

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

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

Presentación

La cada vez más incierta disponibilidad de agua para todos los usos ha puesto en evidencia la vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas y de la población que de estos depende. También es un hecho insoslayable la estrecha correlación entre la disponibilidad del agua y el bienestar social económico y político de las naciones.

En México, más del 86 por ciento del producto interno bruto de la agricultura se produce en el norte en zonas áridas y semiáridas en donde se ubican los principales distritos de riego del país. En esta región se ubica también el 77 por ciento de la población, pero cuenta con sólo el 32 por ciento del escurrimiento que se produce. Así, en el sureste la disponibilidad de agua per cápita es siete veces mayor a aquella del norte, noroeste y noreste del país.

Estudios recientes en México muestran que la emigración del campo hacia las ciudades y al extranjero es explicada (entre otras causas por la economía, salud y aspectos familiares), por el clima, quien toma como rehén a la agricultura nacional, cuyos indicadores económicos están estrechamente relacionados con la disponibilidad de agua. En este contexto y en aras de una adecuada planeación del uso del recurso hidráulico, dos aspectos toman relevancia: a. El manejo integrado del agua y b. El balance hidrológico como punto racional de partida.

El primero constituye una aproximación a la solución de problemas para obtener cambios estructurales de una manera que sea económicamente eficiente, socialmente equitativo y ambientalmente sostenible. Conceptualmente, la aproximación del manejo integrado del recurso hidráulico promueve el desarrollo y manejo coordinado del agua, suelo y recursos relacionados para maximizar el beneficio económico y bienestar de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas.

Esta aproximación operacionalmente involucra la aplicación de conocimiento de varias disciplinas así como puntos de vista de diversos actores para diseñar e implementar soluciones imparciales, eficientes y sustentables a problemas del agua y el desarrollo.

Por otro lado, en el ámbito del manejo integrado del agua, el estudio del balance hidrológico es de crucial importancia para conocer cuantitativamente las

variables y procesos que rigen la disponibilidad de este recurso. Es en esta posición que se desarrolla el presente libro, mismo que es producto de los trabajos presentados en el Simposio Internacional del Manejo Integrado del Agua llevado a cabo durante el XXXIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo celebrado en noviembre del 2006 en Ciudad Victoria, Tamaulipas dentro del proyecto sobre Incremento de la Eficiencia Global de las Disponibilidades de Agua en los Distritos de Riego del Norte del País, bajo la responsabilidad de los compiladores de la obra y coordinadores del evento científico. Los temas que se abordan ofrecen una gama de aproximaciones al estudio de los procesos hidrológicos en ambientes áridos así como herramientas de análisis que conllevan una adecuada toma de decisiones, donde al agua aparece como principal limitante del desarrollo económico y social.

Los Compiladores agradecen la participación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación, Coordinadora de Fundaciones Produce, Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, así como del Institut de Recherche pour le Developpement de Francia, sin cuyo apoyo no hubiera sido posible la publicación de la presente obra.

Dr. Ignacio Sánchez Cohen
INIFAP-CENID RASPA
México

Dr. Ghani Chehbouni
IRD
Francia

Capítulo I

Modelo Conceptual en el Manejo Integral del Agua

Dr. Ignacio Sánchez Cohen, Dr. José Luis González Barrios,
M. C. Gabriel Díaz Padilla, Dr. Waldo Ojeda Bustamante,
Dr. Arcadio Muñoz Villalobos, Dr. Miguel A. Velásquez Valle,
Dr. Guillermo González Cervantes

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	3
Aproximación de cuencas hidrológicas	4
Dimensión institucional	10
Dimensión social	10
Dimensión económica	11
Dimensión ambiental	12
Dimensión tecnológica	12
Balance hidrológico, punto racional de partida	13
Diseño de la investigación	14
Aspectos científicos	14
Aspectos sociales	16
Aspectos económicos	18
CONCLUSIONES	17
LITERATURA CITADA	19

INTRODUCCIÓN

La adecuada gestión y manejo de los recursos naturales es esencial para el bienestar de la sociedad, el crecimiento económico y la permanencia de estos recursos para las generaciones venideras. Por ejemplo, la presión ejercida sobre los recursos hídricos del mundo debido a una creciente población y por la contaminación y falta de controles ambientales ha puesto en la palestra internacional al recurso agua como asunto de seguridad en las naciones. También, la situación económica de muchos usuarios de los recursos naturales ha impactado negativamente su uso provocando cambios irracionales que culminan en su deterioro y lenta o nula recuperación. Así, en los últimos años y especialmente desde la Cumbre de Río celebrada en Río de Janeiro en 1992, las presiones ambientales impuestas por el crecimiento de la población, la urbanización y la industrialización se han convertido en un importante tema de preocupación internacional; cabe mencionar que el recurso más afectado ha sido el agua (C. E., 2003).

Por otro lado, la variabilidad en espacio y tiempo de factores naturales, principalmente climáticos, la incertidumbre de mercado y la globalización de la economía son factores que han impulsado a tomadores de decisiones a aproximar la solución de problemas concernientes al agua con un enfoque integral y multiobjetivo en donde los intereses divergen. Este enfoque ofrece el potencial de balancear los intereses competitivos por el recurso agua en todo el gradiente hidrológico que definen las cuencas (Sánchez *et al.*, 2005). La definición de la cuenca hidrológica en una amplia acepción, debe incorporar políticas, planes y actividades que se usan para controlar el agua y los recursos y procesos a los que se asocia. A saber, el enfoque del manejo integrado tiene algunas características distintivas: Busca balancear objetivos institucionales con los del área de interés. El proceso de toma de decisiones involucra la representatividad del área de interés considerando la opinión de los participantes para alcanzar un plan de acción aceptado por la mayoría que refleje el balance negociado de intereses. Utiliza información científica para un mejor entendimiento de los factores hidrológicos y ecológicos que influyen la condición de la cuenca. Intenta el uso y diseño de métodos efectivos con participación de todos los involucrados de tal manera que el costo de los proyectos se distribuya de manera proporcional a los beneficios recibidos. Crea un marco de acuerdos intragubernamental e intradependencia que garanticen la implementación de los planes desarrollados en el proceso de toma de decisiones y que se sustenta más en el compromiso que en las leyes. Incluye pasos para evaluar los efectos del manejo de la cuenca con estándares de fácil medición y bien definidos.

