

---

---

## Capítulo V

---

---

# Hidrología Experimental como Fuente de Información para el Manejo Integral del Agua en Cuencas Hidrológicas

Dr. José Luis González Barrios, Dr. Luc Descroix, Dr. Rodolfo Jasso Ibarra,  
Dr. Juan Estrada Avalos, Dr. Guillermo González Cervantes,  
Dr. Ignacio Sánchez Cohen, Dr. J. P. Vandervaere,  
M. C. C. Domergue, R. Solís

### CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	64
<b>MÉTODO DE APROXIMACIÓN</b>	65
Área de estudio y escalas espacio-temporales	65
Escala de parcela experimental	65
Escala de la pequeña cuenca vertiente	66
Escala de la subcuenca	68
Procesos estudiados	68
Precipitación pluvial	69
Evaporación	69
Escurrimiento	69
Infiltración y flujo subsuperficial	70
Erosión	70
Caracterización de compartimentos hídricos de la cuenca	72
Vegetación	73
Suelos de las vertientes	73
Materiales geológicos parentales	73
Cuerpos de agua superficial	73
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	74
<b>CONCLUSIONES</b>	81
<b>LITERATURA CITADA</b>	83

## INTRODUCCIÓN

El manejo integral del agua por cuencas es un tema prioritario en diversas regiones del mundo donde el agua es el principal factor limitante para el desarrollo productivo y económico.

En México, el manejo integral del agua por cuencas ha dado lugar desde finales del siglo XX a la organización de consejos de cuenca de los principales ríos con el afán de solucionar la compleja serie de problemas de abasto, calidad, saneamiento y costo del agua que plantean las necesidades hídricas de diversos sectores productivos y tipos de usuarios: agrícola, industrial, público urbano, etc.

El agua, recurso fundamental y motor del desarrollo económico de numerosas localidades del país, es un elemento cuya presencia depende de las condiciones del medio ambiente natural pero también de la influencia de las actividades humanas productivas. Por ello, el manejo integral del agua requiere conocimientos del medio biofísico y de los sistemas productivos que utilicen este recurso o influyan de manera determinante en su calidad y cantidad. La parametrización de cuencas productoras de agua es pues un asunto de primera importancia como fuente de información para el manejo integral del agua. Esos parámetros históricos y recientes deben ser, sin embargo, totalmente confiables para una buena gestión.

La observación paramétrica de cuencas productoras de agua no es muy antigua en México, y se circunscribe casi totalmente a la operación de gastos hidrológicos en los grandes ríos por parte de los organismos gubernamentales encargados de la generación de energía hidroeléctrica (Comisión Federal de Electricidad) o de la administración de reservorios de agua para la agricultura (Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).

Algunos procesos que condicionan la ocurrencia y el transporte del agua en las cuencas, como lluvia, escurrimiento superficial, Infiltración, percolación profunda, absorción hídrica de las plantas y evapotranspiración, son de gran importancia en la caracterización hídrica de las cuencas y en el establecimiento de sus balances hidrológicos.

Atmósfera, suelos, vegetación, cuerpos de agua y acuíferos son reservorios hídricos y compartimentos de la cuenca que son también útiles de observar y medir para realizar un diagnóstico más completo del funcionamiento de la cuenca productora de agua.

Esta publicación presenta los trabajos de hidrología y edafología experimental de la cuenca alta del río Nazas realizados por un equipo de investigación franco-mexicano (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

INIFAP) y el Instituto para la Investigación para el Desarrollo (IRD) para cuantificar los recursos hídricos que produce esa cuenca y para determinar los impactos hidrológicos más importantes que alteran la cantidad y calidad del agua que circula en ella.

Después de presentar a la cuenca de estudio, se abordarán sucesivamente las diferentes metodologías y procedimientos utilizados en estos trabajos de hidrología y edafología experimental. Un orden temático será útil para presentar los diferentes procesos analizados así como sus parámetros de respuesta y los compartimentos de la cuenca involucrados en la cuantificación de los recursos hídricos.

Cuando sea posible se expondrán los alcances y límites de los métodos utilizados así como las recomendaciones prácticas para mejorarlos.

## **MÉTODO DE APROXIMACIÓN**

### **Área de estudio y escalas espacio-temporales**

Los trabajos de hidrología y edafología experimental se llevaron a cabo en la cuenca alta del río Nazas que comprende tres subcuencas: Sardinias, Salome Acosta y Palmito, ubicadas al noroeste del estado de Durango (Figura 1); abarcando todas una superficie de 19076 km<sup>2</sup> dentro de los municipios de Santa María del oro, San Bernardo, Indé, Guanaceví, Tepehuanes y Santiago Papasquiari.

Las investigaciones se realizaron con diferentes escalas de espacio y de tiempo: desde la parcela experimental hasta la subcuenca, y desde un evento de lluvia de una hora hasta el balance hidro-climatológico multi-anual en el periodo de 1994 a 2006.

### **Escala de parcela experimental**

Cuatro sitios principales fueron seleccionados; dos en la zona de bosque y dos en la zona de pastizal. En ellos se instalaron: dos microcuencas de 450 m<sup>2</sup>; 13 parcelas de 50 m<sup>2</sup>; tres parcelas de 10 m<sup>2</sup> y 32 parcelas de 1m<sup>2</sup>, todo ello para tomar en cuenta la mayor variabilidad posible del medio biofísico. En estos sitios se hicieron mediciones con lluvias naturales tomando nota de las características de la lluvia, el escurrimiento superficial la infiltración y la erosión.

