

OASIFICACION.COM: UNA PÁGINA WEB SOBRE HIDROLOGÍA FORESTAL

Andrés Martínez de Azagra Paredes

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología. Avenida de Madrid 44. 34004-PALENCIA (España). Correo electrónico: amap@iaf.uva.es

Resumen

En esta comunicación se enumeran y comentan los principales conceptos, contenidos y herramientas informáticas que ofrece la página web. Se presta especial atención a la Hidrología de Conservación de Aguas, una rama muy importante dentro de la Hidrología Forestal, cuyas ecuaciones básicas se plantean y desarrollan. Los modelos Modipé, Mauco e Hydnum constituyen tres particularizaciones de las ecuaciones básicas anteriores. Estos modelos están informatizados y pueden descargarse desde la página oasificacion.com, al igual que numerosas presentaciones y documentos técnicos, científicos y divulgativos. La comunicación concluye invitando a todos los Hidrólogos Forestales a participar en el futuro desarrollo de la página.

Palabras clave: Desertificación, Producción de agua, Escorrentía, Modelos

INTRODUCCIÓN

A finales de octubre de 2005 inauguramos la página web “oasificacion.com” con el objetivo de divulgar nuestras ideas, investigaciones y experiencias sobre la lucha contra la desertificación, con un enfoque hidrológico, ecológico y forestal. La oasisificación (MARTÍNEZ DE AZAGRA et al., 2004; MARTÍNEZ DE AZAGRA et al., 2006a) debe entenderse como antónimo de desertificación por aridez edáfica (o por erosión hídrica). Se trata de un proceso natural que puede ser favorecido por el hombre mediante prácticas de conservación de aguas, de suelo y de nutrientes, mediante técnicas que propicien la infiltración de la lluvia in situ (o levemente redistribuida por efecto de la escorrentía local desde áreas de impluvio hasta áreas cercanas de recepción). Se trata de un término positivo que realza la importancia de la Hidrología y la Vegetación en la lucha contra la desertización de un territorio. Un ecosistema en

ladera que esté sano tiende a internalizar el recurso agua y –con ello– conserva también el suelo y los nutrientes. Bien al contrario ocurre en ecosistemas degradados, desertizados.

Nuestra propuesta de lucha contra la desertificación es bien conocida por el sector forestal: consiste en revegetar, densificar la cubierta vegetal con especies leñosas arbóreas o arbustivas, incrementando la vida (biodiversidad) en las laderas degradadas, consiguiendo que todo el agua de lluvia se infiltre en la ladera; en definitiva: logrando escorrentía cero ($E_{s2} = 0$). Se trata de un término muy vinculado con la restauración hidrológico-forestal y con la repoblación de zonas áridas, aunque no puede ni debe considerarse como una estrategia exclusiva del ámbito forestal. Un interesante y olvidado ejemplo de oasisificación dentro del ámbito agrícola lo podemos encontrar en el riego de boqueras o riego de turbias (MORALES, 1969; MORALES, 1989; MARTÍNEZ DE AZAGRA et al., 2006a).

Nos oponemos a aceptar resignados la frase lapidaria del famoso político y escritor François René Chateaubriand: “El bosque precede al hombre y el desierto le sucede.”

“Frente a la desertificación ¡oasificación!”, respondemos. Este es nuestro eslogan, nuestra propuesta, nuestro lema, nuestra solución.

Los principales objetivos que nos marcamos con la página web pueden concretarse en estos cuatro puntos: dar a conocer el concepto de oasificación; desarrollar la Hidrología de Conservación de Aguas; ofrecer herramientas informáticas sobre recolección de agua; e intercambiar conocimientos y experiencias con otros ingenieros e investigadores.

HIDROLOGÍA DE CONSERVACIÓN DE AGUAS

La Hidrología de Conservación de Aguas es una rama de la Hidrología de Superficie cuyo objeto de estudio es la infiltración a escala local o la cuantificación de la disponibilidad hídrica existente en un punto del terreno. Parte del ciclo hidrológico local [ecuación 1], poniendo especial énfasis en el componente de la infiltración (I) y en la definición de los tiempos característicos que describen el funcionamiento de una microcuenca. Nace de la necesidad de establecer unas bases científicas que guíen las tareas de planificación, diseño, ejecución y evaluación de los instrumentos, medios, técnicas y actuaciones sobre el medio. Para ello define el marco hidrológico óptimo de la estación a través de los conceptos de estado de conservación favorable de los hábitat, un buen estado de las aguas superficiales y subterráneas y un buen estado ecológico de los ecosistemas acuáticos. La situación óptima describe el funcionamiento hidrológico normal de los ecosistemas en los que se produce de forma natural la oasificación (no se desencadenan fenómenos erosivos ni de exportación de nutrientes ni formación de avenidas). Por el contrario, en terrenos degradados alejados de un estado de conservación favorable, las técnicas de restauración, rehabilitación y mitigación persiguen reconstruir en mayor o menor medida el endorreísmo a escala local para revertir los fenómenos de desertificación. Para un momento temporal