Acorde a Heilman *et al.* (2001), la característica filosófica principal de los planes de conservación del recurso es el reconocimiento que el plan resultante es de y para los productores con beneficios conservacionistas para su propiedad. De

los anteriores apartados que involucra (o debe involucrar) el manejo del agua teniendo como unidad básica de planeación para el desarrollo de las cadenas productivas, el que concierne al desarrollo de investigación que fundamente la toma adecuada de decisiones, es de crucial importancia. La investigación en este contexto debe abocarse al tratado de los procesos hidrológicos que intervienen en la disponibilidad del agua en tres partes (o más) distintivas de las cuencas: parte alta, donde se tienen la mayor precipitación y se origina el escurrimiento; parte media, que normalmente es una zona de uso agrícola-pecuario, y parte baja, donde comúnmente se ubican los distritos de riego (Sánchez et. al., 2002).

ANTECEDENTES

El problema sobre el que descansa la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades del género humano es el crecimiento poblacional, ya que éste se asocia a la sobreexplotación de recursos naturales, sean estos renovables o no. Así, la población en el planeta se incrementó en cinco mil millones de habitantes en el último siglo, y pudiera exceder los nueve mil millones al año 2050. En este contexto, el consumo de agua ha crecido en 80 por ciento entre los años 1980 al 2000. Se estima que cuando la disponibilidad de agua anual per cápita es inferior a los 1,000 m³, la sociedad se encuentra bajo severa crisis, haciendo que la administración de este recurso sea extremadamente difícil por las restricciones físicas, (Somlyódy y Varis, 2006).

El problema se agrava como resultado de la acelerada urbanización que es característica en países en vías de desarrollo. Así, el número de habitantes viviendo en ciudades se duplicó entre 1970 y 1990.

A medida que la población urbana se incrementa, las ciudades tendrán (o tienen) que importar agua de cuencas distantes en virtud de que el aprovisionamiento local por pozos y embalses no satisface en plenitud las demandas debido a los fuertes abatimientos de los acuíferos, acompañados por una merma en la calidad del agua para consumo humano (WWAP, 2006).

En México, este problema ha adquirido alarmantes dimensiones en virtud de las altas tasas de emigración rural hacia las ciudades y a distintos sectores productivos. Aunque las consecuencias directas de la emigración forman parte de una compleja interacción de diversas variables económicas, familiares, salud, clima, etc., el fenómeno es persistente y sin indicios de estabilización (Sánchez et. al., 2007); la Figura 1 muestra esta tendencia acorde a la cual al año 2020 prácticamente no existirá población rural, misma que pasará a demandar bienes y servicios a las ciudades o emigrará a otros países.

También un hecho relevante es que la agricultura consume más del 80 por ciento de las disponibilidades de agua en países en vías de desarrollo con bajas eficiencias globales de uso. En México existen actualmente 6.5 millones de hectáreas bajo riego, lo que lo ubica en el sexto lugar mundial en superficie incorporada al riego (CNA, 2005); de estas hectáreas, menos de 650 mil cuentan con alta tecnificación y el resto opera bajo métodos tradicionales de irrigación con eficiencias no mayores al 40 por ciento (Sánchez *et al.*, 2002). También, existen 14 millones de hectáreas bajo condiciones de temporal lo cual se considera en un 68 por ciento bajo riesgo por la incertidumbre climática y situación de sequía. Otro problema añadido a la disponibilidad del agua es la salinidad de los suelos, habiendo en el país 400 mil hectáreas bajo esta condición (Sánchez *et al.*, 2002). De los 653 acuíferos en el país al año 2004, 104 se consideran sobreexplotados, teniendo tasas de abatimiento que oscilan de 0.5 a 2.5 metros por año. Así entonces, en el país se utilizan 72 mil millones de m³ al año en usos consuntivos (Sánchez, *et al.*, 2003).

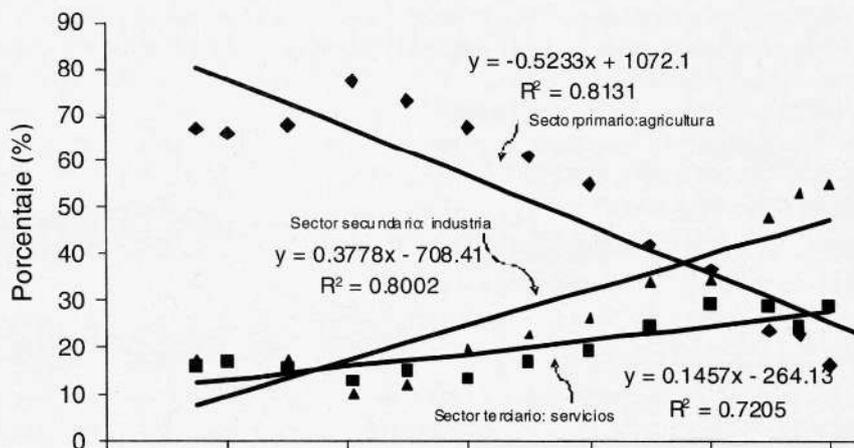


Figura 1. Variación porcentual de personas ocupadas en diferentes sectores productivos.

Aproximación de cuencas hidrológicas

Una de las conclusiones más contundentes del Cuarto Foro Mundial del Agua celebrado en México durante el 2006 (CNA, 2006) fue que la gestión de los recursos hídricos (y de aquellos con los que interactúa) debe realizarse con enfoque integral en donde se involucren las diferentes dimensiones que definen la complejidad de su operación. En este sentido existe un consenso generalizado entre ciudadanos, científicos y tomadores de decisiones en general hacia el manejo de los recursos hídricos a nivel de cuenca lo que, aunque difícil, ofrece el potencial de balancear las demandas en competencia hacia ese recurso (NRCS, 1999).

El enfoque del manejo integral de los recursos naturales con el enfoque de cuencas, sustenta su fortaleza en las interacciones complejas entre los recursos agua, suelo, planta, clima, animales y el hombre, difíciles de considerar con acciones uniojetivo con predominancia al estudio por disciplina más que integral. La visión parcial del problema global complica el proceso de toma de decisiones negando el hecho de que toda variante inducida en uno o más de estos recursos conlleva invariablemente a un impacto en uno o más de los recursos restantes.