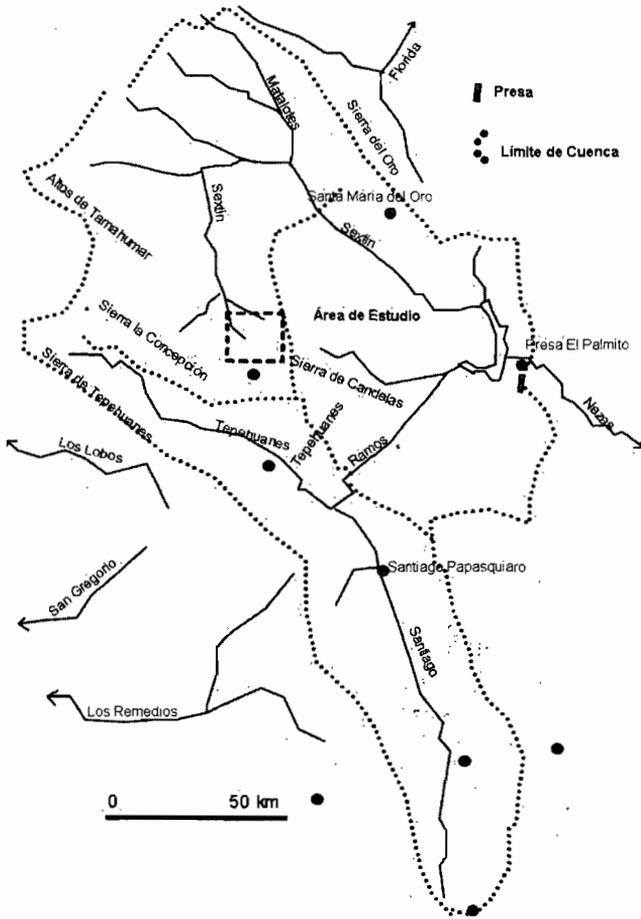
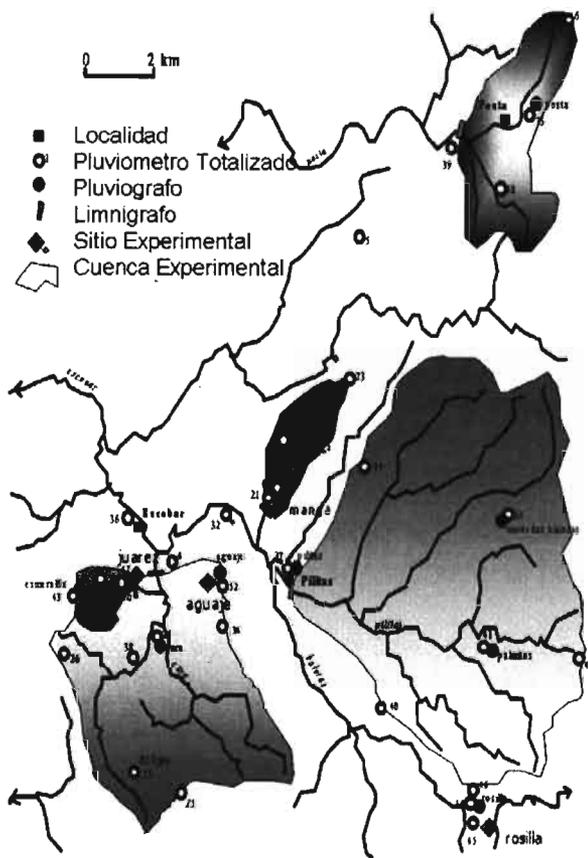


Figura 1. Cuenca Alta del río Nazas.

### Escala de pequeña cuenca vertiente

Se identificaron siete pequeñas cuencas vertientes de 1 a 50 km<sup>2</sup> para instrumentarlas y medir en ellas los procesos hidrológicos y edafológicos más importantes (pluviometría, infiltrometría, escurrimiento y erosión) así como para caracterizar los sistemas productivos representativos de la región (Figura 2).

Las pequeñas cuencas dispuestas en forma anidada a las parcelas y a las subcuencas sirvieron para estudiar los efectos de transferencia de escala.



**Figura 2. Pequeñas cuencas vertientes experimentales.**

Más de 150 eventos de lluvia pudieron ser registrados y sirvieron para observar y medir el comportamiento hidrodinámico en los suelos.

En aproximadamente 100 puntos de medición de las pequeñas cuencas vertientes se hicieron pruebas de interés hidrológico como la conductividad hidráulica a saturación utilizando uno o dos de los métodos siguientes:

- Infiltrometría con un cilindro de anillo único según el dispositivo propuesto por Roose et al., (1993) que permite medir el tiempo en que se infiltra una carga diferencial de agua que inicia en 10 cm.
- Infiltrometría de anillos y succiones múltiples (TRIMS), según el método propuesto por Vandervaere (1995) que permite medir el tiempo en que se

infiltra una carga de agua constante controlada con tres discos diferentes (4, 9 y 12 cm de radio) y cuatro fuerzas de succión (-100, -60, -30 y -10 mm).

En los puntos de medición se determinaron además otros parámetros complementarios para el transporte y almacenamiento del agua en el suelo tales como: densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, estado de superficie, pendiente y vegetación.

Para medir la calidad del agua *in situ* y en laboratorio se realizaron muestreos sistemáticos del agua de escurrimiento, de los presones o del manto freático en botellas plásticas, y se midieron sus características generales (Conductividad eléctrica, temperatura y pH). En laboratorio se llevó a cabo la caracterización química con los métodos analíticos clásicos implementados en el laboratorio de análisis del INIFAP CENID-RASPA (Plenecassagne *et al.*, 1997).

Los sitios experimentales y las pequeñas cuencas vertientes se seleccionaron en áreas representativas de la cuenca alta del río Nazas con base en sus condiciones naturales y socioeconómicas.

### **Escala de subcuenca**

Dos de las tres subcuencas de la parte alta del Nazas fueron seleccionadas con base en la presencia de estaciones de aforo funcionales de la Comisión Nacional del Agua y a la disponibilidad de este organismo para colaborar proporcionando los datos antiguos y recientes de las subcuencas: Salomé Acosta (7,128 km<sup>2</sup>) y Sardinas (4,660 km<sup>2</sup>).

Desde 1997-98 las mediciones de carga sólida en suspensión de las aguas de escurrimiento en estos dos puntos de aforo se realizan con la ayuda del organismo.

La red pluviométrica desplegada para abarcar estas escalas incluye 69 pluviómetros totalizadores, tres pluviómetros manuales, cinco pluviómetros electrónicos tipo Oedipe, nueve pluviógrafos Fuess y tres tanques evaporímetros tipo A internacional.

Los datos de teledetección satelital con imágenes Landsat y SPOT ayudan a completar los estudios de evolución de la cobertura forestal en el sector boscoso más importante de la cuenca alta del Nazas, donde cae la mayor cantidad de agua de lluvia en la cuenca.

### **Procesos estudiados**

Se utilizaron diferentes métodos y procedimientos para cuantificar parámetros de varios procesos estudiados:

## **Precipitación pluvial**

Para medir la lluvia y su repartición geográfica se utilizó la red pluviométrica arriba descrita, que abarca todos los niveles de escala estudiados y atraviesa la cuenca alta del río Nazas en un eje nor-suroeste, pasando por las pequeñas cuencas vertientes experimentales y sus áreas de influencia para cuantificar las lluvias durante períodos previamente definidos: anual, estacional, mensual, semana o diario. Cada pluviómetro se ubica con un GPS (Garmin 12XL) y con un altímetro (Victorinox 2003).