dado y un lugar concreto, la diferencia entre el estado actual y el óptimo de conservación de las aguas informa sobre la salud hidrológica del ecosistema analizado. Esta salud hidrológica sirve de indicador de la posición del ecosistema dentro del proceso de desertificación - oasificación.

La Hidrología de Conservación de Aguas debe entenderse como una rama de la Hidrología Forestal que persigue la consecución de endorreísmo a escala local en terrenos degradados mediante técnicas adecuadas de preparación o manejo del suelo y del vuelo, implantación vegetal, recolección de agua, gestión agroforestal sostenible y ordenación sensata del territorio. Se trata de un sencillo pero importante cambio de enfoque respecto de la Hidrología Tradicional: Lo importante no es el agua que se va sino el agua que se queda. Este cambio de perspectiva, por lo demás evidente, constituye el punto de partida de la Hidrología de Conservación de Aguas (HICONA, a partir de ahora). Pensamos que HICONA es una parte importante de la Hidrología Forestal. Es la Hidrología que necesitan las laderas y cuencas degradadas de zona árida y semiárida, aquejadas de indigencia hídrica. Debe servir de base a la Ecohidrología, una reciente y atractiva disciplina (RODRÍGUEZ ITURBE, 2000; RODRÍGUEZ ITURBE & PORPORATO, 2004).

La sustancial divergencia del enfoque de HICONA respecto de la Hidrología Clásica se manifiesta en muchos puntos: Ya desde el principio de su desarrollo, pues parte de un balance hídrico distinto del tradicional [ecuaciones 1 frente a 2], pero resulta bien palpable al considerar sus tiempos característicos (MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1998) que difieren notablemente de los clásicos contemplados al analizar hidrogramas (tiempo de concentración, tiempo base, tiempo punta, etcétera).

$$I = P - I_t - E + E_{s1} - E_{s2} \quad [1]$$

$$P = I_t + I + E_s + E_v \quad [2]$$

(el significado de cada término puede consultarse en la relación de símbolos que figura al final del texto)

En HICONA nos planteamos una cuestión elemental dentro de la Hidrología: la ecuación de continuidad particularizada a una microcuenca (que posee un área de impluvio, un área de recepción y un microembalse). Pese a su gran sencillez, el problema planteado tiene mucho calado para

comprender y resolver la mayoría de los procesos locales de desertificación. Surge así el concepto de oasisificación con todas sus implicaciones teóricas y prácticas en el campo del urbanismo, la agricultura, la repoblación forestal o la silvicultura.

El balance hídrico puntual [ec. 1], la ecuación diferencial de un microembalse [ec. 3] junto con la condición de endorreísmo [ecuaciones 4 y 5] constituyen los tres pilares sobre los que se apoya HICONA. Son unas ecuaciones fundamentales y generales que pueden particularizarse a distintos modelos de infiltración: al método del número de curva (lo que conduce a MODIPÉ; MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1996), al método de los coeficientes de escorrentía (MAUCO et al., 2003), a la ecuación de infiltración de Horton (HYDNUM, MARTÍNEZ DE AZAGRA, 1995, 1998); etcétera. Se llega así a un “nuevo campo” dentro de la Hidrología de Superficie que permite tecnificar nuestras decisiones e intervenciones restauradoras o selvícolas en laderas degradadas de zona árida y semiárida.

$$\frac{S_a(y) \cdot dy}{dt} = i(t) \cdot S_2 + [i(t) - v_i(t)] \cdot S_1 - w_i(t) \cdot S_2 - c_g \cdot (y - H)^x \quad [3]$$

$$E_{s2} = 0 \quad [4]$$

$$t_l \geq D \quad [5]$$

(significado de los símbolos en la tabla al final del texto)