Por lo anterior, es necesario considerar a la cuenca hidrológica como unidad básica de planeación teniendo como argumento, como ya se ha asentado, los siguientes aspectos:

- Las interacciones complejas requieren balancear objetivos institucionales y productivos para arribar a estrategias balanceadas.
- El proceso de toma de decisiones necesariamente debe involucrar a usuarios y técnicas de consenso para obtener un plan de manejo técnicamente soportado que refleje el balance negociado de intereses.
- Necesidad de usar información generada mediante estudios científicos para el adecuado entendimiento de los procesos que afectan a los ecosistemas con impacto en las condiciones económicas y de salud.
- El concepto tiene como objetivo el diseño y uso de métodos efectivos que involucren a todos los usuarios con beneficios y costos compartidos.
- Se busca un marco de acuerdos inter e intra institucionales que garanticen la implementación de los planes desarrollados en el proceso de toma de decisiones, los cuales descansen más en el interés que en leyes.
- Necesidad de contar con un procedimiento que evalúe los efectos del manejo de la cuenca con mediciones y estándares bien definidos.

Algunos estudios fundamentan el crecimiento del sector en una ampliación de la frontera agrícola con sustento en el agua del subsuelo. En este sentido se vislumbra un problema combinado de abatimiento y merma en la calidad del recurso. Los rápidos abatimientos son consecuencia de la desmedida dispersión de nuevos pozos sin planes de conservación y mantenimiento de sus eficiencias electromecánicas e hidráulicas (Román y Sánchez, 2004). Así, en algunos lugares de México y del mundo el agua se extrae a tasas de dos a tres veces más rápido que la recarga, provocando abatimientos que ponen en serio riesgo la recuperación de estos ecosistemas. También, los costos del bombeo llegarán a ser de tal magnitud que la agricultura del mediano y pequeño productor será incosteable, prevaleciendo sólo la agricultura empresarial que produce cultivos de exportación, poniendo en

vulnerabilidad el abasto nacional con el consecuente incremento en importaciones desmesuradas para satisfacer las demandas.

En varios ecosistemas del país se han reportado mermas en la biodiversidad en las partes altas de las cuencas hidrológicas, con el consecuente impacto en el balance hídrico y en la producción de sedimentos hacia los embalses. Si se considera que un alto porcentaje de la disponibilidad de agua en las planicies se origina en estas áreas, es fácil entender el impacto ecológico de este deterioro (Loyer et al., 1993).

Se puede también asentar que la escasez de agua es más que un decremento en su disponibilidad; conlleva un incremento en contaminación y merma en productividad de los suelos por salinidad. Actualmente en México existen más de 400 mil hectáreas afectadas por esta condición con incrementos alarmantes año con año. De igual manera, la contaminación de ríos y lagos afecta a los habitantes con aguas debajo de los sistemas con repercusiones económicas y de salud.

Estas situaciones ponen de manifiesto la necesidad de contar con la cuenca hidrológica como unidad básica para la planeación, teniendo como elemento vector y rector de actividades productivas al agua.

Las cuencas hidrológicas son sistemas muy complejos, cuyo comportamiento hidrológico es poco conocido en virtud de las grandes interacciones «ocultas» entre los factores que las distinguen. Comúnmente en estas unidades básicas del desarrollo de las regiones, el manejo se realiza en base unidireccional (uniobjetivo) en vez de utilizar una racionalidad multiobjetivo considerando diferentes intereses y usuarios. De esta manera, la adquisición de información para la toma de decisiones se ha realizado para algunas entradas y salidas al sistema y para algunos parámetros fundamentales como características del suelo y su uso (Heilman *et al.*, 2006, Sánchez *et al.*, 2006).

En este contexto, el balance hidrológico es el punto racional de partida en donde se cuantifican los componentes que definen la disponibilidad de agua. La Figura 2 muestra el balance de agua para México mediante el cual se concluye que existen más de 4,500 m³ por habitante por año, lo cual dista mucho de la realidad dada la gran variabilidad espacial de la ocurrencia de precipitación, capacidad de embalses y eficiencias en cuencas.

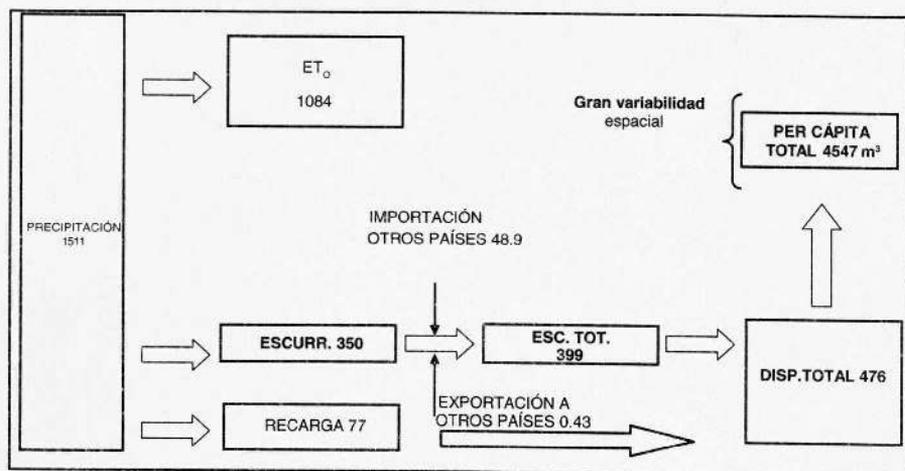


Figura 2. Componentes del ciclo hidrológico en México (km³); un km³=mil millones de m³ (CNA, 2006).

En términos generales, el manejo integrado del agua es una aproximación a la solución de problemas para obtener cambios estructurales de una manera que sea económicamente eficiente, socialmente equitativo y ambientalmente sostenible. Conceptualmente, la aproximación del manejo integrado del recurso hidráulico promueve el desarrollo y manejo coordinado del agua, suelo y recursos relacionados para maximizar el beneficio económico y bienestar de una manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas (Hartwick y Olewiler, 1998).