También se utilizaron los datos históricos y recientes de las estaciones de observación climatológica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua contenidos en la base de datos Eric II. (Quintas, 2000).

## **Evaporación**

Para medir la evaporación se utilizaron tres tanques evaporímetros tipo A internacional. También se anotaron las referencias comparativas de los niveles de dos presones (cuerpos de agua) que están sujetos también al proceso de infiltración y percolación profunda además de la absorción por las plantas y el abreviar del ganado.

## **Escurrimiento**

Para medir los volúmenes de escurrimiento se utilizaron métodos acordes a cada escala de estudio:

- En las parcelas, el escurrimiento fue medido en bidones de almacenamiento, con probetas y cubetas graduadas.
- En las pequeñas cuencas vertientes, el escurrimiento fue medido en secciones de aforo ubicadas en los puntos de salida de las cuencas en donde se implementaron pequeñas obras para facilitar la medición (Figura 3). Los gastos se midieron con un molinete (Global flow probe FO101-FP201). También se utilizaron medidores de flujo de tipo parshall para cuantificar los gastos hidrológicos de dos manantiales (Figura 4). También se utilizó un limnógrafo automático tipo Thalimides (OTT, 2003a) con respaldo de datos en memoria propia (figura 5) y varios limnógrafos mecánicos tipo Fuess F-1 instalados de manera permanente.
- En las subcuencas se utilizaron los aforos y cálculos proporcionados por el servicio de medición hidroclimatológica de la CNA en las estaciones Sardinias y Salomé Acosta.

## Infiltración y flujo subsuperficial

Para estudiar el comportamiento hidrodinámico al interior del suelo se implementaron pruebas de infiltración con cilindrometría tipo Roose e infiltrometría con TRIMS arriba descritos (Figura 6).

Para complementar estos parámetros se determinó la densidad aparente del suelo por medio de dos métodos: el de la barrena tipo sacabocados y el de la alberca o piscina en donde se mide el volumen y el peso que ocupa el suelo seco en gramos por centímetro cúbico (Figura 7). También se determinó la textura del suelo con los métodos de granulometría láser o pipeta de Robinson e hidrómetro de Bouyocus.

Para observar el manto freático y el flujo subsuperficial en una área contigua a dos manantiales se utilizó una red de 15 piezómetros ubicados en un transecto topográfico de aproximadamente 100 metros que atraviesa un arroyo permanente que drena un área de turba ubicada a cada lado del arroyo; también se utilizó un piezómetro automático modelo Orphimides (OTT, 2003b) capaz de registrar el nivel del manto freático cada seis horas almacenándolo en la memoria (Figura 8).

## Erosión

Para medir la erosión se utilizaron varios métodos que abarcan los niveles de escala estudiados:

- 57 parcelas de escurrimiento de 1 a 450 m<sup>2</sup> con diferentes estados de superficie (pendiente, rugosidad, pedregosidad, presencia y tipo de costra, cobertura y tipo de vegetación, presencia de mantillo, etc.).
- Seis cárcavas instrumentadas con estacas de referencia para el seguimiento evolutivo de sus avances complementado con un protocolo de fotografiado del proceso erosivo.
- Muestreo del agua de escurrimiento y determinación de sólidos suspendidos en ella en todas las instalaciones anteriores y en las dos estaciones de aforo de las subcuencas Salome Acosta y Sardinas.

Para medir la rugosidad del suelo se utilizaron dos escalas métricas, una rígida y otra flexible con las que se determinó la distancia por superficie entre dos puntos separados por una distancia aérea de cinco metros. La determinación se realizó en varias direcciones (ejes de la mayor y menor pendiente y eje diagonal entre estas dos pendientes), y se reportó en porcentaje.



Figura 3. Pequeña obra de aforo hidrológico. Figura 4. Aforo con medidor «parshall».

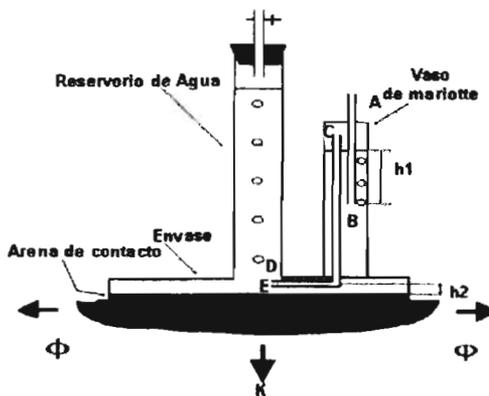
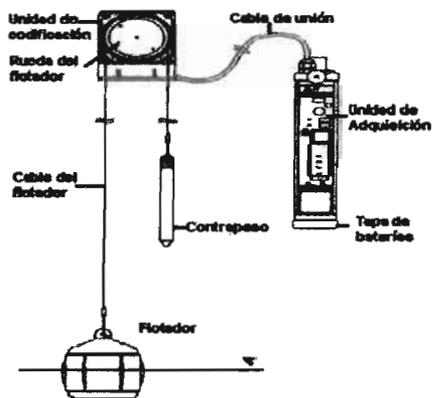


Figura 5. Limnigrafo automático Thalimides. Figura 6. Infiltrómetro de discos TRIMS.

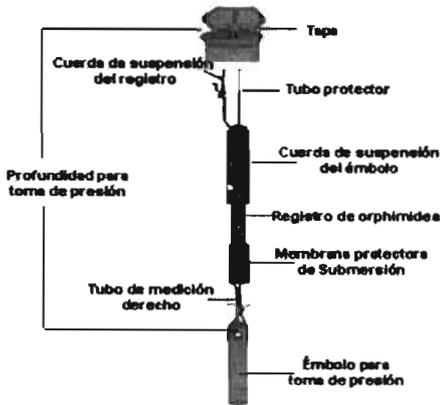


Figura 7. Método de la piscina.



Figura 8. Piezómetro automático Orphimedes.

### Caracterización de compartimentos hídricos de la cuenca

Diferentes compartimentos hídricos de la cuenca se caracterizaron y monitorearon con metodologías específicas:

### Vegetación

Para determinar la composición florística se realizaron censos de vegetación y se coleccionaron ejemplares representativos en prensas botánicas para ser consultados corroborados o identificados por un especialista.

