas.



Figura A4. Pluviómetro ubicado en el sitio de bosque de caldén.

Anexo III. Ambientes estudiados

Área de pendiente con pastizal y cultivos



Figura A5. Área con pastizal y cultivos en pendiente.

Área bajo agricultura con prácticas conservacionistas



Figura A6. Sitio de cultivo bajo labranza en camellones siguiendo las curvas de nivel.

Área de Bosque de Caldén



Figura A7. Sitio Bosque de Caldén.

Anexo IV. Ensayos de infiltración



Gráfico A8. Ensayo de infiltración en el ambiente de pasturas y cultivos.



Gráfico A9. Ensayos de infiltración en sitios con prácticas agrícolas conservacionistas (izquierda) y bosque de caldén (derecha).

Tabla A3. Datos obtenidos del ensayo de infiltración en el área de pendiente con pastizal y cultivos.

Tiempo	Altura (cm)	Descenso (cm)	f (cm/min)	f(mm/h)
0	4			
2	4,9	0,9	0,45	240
4	5,1	0,2	0,1	36
6	5,4	0,3	0,15	90
8	5,7	0,3	0,15	90
10	6	0,3	0,15	90
12	6,2	0,2	0,1	60
14	6,4	0,2	0,1	60
16	6,5	0,1	0,05	30
18	6,7	0,2	0,1	60
20	6,9	0,2	0,1	60
25	7,3	0,4	0,08	48
30	7,7	0,4	0,08	48
35	8,1	0,4	0,08	48
40	8,4	0,3	0,06	36
45	8,6	0,2	0,04	24
50	9	0,4	0,08	48
55	9,4	0,4	0,08	48
60	9,6	0,2	0,04	24
65	9,9	0,3	0,06	36
70	10,2	0,3	0,06	36
75	10,5	0,3	0,06	36
80	10,8	0,3	0,06	36
85	11,1	0,3	0,06	36
90	11,3	0,2	0,04	24
95	11,5	0,2	0,04	24
100	11,7	0,2	0,04	24
105	12	0,3	0,06	36
110	12,2	0,2	0,04	24
115	12,4	0,2	0,04	24

120	12,6	0,2	0,04	24
125	12,8	0,2	0,04	24

Tabla A4. Datos obtenidos del ensayo de infiltración en el área de cultivos bajo labranza en camellones siguiendo las curvas de nivel.

Tiempo	Altura	Descenso (cm)	f (cm/min)	f(mm/h)
0	7,5	-		
0,5	7,8	0,3	0,6	360
1	8,2	0,4	0,8	480
1,5	8,3	0,1	0,2	120
2	8,4	0,1	0,2	120
3	8,7	0,3	0,3	180
4	9	0,3	0,3	180
5	9,3	0,3	0,3	180
6	9,6	0,3	0,3	180
7	9,8	0,2	0,2	120
8	10	0,2	0,2	120
9	10,2	0,2	0,2	120
10	10,4	0,2	0,2	120
12	10,7	0,3	0,15	90
14	11,1	0,4	0,2	120
16	11,4	0,3	0,15	90
18	11,7	0,3	0,15	90
20	12	0,3	0,15	90
22	12,2	0,2	0,1	60
24	12,5	0,3	0,15	90
26	12,7	0,2	0,1	60
28	13	0,3	0,15	90
30	13,2	0,2	0,1	60
35	13,8	0,6	0,12	72
40	14,3	0,5	0,1	60
45	14,8	0,5	0,1	60
50	15,3	0,5	0,1	60
55	15,6	0,3	0,06	36
60	16	0,4	0,08	48
65	16,4	0,4	0,08	48
70	11,5	-		
75	11,9	0,4	0,08	48
80	12,2	0,3	0,06	36
85	12,9	0,7	0,16	96
90	13,4	0,5	0,1	60
95	13,7	0,3	0,06	36
100	14,1	0,4	0,08	48
105	14,5	0,4	0,08	48

Tabla A5. Datos obtenidos del ensayo de infiltración en el área bosque de caldén.

Tiempo	Altura (cm)	Descenso (cm)	f (cm/min)	f(mm/h)
0	8			
1	9,1	1,1	1,1	660
2	9,6	0,5	0,5	300
3	10	0,4	0,4	240
4	10,4	0,4	0,4	240
5	10,8	0,4	0,4	240
6	11,1	0,3	0,3	180
7	11,4	0,3	0,3	180
8	11,7	0,3	0,3	180
9	12	0,3	0,3	180
10	12,3	0,3	0,3	180
12	12,9	0,6	0,3	180
14	13,5	0,6	0,3	180
16	14	0,5	0,25	150
18	14,5	0,5	0,25	150
20	15	0,5	0,25	150
22	15,5	0,5	0,25	150
24	16	0,5	0,25	150
26	16,5	0,5	0,25	150
28	17	0,5	0,25	150
30	17,4	0,4	0,2	120
35	18,7	1,3	0,26	156
40	19,8	1,1	0,22	132
45	11	1,2	0,24	144
50	12,5	1,5	0,3	180
55	13,9	1,4	0,28	168
60	15,1	1,2	0,24	144
65	16,5	1,4	0,28	168
70	17,7	1,2	0,24	144
75	19	1,3	0,26	156
80	20,2	1,2	0,24	144
85	16,6	1,2	0,24	144
90	17,9	1,3	0,26	156
95	19	1,1	0,22	132
100	20	1	0,2	120
105	21	1	0,2	120
110	22	1	0,2	120
115	12	1	0,2	120
120	13	1	0,2	120