Esta aproximación operacionalmente involucra la aplicación de conocimiento de varias disciplinas así como puntos de vista de diversos actores para diseñar e implementar soluciones equitativas, eficientes y sustentables a problemas del agua y el desarrollo. Luego entonces, los objetivos esenciales del manejo integral del agua contemplan tres grandes dimensiones: económica, social y ambiental, pero no existe ningún común denominador de evaluación y medición, se manejan y evalúan de manera independiente (véase Figura 3).

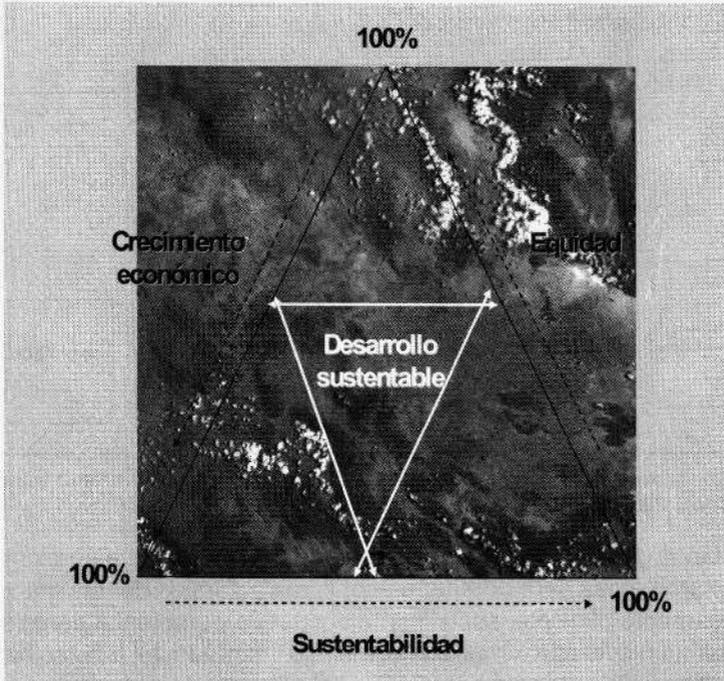


Figura 3. Triángulo de crecimiento sustentable (Adaptado de Dourojeanni, 2000 y Dourojeanni, 2002).

El equilibrio en las tres dimensiones se encuentra circunscrito en el triángulo interior de la Figura 3; sin embargo, sin pérdida de generalidad, las variables de decisión en los procesos de administración de los recursos naturales se han inclinado más hacia el crecimiento económico soslayando la sustentabilidad y la equidad en el desarrollo (García, 2003).

El manejo integral del agua involucra una serie de procesos que ocurren en el área de control o aprovisionamiento de una región dada que impactan la cantidad y calidad del agua. En este contexto, aparece la cuenca hidrológica como unidad básica de planeación. Este principio considera la interrelación entre las variables que definen la disponibilidad en todo el gradiente de la región así como las diversas dimensiones para definir una gestión del recurso hidráulico de manera equitativa, eficaz y sostenible.

La Figura 4 muestra el modelo conceptual para el manejo integral del agua en una cuenca hidrológica.

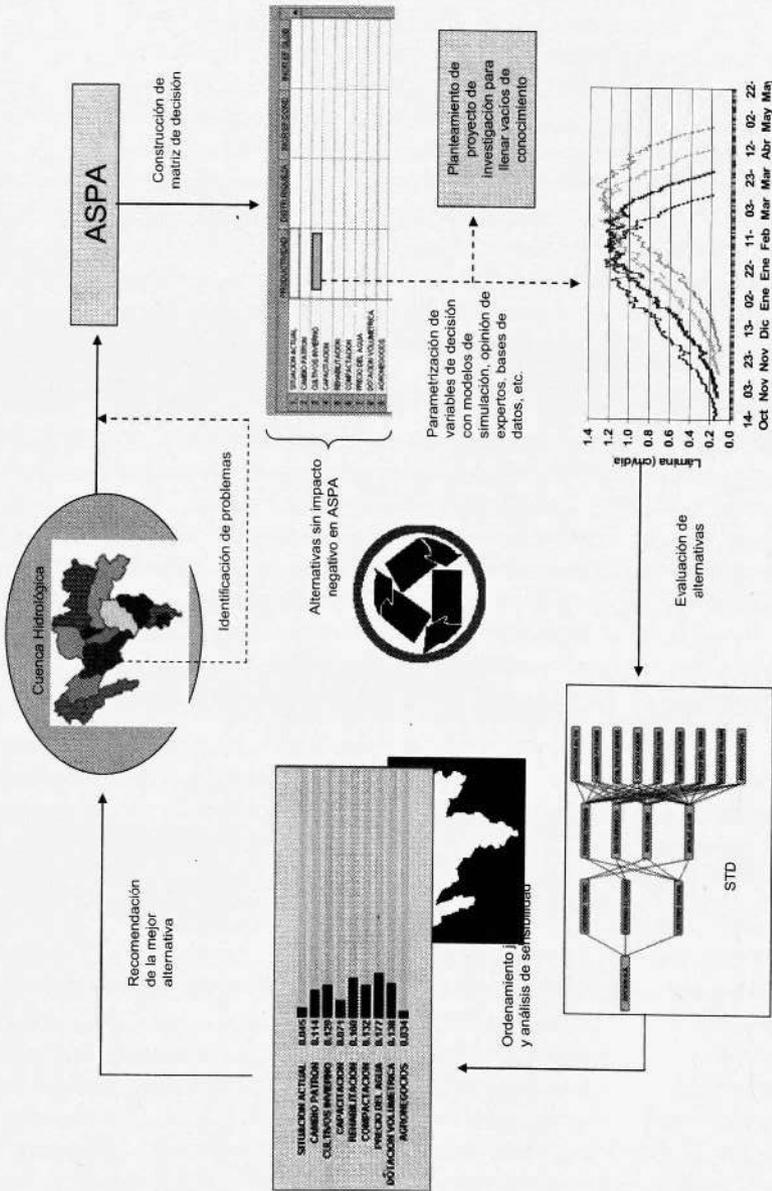


Figura 4. Modelo conceptual del manejo integral del agua en una cuenca hidrológica.