Para medir la productividad primaria de áreas vegetales forrajeras se delimitaron pequeñas clausuras de 25 m<sup>2</sup> con postes y alambres de púas (Figura 9). Al interior de dichas clausuras se definieron cuatro cuadrantes de 2.5 m cada uno y se aislaron con mallas metálicas de diferente tamaño para poder separar los niveles tróficos presentes: grandes herbívoros (vacas, venados, etc.), pequeños herbívoros (conejos, liebres), e insectos herbívoros (chapulines). Los métodos de teledetección con imagen Landsat y SPOT fueron útiles para estudiar la cobertura vegetal de grandes superficies y su evolución con el tiempo.



**Figura 9. Clausuras en áreas forrajeras.**

### **Suelos de las vertientes**

Para la caracterización de los suelos de las vertientes se realizaron transectos topográficos con sondeo y muestreo de suelo con barrena. En ellos se determinó el espesor de la capa de suelo y sus diferentes horizontes morfo-genéticos. La caracterización del color del suelo se hizo con el código Munsell mientras que sus características fisicoquímicas se determinaron con los métodos de análisis implementados por el laboratorio del INIFAP CENID-RASPA (textura, elementos gruesos, curva de retención de agua, pH, conductividad eléctrica, aniones y cationes solubles, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, etc.)

### **Materiales geológicos o parentales**

Para la caracterización geológica del material parental se utilizaron técnicas de análisis petrográfico y cristalográfico con la ayuda de la Universidad de Grenoble, Francia.

### **Cuerpos de agua superficial**

La caracterización de dos cuerpos de agua (presón de Socorro y presón Don Bartolo) construidos para abreviar el ganado en una pequeña cuenca vertiente, se realizó con un estudio de batimetría y con un levantamiento topográfico del *impluvium* con estación total. Se instalaron escalas metálicas en serie y niveladas para dar seguimiento al llenado, almacenamiento y vaciado del cuerpo de agua a lo largo de las estaciones del año.

A continuación se presente una selección de resultados con estas herramientas y métodos:

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La gran cantidad de variables observadas en las diferentes escalas de tiempo y espacio orientó la atención hacia el estudio de los estados de superficie del suelo que parecen ser muy importantes en los procesos que gobiernan la hidrodinámica superficial de la cuenca.

A manera de ilustración se presentan a continuación, en forma resumida, algunos de los principales resultados encontrados.

En una primera etapa se estudió la vegetación mediante imágenes de satélite Landsat MSS de 1972 a 1992. El resultado fue constatar la degradación que ha sufrido la cobertura vegetal, particularmente la del bosque, en ese período de 20 años (Descroix, 1995; Rodríguez, 1997; Descroix *et al.*, 1998).

Se constató que esta degradación se caracteriza por la modificación de la superficie del suelo debido al desmonte, al sobre pastoreo y al pisoteo por el ganado, así como a una desagregación de las partículas en los suelos desnudos por el efecto *splash* y a una erosión hídrica intensa por el escurrimiento superficial (Poulenard, 1995; Gómez, 1997; Pérez, 1998; Loyer, 1998).

A escala de las pequeñas cuencas vertientes se observó que en numerosas superficies con pendientes superiores al 15 por ciento, la erosión parece haber alcanzado un estado de madurez debido a que las partículas finas del suelo ya fueron transportadas en fases anteriores del proceso erosivo (Descroix *et al.*, 2000). Esto hace que se forme una cubierta de gujarros, piedras y bloques que protege lo que queda de suelo contra el efecto *splash* y la erosión concentrada. Esos elementos gruesos, al no estar incrustados en la superficie del suelo, permiten la infiltración de agua. El estado de superficie de este tipo se denominó «piedras y bloques sueltos», o por sus siglas en inglés FPB «Free Pebbles and Blocks» (Figura 10) de acuerdo a Descroix *et al.* (2001).

En superficies con pendientes superiores al 30 por ciento el paso y el pisoteo del ganado conduce a la formación de terracitas poco espaciadas entre sí y en las cuales la proporción de gravas y gujarros es muy elevada, con valores del 20 al 60 por ciento (Descroix y Nouvelot, 1997; Poulenard *et al.*, 1996; Poulenard, 1995; Descroix *et al.*, 2001). Estas terracitas tienen una porosidad vesicular elevada y están casi totalmente desprovistas de vegetación, lo que es característico de las áreas pisoteadas por el ganado.

El comportamiento hidrodinámico en las vertientes es predominantemente de tipo *Hortoniano* (Horton, 1933) como lo demuestran las aplicaciones de un modelo sencillo que toma en cuenta solamente la lluvia y el índice de lluvias anteriores (IPA) (Descroix y Nouvelot, 1997; Descroix *et al.*, 2002). Sin embargo, en algunos casos y en ciertas condiciones, por ejemplo en plena temporada de lluvias (después de varios días con lluvias superiores a 10 mm, totalizando más de 150 mm), se observa la formación de zonas saturadas en agua dando origen a un escurrimiento subsuperficial de tipo *Cappusiano* o *Hewlettiano* (Cappus, 1960; Hewlett *et al.*, 1969).

A escala de la parcela se corroboró que la degradación de los suelos causa una aridificación del medio biofísico similar al que ocurre en las zonas áridas y semiáridas, donde se observa la predominancia de un escurrimiento superficial laminar.

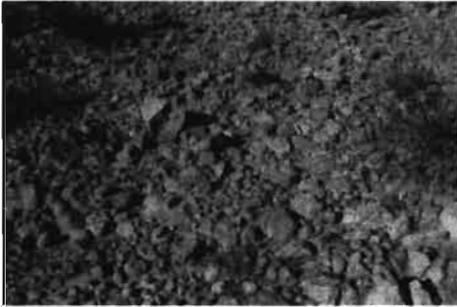
Se caracterizaron dos estados de superficie que dificultan la infiltración del agua y permiten un mayor escurrimiento superficial (Descroix *et al.*, 2001):

- GC «Gravel crust» o costra con grava en la cual las gravas que la forman están cementadas en la costra superficial (Figura 11).
- INT «Indurated topsoil» o superficie del suelo completamente endurecida y compactada (Figura 12).

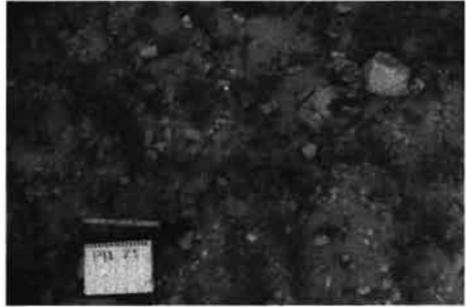
Las pruebas de infiltración realizadas en los principales tipos de superficie de la cuenca permiten constatar la variabilidad espacial que existe en la conductividad hidráulica de los suelos (González Barrios *et al.*, en curso).