LA INFILTRACIÓN: UN TEMA PENDIENTE

La infiltración es la componente clave del ciclo hidrológico, es la componente que regula los flujos y destinos del agua de lluvia en la Tierra. Es la que posibilita la vida a las plantas (y con ello a toda la biodiversidad que albergan dichas plantas), es la que alimenta los acuíferos y manantiales, la que controla la escorrentía, la que atenúa o acentúa la erosión hídrica, y la que explica la mayor parte de los procesos de desertificación. Pero, paradójicamente y debido a la complejidad del proceso, la infiltración todavía no ha sido matematizada de forma satisfactoria hasta la fecha. Por los tiempos que corren, puede parecer inverosímil, pero todavía no disponemos de un modelo universal preciso y práctico: ¿Alguna ecuación de infiltración es capaz de

predecir los tiempos de encharcamiento y la infiltración acumulada de un terreno ante distintos episodios de lluvia y ante condiciones previas de humedad diferentes, con precisión? Pero nuestra carencia es aún mayor: ¿Sabemos medir la capacidad de infiltración ($f(t)$) de un suelo de forma unívoca? ¿Debemos hacerlo con infiltrómetros de anillo o con simuladores de lluvia, con aguas claras o con turbias,? Son preguntas básicas pero que todavía no encuentran una respuesta satisfactoria.

Cuando un fenómeno físico complejo no está plenamente descrito resulta muy útil acotarlo definiendo las variables implicadas en él y —a través del teorema Pi (VASCHY, 1892; BUCKINGHAM, 1914)— reducir sus variables obteniendo monomios adimensionales. Siguiendo un procedimiento matemático similar al utilizado en la obtención de la ecuación general de la Hidráulica (BECERRIL, 1960; LÓPEZ CADENA Y MINTEGUI, 1983) hemos intentado hallar la ecuación general de la infiltración [ec. 6]. Se trata de una función desconocida (?), que habrá que obtener por experimentación y que depende de siete números adimensionales que poseen una clara e interesante interpretación física (MARTÍNEZ DE AZAGRA et al., 2006b,c)

$$f = \varphi(p_e, \theta, \xi_r, d_r, k_r, MA, RE) \cdot \sqrt{\frac{\psi}{\rho}} \quad [6]$$

Así, por ejemplo, la porosidad relativa entre el horizonte superficial y el subyacente (d_r) o la permeabilidad relativa entre horizontes (k_r) son dos buenos índices para evaluar el riesgo de desertificación que presenta un suelo. Valores de estas dos variables superiores a la unidad denotan un buen estado de salud del suelo mientras que números inferiores a la unidad dificultan la infiltración, favorecen la erosión hídrica y pueden terminar por contribuir a que se formen costuras superficiales (tastanas).

Se pueden deducir dos monomios adimensionales adicionales [ecuaciones 7 y 8] que describen el proceso físico del sellado y de la compactación con todo detalle: son los números de Reynolds por infiltración de aguas turbias (PA) y el número de Euler de la presión hidrodinámica que ejerce el hidrometeoro (NA). En este caso, el problema radica en obtener los valores críticos (o umbrales) que discriminan entre la

formación de sellado (o no) y la compactación de la capa superficial del suelo. Tales números frontera (o intervalos frontera) habrán de obtenerse por experimentación en un laboratorio de Física del Suelo, a diferencia de lo que ocurre con d_r y k_r en donde el valor frontera puede ser deducido a priori, valiendo uno.

$$PA = \frac{\chi \cdot v_i \cdot (d_h - d_0)}{\mu} \quad [7]$$

$$NA = \frac{\sqrt{\frac{p_d - p_c}{\rho_c - \rho}}}{v_c} \quad [8]$$

(significado de los símbolos en la tabla 1)

CONTENIDOS Y RESULTADOS DE LA PÁGINA WEB

Oasificación.com ofrece una serie de aplicaciones informáticas, documentos, artículos científicos y de divulgación y presentaciones en Powerpoint. Todo el material se puede descargar de forma gratuita.

Las aplicaciones informáticas de mayor interés son:

MODIPÉ 2.0 (en versión española y bilingüe: Español e Inglés): programa en VisualBasic del modelo homónimo sobre recolección de agua basado en el método del número de curva (N).