En el gradiente que señala la Figura 4 ocurren procesos hidrológicos que han sido alterados de manera antropogénica o natural. Así, en diferentes puntos de control se puede definir una matriz que indica los problemas y posibles soluciones (alternativas). Esta matriz constituye la fuente de demanda para proyectos de desarrollo y/o investigación. Un principio fundamental de este modelo es que cualquier acción (alternativa) que se realice para mitigar un problema no deberá tener impacto negativo o éste deberá ser mínimo aguas abajo del lugar donde se desarrolló esa acción. Así, el principio del manejo integral del agua por cuenca hidrológica involucra una serie de pasos iterativos para caracterizar las condiciones actuales de la cuenca, identificar y priorizar problemas, definir objetivos de manejo, desarrollar estrategias de protección o remediación, y la implementación de acciones (EPA, 2005). Por lo tanto, la adecuada planeación consensuada de acciones debe considerar las dimensiones pertinentes a saber:

Dimensión institucional

En el modelo del manejo integral del agua, las instituciones juegan un papel preponderante en virtud de los diversos intereses de uso que existen con relación en los recursos naturales de una región. Así, las actitudes y prácticas de las autoridades responsables debieran ser diseñadas para facilitar la participación de los distintos usuarios: sector urbano, industrial, agrícola, servicios públicos, etc. En este sentido, en México los consejos de cuenca representan la figura jurídica que se establece en la Ley de Aguas Nacionales (CNA, 2004) para promover su participación en la formulación, seguimiento y actualización de la programación del uso del agua en las cuencas del país.

En el esquema, dentro de los comités técnicos, los funcionarios públicos son los responsables de integrar la información de soporte para validar con los distintos usuarios lo concerniente al diagnóstico, problemática, causas y efectos, y las alternativas de solución.

Dimensión social

El bienestar social está estrechamente relacionado con la disponibilidad de agua para los diferentes usos. Así, los criterios de supervivencia, reducción de la pobreza, calidad de vida y consideraciones de equidad son de alta jerarquía en la conceptualización y planificación de las actividades relacionadas con el agua. Más aún, la planeación de la distribución del vital líquido debe considerar el entendimiento de la contribución que hace el agua al desarrollo económico de las comunidades (rurales y urbanas) en términos de producción de energía, el riego, recreación, industria, etc. Es importante también que en la construcción de la matriz de problemas y posibles soluciones para una región o ecosistema se cuente con la participación de usuarios o de aquellos directamente afectados por la decisión o curso de acción que se instrumente (Sánchez *et al.*, 2006).

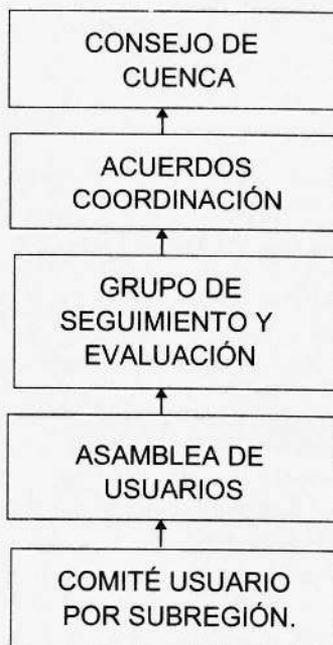


Figura 5. Organización para toma de decisiones en los Consejos de Cuenca (CNA, 2004).

Dimensión económica

El precio que se le adjudica al recurso agua es considerando a esta como un insumo a los procesos productivos. Sin embargo, su valor como recurso estratégico no está aún claramente definido. Así, en la asignación del valor debe considerarse la jerarquía de uso siendo máspreciada para supervivencia y salud pública que para fines no esenciales como el esparcimiento y recreativos. En este sentido, el mercado controlado del agua y los servicios ambientales aparecen como herramientas sólidas en la toma de decisiones. En México, siendo que más del 80 por ciento de las reservas de agua se utilizan para el sector agrícola, el precio que pagan los usuarios de este recurso está muy por debajo del costo real. Pudiera asentarse que lo que se paga es el servicio y no el precio justo. Para un productor, el valor que debiera tener el agua (V_a) esta dictado por la siguiente expresión (Sánchez, 2005):

$$V_a = \frac{\$a - \$sa}{V_o}$$

Donde $\$a$ es el ingreso obtenido por efecto del servicio de riego, $\$sa$ es el ingreso que se obtendría si no se otorga el servicio de riego y V_o es el volumen utilizado por concepto del riego y que genera $\$a$. El costo del servicio del riego es aquel en el que incurre el organismo operador para proveer el agua a los usuarios. Si se utilizan volúmenes innecesarios por concepto de baja eficiencia, se estaría subestimando el valor del agua si no se afecta el costo del servicio por este concepto. También el volumen disponible puede decrecer por efecto de disponibilidad en los embalses o reservas, lo que implica que el valor del agua se incrementa.

Los problemas que enfrenta el sector en aspectos de agua son principalmente dos: la baja disponibilidad para garantizar el abasto y la escasez de fondos para financiar la operación, mantenimiento y renovación de la infraestructura hidroagrícola. Más aún, estos aspectos deben ser considerados como componentes del precio del agua para fin agropecuario. (IPTRID, 2005).

Los mecanismos para otorgar precio al recurso agua en el sector agropecuario son variados, siendo función del país que se trate; sin embargo, estos mecanismos reflejan los distintos objetivos, fuentes de agua, grados de disponibilidad, así como esquemas de irrigación con diferentes tecnologías, tenencia de la tierra y niveles de desarrollo económico. En México, los métodos para describir el uso son básicamente dos: precio por metro cúbico y precio por unidad de superficie. **La principal restricción en los distritos de riego del país más que la capacidad de pago es el deseo de pagar por el consumo del agua**, lo que conlleva a un problema de orden cultural más que técnico al que deberá asignársele mayor atención en aras de sentar una plataforma con matiz de sustentabilidad y visión.

Dimensión ambiental

Anteriormente se ha asentado que las acciones de remediación o desarrollo que se tomen en cualquier parte del gradiente de la cuenca hidrológica, no deberá tener impacto aguas abajo; sin embargo, se tienen que aceptar algunos costos ambientales en aras del bienestar social y la generación de riqueza sin incurrir en la perversión uso de la tecnología. Esta última debe de ser capaz de revertir el deterioro en la medida de lo posible. La contaminación de cuerpos de agua, gasto ecológico, decremento en productividad del suelo son temas ineludibles en la gestión integrada de los recursos naturales.