Se pudieron observar las grandes diferencias entre el medio poroso homogéneo y poco estructurado de las superficies con terracitas hasta el medio poroso heterogéneo y bien estructurado de las superficies con mantillo de pino-encino en donde además existe un comportamiento hidrofóbico al inicio de su humectación. Las superficies con pastizales presentan un comportamiento intermedio entre los dos casos anteriores (Figuras 13, 14 y 15).

A continuación se detallan más los resultados de estas pruebas.



**Figura 10. Piedras y bloques sueltos.**



**Figura 11. Costra con gravas.**



**Figura 12. Superficie endurecida.**



**Figura 13. Superficie con pasto.**



**Figura 14. Infiltración en terracita.**



**Figura 15. Infiltración en mantillo de pino.**

Las pruebas de infiltración Trims realizadas en cuatro tipos de superficie (con mantillo de pino, mantillo de encino, terracita y pasto) emplearon discos de diferente radio. En general se hicieron cuatro pruebas para cada tipo de superficie, una prueba con el disco de 12.5 cm de radio, dos pruebas con el disco de radio de 9 cm y una con el disco de radio de 4 cm.

Para cada disco se aplicaron diferentes valores de succión desde 100 mm hasta 10 mm de acuerdo al Cuadro 1.

**Cuadro 1. Número de succiones para cada disco y para cada superficie.**

Su superficie:	N total	N (G1)	N (M1 y M2)	N (P2)
Con mantillo de pino	19	7	6	6
Con pasto	26	8	11	7
Con terracita	7	0	0	7
Con mantillo de encino	3	0	2	1

En las Figuras 16, 17 y 18 se puede constatar que el flujo de infiltración disminuye fuertemente durante los primeros segundos, luego fluctúa un momento hasta estabilizarse. Esa estabilización puede traducirse como que el sistema ha alcanzado el régimen permanente. Se puede entonces cambiar la succión a un valor más bajo. El flujo aumenta y se estabiliza al cabo de un cierto tiempo. La operación se repite para las diferentes succiones -100, -60, -30 y -10 mm.

A pesar de que en la mayor parte de los casos se puede observar que el flujo aumenta cuando disminuye la succión, hay excepciones, en particular con las pruebas de Trims realizadas con el disco grande (G1) en la superficie con mantillo de Pino (Figura 17). Allí se puede constatar que el flujo no se estabiliza en la succión de -100 mm, y no aumenta cuando se cambia la succión sino hasta los 16,000 segundos en donde súbitamente aumenta el flujo aun cuando la succión no había sido modificada. Al ver este fenómeno se volvieron a aumentar las succiones deliberadamente para ver si los flujos disminuían a los valores previamente observados. Se constató que los valores del flujo, en la succión de -30 mm son bastante parecidos a los de la fase inicial de la prueba, pero los de la succión de -60 y -100 mm son menores (fenómeno de histéresis).

En la aplicación de la succión de -10 mm de esta prueba se observa el fenómeno de mojabilidad que puede ser descrito de la siguiente manera: al principio de la succión (del segundo 5000 al 15000) el sistema se encuentra en un estado no mojable: la superficie se comporta como hidrofóbica, luego; hacia el segundo 16,000 el ángulo del menisco de la superficie del agua en contacto con las superficies sólidas se hace más pequeño y el sistema cambia a hidrófilo, lo cual permite pasar más agua y aumentar así el flujo de infiltración (Figura 17). El análisis de los flujos

posteriores con succiones crecientes muestra que este efecto es irreversible y que puede estar ligado a la naturaleza orgánica de los componentes del mantillo.

En medio no saturado, la conductividad hidráulica  $K$  no es constante sino que varía con el contenido del agua  $\theta$  (o potencial matricial  $h$ ). Si la humedad disminuye se observa una reducción también en la conductividad hidráulica. La relación entre ésta y el potencial matricial  $K(h)$  depende muy fuertemente de la textura del suelo.

A saturación ( $h \rightarrow 0$ ),  $K$  toma el valor más alto llamado conductividad hidráulica a saturación  $K_s$ .

En medio no saturado ( $h < 0$ )  $K$  varía en función de  $h$ , por lo que se puede emplear la siguiente relación exponencial para describir esa variación (Gardner, 1958):

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad 1$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro característico de la textura del suelo.

Según el método de Ankeny *et al.* (1991) se puede obtener la conductividad hidráulica en función de la succión en mm (presentada en los cuadros al pie de las Figuras 16, 17 y 18) y se puede deducir la conductividad hidráulica a saturación ( $K_s$ ) y el valor de  $\alpha$  promedio en el intervalo de succiones de -100 a -10 mm, ajustando los datos experimentales a la relación exponencial entre conductividad hidráulica y succión.

Los resultados de este cálculo se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Valores de  $K_s$  y de  $\alpha$  calculados para tres estados con superficie forestal.**

G	$K_s$ (mm h <sup>-1</sup> )	$\alpha$ (mm h <sup>-1</sup> )	$\alpha_{sat}$ (mm h <sup>-1</sup> )
Con mantillo de pino	60.84	252.0	619.2
Con pasto	46.44	75.6	168.8
Con terracita	54.72	172.8	180.0

El cálculo con esa ecuación supone que  $\alpha$  es constante en el intervalo de 0 a -100 mm. Pero en realidad el parámetro está ligado a un tamaño de poro hidráulicamente funcional y puede variar según la succión que se aplique. Se deduce pues el valor de  $\alpha_{sat}$  que corresponde a  $\alpha$  con una succión de 0 mm que se obtiene por extrapolación según la relación empírica siguiente:

$$\alpha = \alpha_{sat} \exp(\beta h) \quad 2$$

Donde  $\beta$  es un parámetro de ajuste.