NUMCUR 1.0 (versión bilingüe): programa en VisualBasic para la elección del número de

Símbolo	Significado
\bar{a}	aceleración absoluta $\{L \cdot T^{-2}\}$
c_g	Coefficiente de gasto {dimensional}
d_0	Longitud de poros característica en la superficie del suelo, diámetro característico del horizonte superficial $\{L\}$
d_h	Diámetro característico de las partículas en suspensión que contiene el agua $\{L\}$
d_r	Porosidad relativa entre horizontes {adimensional}
dt	diferencial de tiempo $\{T\}$
dy	diferencial de calado $\{L\}$
D	Duración del aguacero $\{T\}$
E	Evaporación física de agua desde la superficie del suelo $\{L\}$
E_s	Escorrentía superficial (genérico) $\{L\}$
E_{s1}	Escorrentía generada en el área de impluvio y que alimenta al área de recepción (recolección de agua) $\{L\}$
E_{s2}	Escorrentía que escapa del área de recepción (de la unidad sistematizada) $\{L\}$
E_v	Evapotranspiración $\{L\}$
$f(t), f$	Capacidad de infiltración $\{L \cdot T^{-1}\}$
H	Altura de las represas del microembalse, profundidad de la poceta $\{L\}$
$i, i(t)$	Intensidad de lluvia (en el instante t) $\{L \cdot T^{-1}\}$
I	Infiltración $\{L\}$
I_r	Interceptación, intercepción $\{L\}$
k_r	Permeabilidad relativa entre horizontes {adimensional}
L	Longitud $\{L\}$
m, M	masa $\{M\}$
MA	Cociente de la capacidad de infiltración entre la permeabilidad, número de Martínez de Azagra {adimensional}
N	Número de curva {adimensional}
NA	Número de Navarro {adimensional}
p_c	Resistencia frente a la compactación (o compresión) que posee el suelo $\{M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}\}$
p_d	Presión hidrodinámica que ejerce el chubasco sobre el suelo $\{M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}\}$

PA	Número de Pando {adimensional}
p_e	Porosidad eficaz de la superficie del suelo {adimensional}
RE	Número de Reynolds {adimensional}
$Sa, Sa(y)$	Superficie anegada en el área de recepción $\{L^2\}$
S_1	Superficie correspondiente al área de impluvio $\{L^2\}$
S_2	Superficie del área de recepción $\{L^2\}$
t, T	Tiempo $\{T\}$
t_l	Tiempo límite (momento en el que comienza E_{s2}) $\{T\}$
v_c	Velocidad característica de llegada del hidrometeoro al suelo $\{L \cdot T^{-1}\}$
$v_i(t), v_i$	Tasa o velocidad de infiltración en el área de impluvio, velocidad de infiltración (en general) $\{L \cdot T^{-1}\}$
$w_i(t)$	Tasa o velocidad de infiltración en el área de recepción $\{L \cdot T^{-1}\}$
x	exponente de descarga {adimensional}
y	Calado de la lámina de agua en el microembalse $\{L\}$
θ	Contenido de humedad del suelo {adimensional}
μ	Coefficiente de viscosidad dinámico $\{M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}\}$
ξ_r	Tortuosidad relativa {adimensional}
ρ	Densidad absoluta del agua o del granizo, o densidad aparente de la nieve granulada $\{M \cdot L^{-3}\}$
ρ_c	Densidad característica del horizonte superficial del suelo $\{M \cdot L^{-3}\}$
$\Sigma \bar{F}$	Sumatorio de fuerzas exteriores $\{M \cdot L \cdot T^{-2}\}$
φ	Función genérica
χ	Turbidez del agua $\{M \cdot L^{-3}\}$
ψ	Potencial hídrico $\{M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}\}$

Tabla 1. Significado de los símbolos utilizados

curva o para la determinación de series progresivas de N .

MAUCO: una aplicación en Excel para dimensionar zanjas de infiltración y canales de desviación.

MODÍN: una aplicación en SAS para ajustar datos experimentales sobre capacidad de infiltración de un suelo a los modelos de infiltración más usados en Hidrología. MODÍN considera las catorce ecuaciones de infiltración siguientes: Green-Ampt, Green-Ampt reparametrizado, Hall, Kostiaikov, Mezencev, SCS, Horton, Philip, Holtan, Overton, Smith, Singh-Yu, Mishra-Singh y Potencial generalizado, con numerosas variantes.

Los documentos de texto están en formato PDF y se refieren a los artículos científicos que sustentan toda nuestra línea de trabajo, manuales de usuario, estudio de casos, etcétera. También pueden descargarse dos presentaciones didácticas en PowerPoint (una sobre oasisificación y otra sobre Modipé) así como dos sencillas melodías hidrológicas (en MP3).