Dimensión tecnológica

Las decisiones técnicas deben tomar en cuenta el contexto social y económico en el que tendrá que mantenerse la tecnología, esto en virtud de que se ha demostrado que en situaciones en que el mantenimiento, operación o capacidad de pagar la

tecnología instalada sobrepasen las capacidades de los usuarios, la posibilidad de que el servicio sea sostenible es muy remota. Por tanto, las soluciones técnicas se deben diseñar y elegir de acuerdo con criterios que incluyan eficiencia, conveniencia, costo y potencial de adaptación al ambiente local (IPTRID, 2005).

Balance hidrológico, punto racional de partida

La cuantificación de las variables del ciclo hidrológico así como su variación espacial y temporal son el punto medular para una adecuada planeación y conocimiento de las capacidades de la cuenca hidrológica (incluidas éstas en regiones hidrológicas) (Guitrón, 2005). La Figura 6 es una muestra esquemática de este proceso.

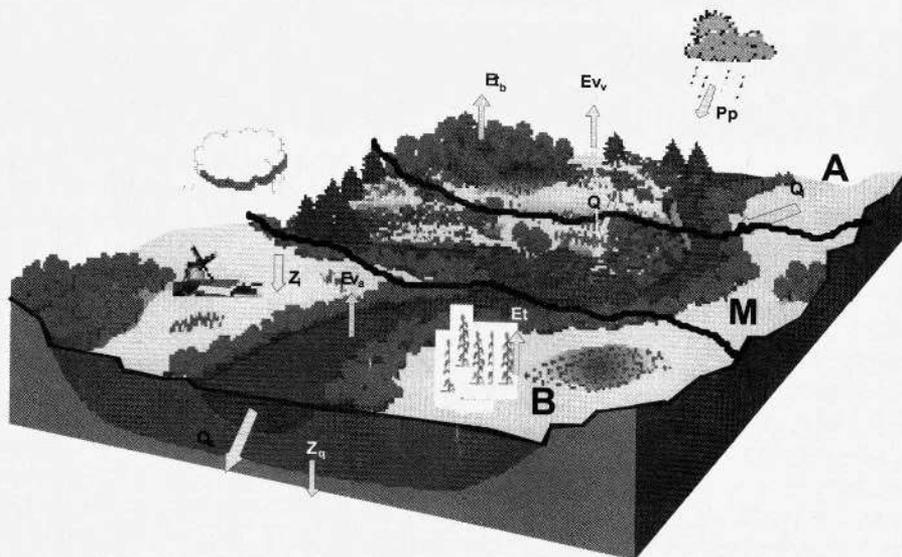


Figura 6. Variables involucradas en el balance hidrológico de una cuenca. Pp, precipitación; Q_s , flujo lateral; Q, escurrimiento; E_b , evapotranspiración del bosque; E_v , evaporación del suelo; E_{vv} , evaporación de cuerpos de agua; Et, evapotranspiración de cultivos; Q_s , flujo subterráneo; Z_q , percolación profunda; Z, infiltración. Las literales A, M y B se refieren al gradiente hidrológico parte Alta, Media y Baja, respectivamente.

En el manejo integral del agua, teniendo a la cuenca hidrológica como unidad de planeación, se busca identificar en qué parte del ciclo hidrológico se pueden tomar decisiones que promuevan la productividad de los recursos naturales sin comprometer su sustentabilidad. El método de aproximación para la cuantificación de las variables descritas anteriormente es de suma importancia en el desarrollo de proyectos de investigación y productivos en virtud de que los métodos empíricos

restringen la aplicabilidad o reproductividad de los resultados; por otro lado, los métodos fundamentados en leyes universales (métodos físicos) proveen de una herramienta sólida de toma de decisiones (Sánchez, 2005).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América (EPA por sus siglas en inglés) ha desarrollado un manual para la planeación en la protección de cuencas hidrológicas (EPA, 2005); sin embargo, el manual está dirigido a agencias y organizaciones que desarrollan planes de cuencas ligadas comúnmente a gobiernos y organizaciones no gubernamentales. Con fundamento en este esfuerzo, la Tabla 1 muestra el esquema general de seguimiento en el proceso de planeación del manejo integral del agua por cuencas involucrando el desarrollo de investigación que propicia el entendimiento del ecosistema para actuar en consecuencia mediante la toma de decisiones con fundamento científico.

Diseño de la investigación

El gran paradigma en la investigación en el contexto de los recursos naturales y específicamente del agua es la instrumentación de una política que permita el crecimiento económico y sustentabilidad de estos recursos, por lo que es necesario entender el impacto de los cambios ambientales en ellos con el fin de proporcionar las herramientas necesarias a los tomadores de decisiones así como instrumentos simples y confiables a los responsables del manejo del agua (Anaya, 2002). Por supuesto, la gran visión no soslaya, más bien incluye, a los usuarios directos del agua quienes demandan incrementos sostenidos de la productividad de este recurso. Sin embargo, como ya también se ha asentado, el precio y valor que en México se asigna a este recurso no va a la par del discurso político que ubica al agua como «Recurso de Seguridad Nacional». La ciencia no ha encontrado la manera de asociar la sustentabilidad de los recursos naturales al ingreso económico de tal manera que la conservación sea atractiva. Una causa para que esto no se dé es la falta de inclusión de científicos en los planes de desarrollo y en la conformación de leyes y normatividad.

En el manejo integrado del recurso agua el balance hidrológico es el punto medular de la planeación. Sin embargo, entender el proceso hidrológico de manera integrada no es tarea fácil, por lo que la investigación debe incluir y/o considerar los siguientes puntos:

Aspectos científicos:

Analizar los diferentes componentes del ciclo del agua: dimensión vertical; dimensión horizontal; la interacción agua superficial-agua subterránea y el papel de la vegetación en este proceso.

Tabla 1. Secuencia para la planeación y seguimiento de investigación y planes de manejo en el concepto del manejo integral del agua.