Según la teoría capilar (White y Sully, 1987) se puede tener una idea del tamaño de los poros hidráulicamente funcionales con la ecuación siguiente:

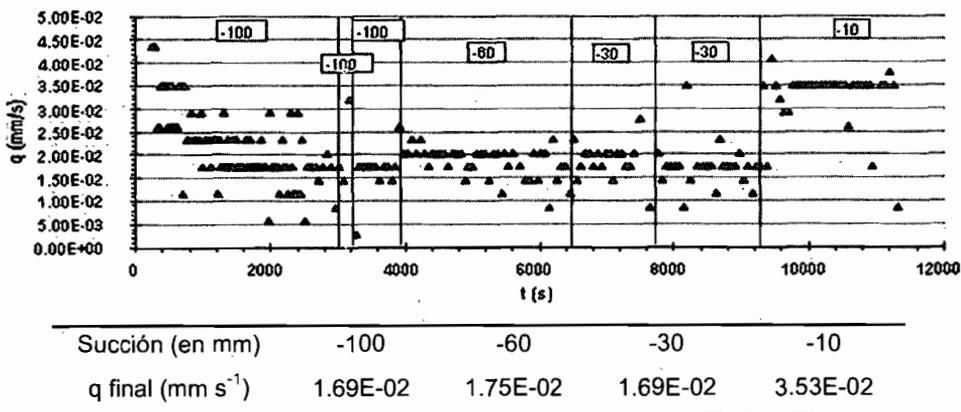
$$\lambda_m = \frac{\sigma \alpha}{\rho_w g} \quad 3$$

Donde  $\sigma$  es la tensión superficial (0.073 N/m a temperatura ambiente).

El cálculo del tamaño de poro con ayuda de la Ecuación 3 da los resultados que se presentan en el Cuadro 3.

**Cuadro 3. Tamaño de poro hidráulicamente funcional  $\lambda_m$  calculado a partir de la Ecuación 3.**

Superficie:	Poros promedio en el medio no saturado: succiones de -100 a -10 mm (en $\mu\text{m}$ )	Poros en el medio saturado: succión = 0 mm (en $\mu\text{m}$ )
Con mantillo de pino	521	1281
Con pasto	156	349
Con terracita	358	372



**Figura 16. Infiltrometría en superficie con terracita.**

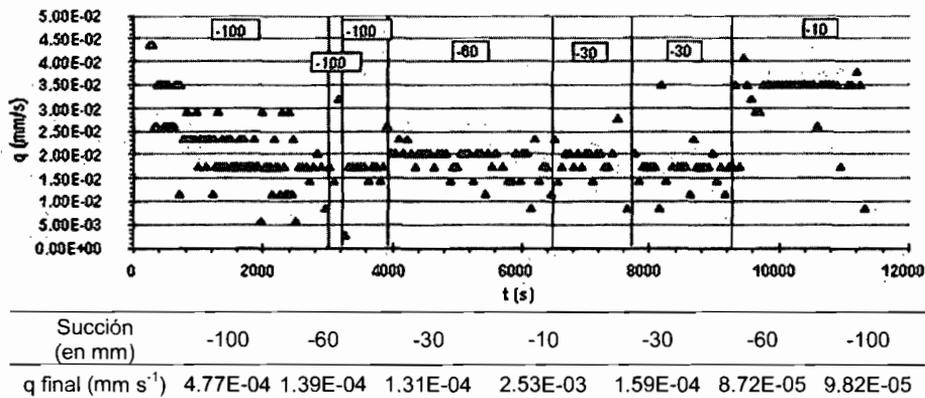


Figura 17. Infiltrometría en superficie con mantillo de pino.

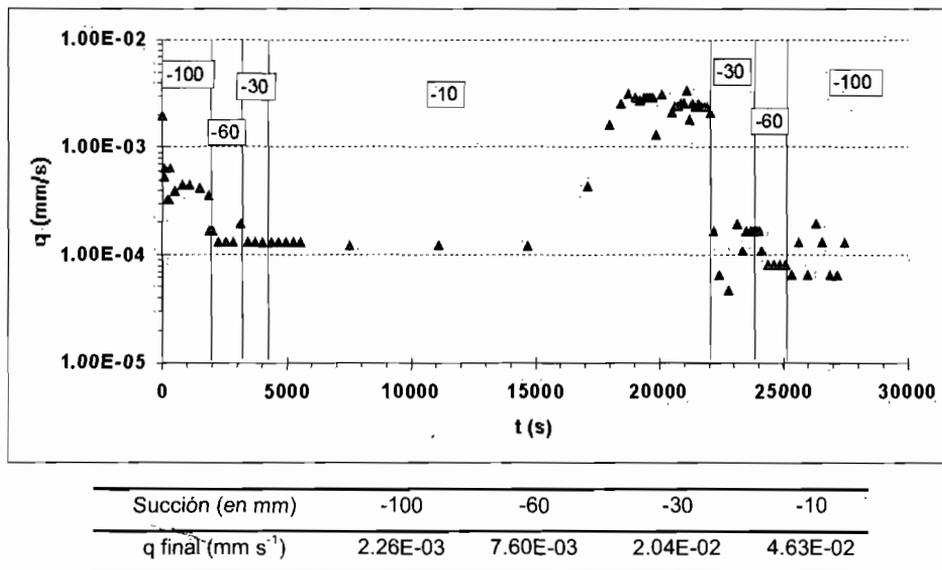


Figura 18. Infiltrometría en superficie con pasto.

La diferencia entre los dos tamaños de poro refleja qué tan estructurado es el medio. En un suelo con estructura el tamaño de poro hidráulicamente funcional varía en función de la succión y de las condiciones de saturación hídrica.

En el Cuadro 3 se puede observar que la superficie con terracita tiene un tamaño de poros casi igual en ambas condiciones. Esta superficie carece pues de una estructura organizada en su porosidad funcional (inter-conectividad entre poros de diferente tamaño) lo cual es de esperarse en una superficie disturbada por el pisoteo del ganado.

La superficie con pasto es menos homogénea que la de terracita, presentando una diferencia de tamaño de poro funcional entre las dos condiciones (Figura 18). Este sitio tiene pues una mayor estructura y conectividad en su red de poros.

En cuanto a las superficies bajo el mantillo de pino, el sistema poroso se presenta como muy estructurado con una gran diferencia de tamaño de poros funcionales debido quizás al efecto de hidrofobicidad observado.

En cada uno de estos tipos de superficie la hidrodinámica será distinta y provocará diferentes impactos hidrológicos aguas abajo.

Las consecuencias de los sistemas productivos sin control como la ganadería y la explotación forestal pueden fácilmente ser imaginados a nivel de toda la cuenca en términos de infiltración, escurrimiento y erosión, así como en términos de cantidad y calidad del agua producida por la cuenca.