La página web la hemos desarrollado entre siete personas. Somos un pequeño grupo de profesionales con distintas especializaciones (Ingenieros de Montes, Matemáticos, Estadísticos e Informáticos) pero preocupados por un mismo tema: la desertificación, a la que queremos combatir desde sus orígenes: aumentando la infiltración y la cubierta vegetal, y reduciendo la erosión hídrica, es decir: oasisificando el territorio.

Estamos abiertos a colaboraciones (nuevas aplicaciones informáticas, nuevos modelos sobre HICONA, artículos, ensayos y experiencias, sugerencias, críticas, etc.). Tenemos un espacio reservado que es reducido (100 MB) pero todavía nos cabe mucha información. Somos pobres en euros pero ricos de espíritu: Pensamos que cuántos más seamos más avanzaremos en este apasionante Mundo de la Hidrología Forestal:

$$\Sigma \bar{F} = m \cdot \bar{a} \quad \text{¡La unión hace la fuerza!}$$

Publicamos novedades con asiduidad: al menos dos veces al año. Nuevamente, desde

aquí queremos animar a toda mente inquieta a colaborar en oasificación.com.

La página está teniendo bastante aceptación. Hemos rebasado las 40.000 visitas a primeros de septiembre de 2008. El tráfico actual es de 65 internautas diarios y va en aumento. Nos sorprende el hecho de que el 50% de las visitas provenga de EEUU; un 30% procede de Hispanoamérica (sobre todo: México, Chile y Colombia); y un 15% de España. Echamos en falta visitantes africanos. Vamos a tratar de corregir este importante sesgo facilitando la página web en francés, ya que muchos de los países a los que nos queremos dirigir (por estar padeciendo graves procesos de desertificación) son francófonos.

BIBLIOGRAFÍA

- BECCERRIL, E.; 1960. *Hidromecánica*. Editorial Dossat. Madrid
- BUCKINGHAM, E.; 1914. On physically similar systems. Illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review* 4: 345 – 376
- LEMUS, M. Y NAVARRO, G.; 2003. *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo*. Corporación Forestal Nacional. San Fernando.
- LÓPEZ CADENAS DE LLANO, F. Y MINTEGUI AGUIRRE, J.A.; 1983. *Hidráulica*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.; 1995. *Modelo para la estimación de las disponibilidades hídricas en ladera*. Tesis Doctoral (inédita). E.T.S.I. de Montes. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.; 1996. *Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal*. Mundi Prensa. Madrid.
- MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES, A.; 1998. Desarrollo de un modelo sobre recolección de agua aplicable a la restauración forestal. *Ecología* 12: 93–104
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; MONGIL, J. Y ROJO, L.; 2004. Oasification: a forest solution to many problems of desertification. *Inv. Agraria: Sist. Rec. For.* 13(3): 437–442
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; MONGIL MANSO, J.; DEL RÍO SAN JOSÉ, J. Y ROJO SERRANO, L.; 2006a. Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasificación. *Ecología* 20: 453 – 470
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; PANDO FERNÁNDEZ, V.; DEL RÍO SAN JOSÉ, J. & NAVARRO HEVIA, J.; 2006b. Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional. *Ecología* 20: 471–492
- MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; PANDO FERNÁNDEZ, V.; NAVARRO HEVIA, J. & DEL RÍO SAN JOSÉ, J.; 2006c. A proposal of an infiltration function with ecological meaning. *In: IUFRO Div. 4 2006 International Meeting. Managing Forest Ecosystems: The Challenges of Climate Change*. Libro de resúmenes más CD-Rom. Valladolid.
- MORALES GIL, A.; 1969. El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. *Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia* 1: 167–183
- MORALES GIL, A.; 1989. Abandono y desorganización de los sistemas de riegos de turbias. Su incidencia en la escorrentía. *En: A. López Gómez (ed.), Los paisajes del agua*. Universidad de Valencia y Universidad de Alicante. Valencia.
- RODRÍGUEZ ITURBE, I.; 2000. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate – soil – vegetation dynamics. *Water Res. Res.* 36: 3–9.
- RODRÍGUEZ ITURBE, I. & PORPORATO, A.; 2004. *Ecohydrology of water-controlled ecosystems. Soil moisture and plant dynamics*. Cambridge University Press. Cambridge.
- VASCHY, A.; 1892. Sur les lois de similitude en physique. *Annales Télégraphiques* 19: 25 – 28