<p>1. Conformación del equipo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificar personas e instituciones clave - Identificar los problemas - Establecer las metas - Desarrollar indicadores - Incluir opinión pública 	<p>Notas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Los consejos de cuenca son la entidad clave para el establecimiento de planes para el manejo integral del agua. Los problemas deben ser consensuados con presencia en aquellos de gran impacto. La opinión pública es importante para involucrar a los beneficiarios desde la planeación.
<p>2. Caracterizar la cuenca</p> <ul style="list-style-type: none"> - Realizar el inventario y recopilar información existente - Completar la información faltante y diseñar estrategias para ello. 	<ul style="list-style-type: none"> - En este apartado puede ser necesario el trabajo de campo y el diseño de muestreo para obtener la información faltante. Se pudiera detectar falta de instrumentación para sistematizar la toma de información de campo. Las herramientas avanzadas de análisis como sistemas de información, percepción remota, modelos, etc., son de gran ayuda.
<p>3. Identificar soluciones y afinar metas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Establecer los objetivos de manejo integral - Desarrollar indicadores - Identificar áreas críticas - Desarrollar medidas para obtener las metas planeadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede obtener la matriz de problemas y posibles soluciones en áreas críticas. Es deseable dividir la cuenca acorde a características hidrológicas (véase Figura 6). De esta matriz emanan los proyectos de investigación y se contabiliza el esfuerzo ya desarrollado por diferentes centros de investigación. La modulación espacial de procesos hidrológicos es de gran ayuda en este apartado.
<p>4. Diseño de investigación</p> <ul style="list-style-type: none"> - Definir proyectos acorde a los problemas y difrenciar investigación aplicada y de generación de conocimiento base. - Establecer proyectos con metas finitas en diferentes tiempos. - Proyectos multidisciplinarios y multinstitucionales. - Ubicar el proyecto en el gradiente de la cuenca (parte alta/media/baja) - Identificar patrocinadores (idealmente los proyectos de gran visión aparecen como demanda). 	<ul style="list-style-type: none"> - El diseño de investigación deberá considerar las dimensiones mencionadas anteriormente en áreas de asegurar su aplicabilidad. Los objetivos deben ajustarse acorde al interés del patrocinador manteniendo la esencia y las metas. Es deseable disgregar los grandes proyectos con objetivos en paralelo (no en serie) evitando la dependencia jerárquica con entregas tangibles propiciado a la vez el desarrollo científico y tecnológico. Se busca que la información científica sirva a tomadores de decisiones a realizar mejores planes del manejo del recurso agua y a los usuarios de los recursos naturales a entender la importancia de su preservación para mantener niveles de productividad atractivos económicamente y ecológicamente sustentables.
<p>5. Transferencia e implementación de planes de manejo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Documentación de resultados - Capacitación a diferentes niveles de toma de decisiones - Reuniones informativa 	<ul style="list-style-type: none"> - La información emanada de investigación deberá satisfacer los diferentes intereses científicos y técnicos primordialmente. La crítica a la ciencia es rica en que está limitada por la falta de utilidad comprobada por un lado y por el lado de las instituciones la implementación de resultados está limitada por aspectos legales, económicos y profesionales. Adicionalmente, en México la aplicación de resultados está limitada por aspectos culturales y de financiamiento. De hecho, el valor que se le otorga al recurso agua es extremadamente bajo relativo a otros costos de producción y a otros países.
<p>6. Seguimiento a estrategias</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de recomendaciones - Ajuste a recomendaciones - Documentación actualizada 	<ul style="list-style-type: none"> - La falta de observación a las leyes mexicanas en relación a los recursos naturales se ha identificado como una de las causas del deterioro; sin embargo, este aspecto escapa a la investigación cuya función es proveer de información digna para la adecuada toma de decisiones a diferentes niveles de injerencia. De ahí, que el presupuesto para este apartado es responsabilidad de los organismos operadores.

Establecer la correspondencia entre las escalas de tiempo y de espacio de cada uno de los componentes del ciclo del agua

Especificidad de la representación espacial asociada a cada uno de los componentes del ciclo del agua. Este apartado involucra el cambio de escala de estudio desde parcela, distrito, región, cuenca, etc., de tal manera que representen las heterogeneidades naturales y antropogénicas del espacio.

Cuantificar la interacción de los ciclos del agua, carbono, nitrógeno, etc.

Aspectos Sociales:

Establecer si los derechos tradicionales del uso del agua y del suelo estarían en conflicto con los objetivos del proyecto. En nuestro país es particularmente importante esta consideración dado que toda iniciativa de mejora que contravenga la normatividad encontrará serias dificultades para su implementación. Sin embargo, la investigación persigue proveer de herramientas de decisión para, en caso necesario, cambiar la normatividad.

Establecer si los productos del proyecto motivarán una migración o emigración no regulada, mercados de agua y garantizar que los beneficios del proyecto sean generalizados en las diferentes categorías de usuarios.

Aspectos económicos

Analizar la relación beneficio costo de las propuestas no sólo en términos monetarios sino de sustentabilidad de las acciones.

Identificar las oportunidades en el gradiente hidrológico de incentivar la productividad del agua para alentar la adopción de prácticas que propicien este efecto.

Generar información suficiente para el diseño de incentivos tarifarios (incluyendo subsidios) para equipos que mejoren la eficiencia en el uso del agua.

Generar información que sustenten los cargos por servicio de agua sea como cargo directo o como servicio ambiental.

Especificar indicadores para la evaluación del impacto económico y los datos requeridos para estos indicadores.

CONCLUSIONES

En México, los sistemas de gestión integrada de los recursos hídricos funcionan de manera deficiente. Esto se debe en gran medida a que el modelo de la gestión no corresponde a la realidad social en la que se pretende impactar (Sheridan, 2007). El sector usuario del recurso, representado por agricultores y ganaderos, no logran adecuarse a los nuevos roles que les corresponden dentro de un proyecto amplio de crecimiento sustentable. Tanto desde la realidad social y cultural que históricamente los ha relacionado con el recurso como medio de vida, como desde la perspectiva de crecimiento y/o desarrollo de las unidades productivas que detentan, la gestión integrada del recurso hídrico ha quedado relegada frente a las prioridades de sobre vivencia y preservación de sus modos de vida. Los motivos de la disparidad entre una gestión racional e integrada y el quehacer cotidiano del sector de usuarios mayoritario, se pueden sintetizar en tres problemáticas centrales que dan forma a la figura de conflicto característica de la gestión integrada de los recursos hídricos:

- Competencia por el recurso: escasez y acceso
- Vulnerabilidad climática: sequía e inundación
- Vulnerabilidad social: equidad, producción y mercado

Conocer cómo manejar y controlar los aspectos no deseados de la gestión del recurso a nivel de cuencas es considerada una vía sólida de negociación entre los tomadores de decisiones en materia de políticas públicas y los usuarios. Para ello, es indispensable elaborar un inventario-evaluación del conflicto generado por el recurso tanto desde la dimensión socioeconómica (participación-democracia, productividad-eficiencia) como de la cultural (usos y costumbres en el uso, prácticas tradicionales en la gestión).