Este ejemplo de resultados pone de manifiesto la importancia de la hidrología experimental al servicio de quienes toman decisiones en materia de fomento productivo y protección de las cuencas productoras de agua, en donde aún no se conoce nada de su funcionamiento.

Sin embargo, la extrapolación de estos estudios parece poco factible, al menos en lo que respecta a los valores absolutos medidos, ya que la gran mayoría de los parámetros presenta el efecto de escala y sólo es confiable en la superficie y en las condiciones en que se midió. Por ello, es necesario ampliar los estudios de hidrología experimental a zonas en donde no se tiene ninguna información y comparar luego con regiones similares o diferentes para emitir decisiones con bases cuantificadas sólidas.

## **CONCLUSIONES**

El manejo integral del agua en cuencas hidrológicas requiere parámetros confiables, históricos y recientes para realizar una buena gestión de los recursos hídricos.

Ante la escasez de información específica los estudios de hidrología y edafología experimental son útiles para cuantificar de manera confiable los recursos hídricos de una cuenca productora de agua como la que se presenta en este trabajo.

Algunos procesos que condicionan la ocurrencia y el transporte del agua como la lluvia, escurrimiento superficial, infiltración, percolación profunda, absorción hídrica de las plantas y evapotranspiración, deben tomarse en cuenta y cuantificarse para caracterizar el balance hidrológico de las cuencas, así como para acotar a los sistemas productivos que se desarrollan en ellas y limitar su impacto hidrológico.

Este trabajo presenta los materiales y métodos utilizados durante los últimos 12 años para cuantificar los procesos que condicionan la ocurrencia y el transporte del agua en la cuenca alta del río Nazas.

La cuenca alta del río Nazas es la principal fuente de abasto de agua del Distrito 017 en el norte de México, que sufre desde hace varias décadas los cambios de uso de suelo ligados a una presión productiva forestal y agropecuaria sin precedentes.

La infiltración limitada, el escurrimiento acelerado y la fuerte erosión en manto o en cárcavas son algunos de los impactos hidrológicos que alteran la cantidad y calidad del agua que circula en la cuenca.

Algunos de resultados de estas metodologías ilustran con bastante claridad la importancia de acotar las actividades productivas de acuerdo al impacto hidrológico que representan los estados de superficie observados.

A pesar de la enorme cantidad de datos y de observaciones realizadas en la cuenca alta del Nazas durante los últimos años, su estudio está aún inconcluso tomando en cuenta la incidencia de fenómenos climáticos y el acelerado cambio de uso del suelo que obligan a monitorear esta cuenca a más largo plazo, asegurando con ello las bases para el manejo integral del agua en ella.

La atmósfera, suelos, vegetación, cuerpos de agua y acuíferos son reservorios hídricos y compartimentos que deben observarse de manera continua para permitir un seguimiento del estado de la cuenca así como para aprovechar mejor los recursos hídricos que se producen en ella.

### **Agradecimientos**

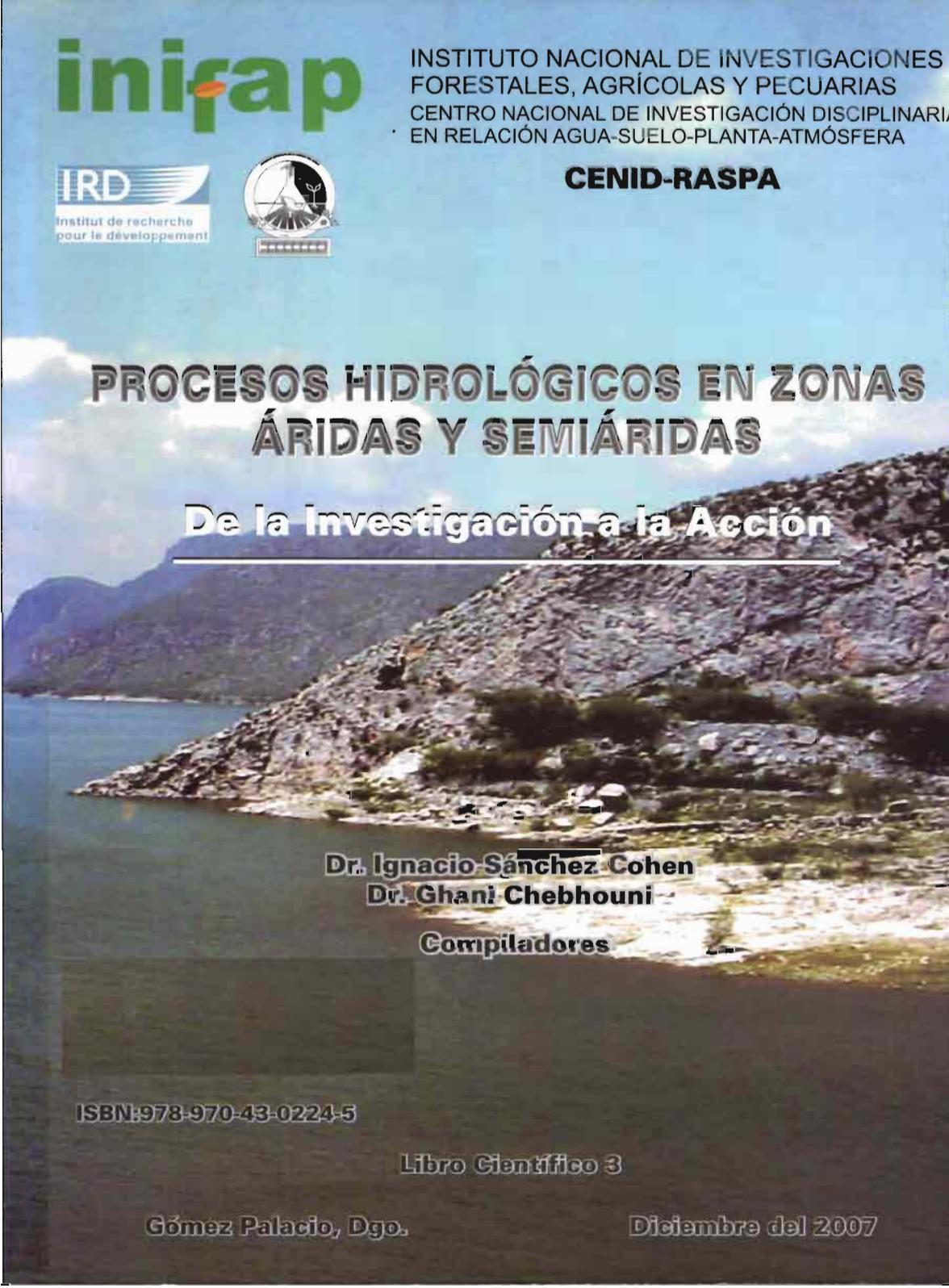
Los autores desean expresar su agradecimiento a las instituciones que apoyaron estos trabajos con recursos humanos y materiales a lo largo de los últimos 12 años; es especial al programa ECOS-Nord ANUIES-CONACYT; al programa francés ISIS; a la CNA; al IRD-LTHE de Grenoble y al INIFAP de México.

### LITERATURA CITADA

- Ankeny, M. D., M. Ahmed, T. C. Kaspar and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Am. J.*, 55:467-470.
- Cappus, P. 1960. Etude des Lois de l'écoulement; application au calcul et à la prévision des débits. *La houille Blanche A*, 493-518.
- Descroix, L. 1995. L'utilisation de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau de la Région hydrologique 36 (Nord Mexique). Atelier de Télédétection et gestion des ressources en eau. FAO, Montpellier, France.
- \_\_\_\_\_. J. F. Nouvelot. 1997. Escurrimiento y erosión en la Sierra Madre Occidental. Folleto científico No. 7 INIFAP-ORSTOM
- \_\_\_\_\_. R. Guiguen, E. Anaya, G. Rodríguez, L. Macias. 1998. Estimation du déboisement par télédétection et SIG dans la Sierra Madre Occidentale. *In: Applications de la télédétection en aménagement*. Coll. Didactiques IRD, Paris, France.
- \_\_\_\_\_. S. Dignonet, J. L. Gonzalez Barrios, D. Viramontes, A. Bollery. 2000. Local factors controlling gully or areal erosion in the Western Sierra Madre (Northern Mexico) International Symposium «Gully erosion under global change». Leuven Belgium.
- \_\_\_\_\_. D. Viramontes, M. Vauclin, J. L. González Barrios and M. Esteves. 2001. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *CATENA Vol. 43 (2) (2001) 115-135*.
- \_\_\_\_\_. J. F. Nouvelot, M. Vauclin. 2002. Evaluation of an antecedent precipitation index to model runoff yield in the Western Sierra Madre (North-west Mexico). *Journal of hydrology 263: 1-14*.
- Gardner, W. R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85: 228-232.
- Gómez, A. 1997. Evaluación del escurrimiento y la erosión hídrica en la subcuenca Sardinias de la Región hidrológica 36. Universidad Antonio Narro CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo., México.
- González Barrios, J. L., J. P. Vandervaere, R. Jasso, R. Solís, y L. Descroix. en curso. Infiltración escurrimiento y erosión en el medio forestal perturbado. Aplicaciones al estudio del comportamiento hidrodinámico en la Sierra de la Candela, Durango, México.

- Hewlett, J. D., H. W. Lull, K. G. Reinhart. 1969. In defence of experimental watersheds. *Water Resour. Res.*, 5(1):306-316.
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 14, 446-460.
- Loyer, J. Y. 1998. Manejo actual y potencial de las aguas en el Norte de México. *In: Ciclo de conferencias ITESM: Laguneros por el agua» Torreón, Coahuila.*
- OTT. 2003a. Codeur angulaire avec enregistreur Thalimedes. Manuel d'utilisation. OTT hydrometrie. Kempten, Germany.
- \_\_\_\_\_. 2003b. Enregistreur de niveau de nappe ou de cours d'eau par bullage Orphimedes. OTT hydrometrie. Kempten, Germany.
- Pérez, C. 1998. Evaluación del escurrimiento y la erosión hídrica de cinco cuencas experimentales en la Región hidrológica 36. Universidad Antonio Narro CENID RASPA. Gómez Palacio, Dgo., México.
- Plenecassagne, A., E. Romero, C. López. 1997. Manual de laboratorio, métodos de análisis de suelos, aguas, plantas. Ediciones INIFAP-ORSTOM, Gómez Palacio, Dgo., México 173p.
- Poulenard, J. 1995. Surpâturages et érosion dans la Sierra Madre Occidentale. *Projet ORSTOM-CENID RASPA, Mexique. ISTOM Paris, France* 82p.
- \_\_\_\_\_. L. Descroix, J. L. Janeau. 1996. Surpâturage et formation de terrassettes sur les versants de la Sierra Madre Occidentale. *Rev de Géographie Alpine* No. 2 t 84, Grenoble, France.
- Quintas, I. 2000. ERIC II, Base de datos climatológica compactada, archivos y programa extractor. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México. 54p.
- Rodríguez M., G. 1997. Determinación de la cobertura vegetal en la Sierra Madre Occidental para su calibración por percepción remota. UJED Escuela de Ciencias Forestales, Durango, México.
- Roose, E., P. Blancaneaux et P. Freitas. 1993. Un test simple pour observer l'infiltration et la dynamique de l'eau dans les horizons du sol. *Cahiers Orstom, série Pédologie*, Vol.16 No.1 : 43-72.
- Vandervaere, J.P. 1995. Caractérisation hydrodynamique du sol *in situ* par infiltrométrie a disques. Analyse critique des régimes pseudo permanents, méthodes transitoires et cas des sols encroûtés. Université Joseph Fourier-Grenoble I, 329p.

White, I. and M. J. Sully, 1987 Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resour. Res.*, 23: 1514-1522.



**inifap**

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES  
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA  
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA



**CENID-RASPA**

# PROCESOS HIDROLÓGICOS EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

## De la Investigación a la Acción

---

**Dr. Ignacio Sánchez Cohen**

**Dr. Ghani Chebhouni**

**Compiladores**

ISBN:978-970-43-0224-5

Libro Científico 3

Gómez Palacio, Dgo.

Diciembre del 2007

**Procesos Hidrológicos  
en  
Zonas Áridas y Semiáridas**

**De la Investigación a la Acción**

---

---

**Dr. Ignacio Sánchez Cohen  
Dr. Ghani Chebhouni**

**Compiladores**

**INIFAP-CENID RASPA, IRD  
2007**

**Centro Nacional de Investigación Disciplinaria  
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.**

**Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.**

**Apdo. Postal 41**

**35150 Cd. Lerdo, Dgo.**

**Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34**

**e-mail: [inifap.gomez@internetual.com.mx](mailto:inifap.gomez@internetual.com.mx)**

**El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines  
específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los  
autores, al CENID RASPA-INIFAP y al IRD.**

**ISBN: 978.970-43-0224-5**