Crecimiento, equidad y sustentabilidad son los tres factores que, idealmente, deberían ser el resultado de una GIRH adecuada a la diversidad de cuencas:

GIRH = CRECIMIENTO, EQUIDAD, SUSTENTABILIDAD

Esta ecuación es factible si existe un conocimiento real del entorno, tanto a nivel climático como social, para hacer viable la vinculación entre conocimiento técnico (tecnología sustentable) y usos sustentables del recurso (productividad) que garanticen la sostenibilidad del recurso en el largo plazo, sin afectar negativamente el entorno socioeconómico y cultural (cuencas y microregiones).

Desde la perspectiva metodológica resulta pertinente el recurso comparativo considerando el factor diversidad a partir de entornos de cuenca contrastantes: clima y variaciones climáticas, disponibilidad del recurso hídrico, vulnerabilidad y

riesgo climático, usos y productividad, gestión y conflicto, así como otros factores que deberán definirse en la observación práctica de estudios de caso. La comparación deberá, a su vez, sustentar contrastes de diversidad natural (medios áridos y semiáridos vs medios húmedos y subhúmedos) y social, que resultan relevantes al considerar la distribución del recurso a nivel nacional en relación con el factor presión demográfica y demanda y productividad del agua, como expresión de diferentes niveles de estrés de hídrico en una geografía de cuencas hidrológicas diversas, siendo, en este sentido, las cuencas localizadas en regiones áridas y semiáridas punto de partida hacia la búsqueda de un modelo de GIRH compatible con situaciones límite, que permita proponer un modelo de gestión sustentado en la diversidad y en la inclusión de regiones en las que el estrés hídrico es bajo o inexistente.

La investigación social en la toma de decisiones sobre los usos del agua, basada en conocimientos científicos de ciencias como economía, sociología y antropología social así como en estudios jurídicos e históricos, son necesariamente complementarios de los aspectos hidrológicos, geológicos, climáticos y tecnológicos. Desde esta perspectiva, la conjugación del conocimiento científico amplio y transversal sustenta una investigación de largo aliento orientada a la creación de nuevos conocimientos de frontera sobre la compleja realidad del agua como recurso prioritario.

LITERATURA CITADA

- Anaya G., M. 2002. Desertificación en América Latina y el Caribe: Estrategias para su Prevención y Control. En: 2do. Simposio Internacional sobre Degradación del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo. Pp 19–28.
- Comisión Europea. 2003. Hacia la gestión sostenible de los recursos hídricos. Un enfoque estratégico. Bruselas Luxemburgo. 351 pp.
- Comisión Nacional del Agua. 2004. Ley de Aguas Nacionales y su reglamento. México, D. F. 175 pp.
- _____. 2005. Comunicado de prensa No. 048/05. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.
- _____. 2006. IV Foro Mundial del Agua. Publicación Oficial para Delegados. México. 208 pp.
- _____. 2006. El Agua en México. IV Foro Mundial del Agua. Subdirección General de Programación. México, D.F. 34 pp.
- Dourojeanni, A. 2000. Procedimientos para el desarrollo sustentable. Naciones Unidas, CEPAL, ECLAC. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile 372 pp.
- _____. A. Jouravalev y G. Chávez 2002. *Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica*. Documento de trabajo No.1. CEPAL-EI Colegio de México, D.F.
- Environmental Protection Agency. 2005. Handbook for developing watershed plans to restore and project our waters. Washington, D. C. EUA.
- García José U. 2003. El fracaso de un modelo de desarrollo económico para la agricultura en Baja California Sur, México. Sociedades Rurales , Producción y medio Ambiente. Vol 4. No. 7 . 93–100.
- Guitrón, A. 2005. Modelación matemática en la construcción de consensos para la gestión integrada del agua en la cuenca Lerma Chapala. *En: Los Retos del Agua en la Cuenca Lerma Chapala*. Vargas Sergio y Mollar Eric, editores. pp 25–44.
- hartwick, j. m. and N. D. Olewiler. 1998. The Economics of Natural Resource Use. 2nd. Ed. 432 pp.
- Heilman, P., J. Stones, I. Sanchez C., H. Macías R., and R. S. Mann. 2001. Working Smarter: Research and Decision Support Systems in Mexican Agriculture. In: Modeling and Remote Sensing Applied to Agriculture (US and Mexico). C. W. Richardson, A. D. Baez and M. Tiscareno L. Eds. Pp 211 – 236.

- International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage. 2005. IPTRID network magazine. August 2005. 23 pp.
- Loyer, J. Y., J. Estrada A., R. Jasso I. y L. Moreno D. 1993. Estudio de los Factores que Influyen los Escurrimientos y el Uso del Agua en la Región Hidrológica 36. 365 pp.
- Natural Resources Conservation Service. 1999. New Strategies for America's Watersheds. National Academy Press. Washington, D.C. USA. 311 pp.
- Román L., A. e I. Sánchez C. 2004. Uso y manejo de bombas de pozo profundo. Publicación especial No. 2. CENID RASPA INIFAP. Gómez Palacio Durango. México. 23 pp.
- Sánchez C., I. J. L. Oropeza Mota y R. Jasso Ibarra. 2002. La degradación del suelo en las regiones áridas de México. El enfoque de la investigación. En: 2do. Simposio Internacional sobre Degradación del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo. Pp 67-77.
- _____. J. Estada A. and G. González C. 2002. Irrigation Technology in the Irrigation Districts of México. Water International. Vol. 27 No. 4 pp 578-584.
- _____. E. A. Catalán V. y A. Román L. 2003. Catálogo de cultivos y su demanda óptima de agua. Documento entregado a Cabeza de Sector, 90 pp.
- Sánchez C., I. 2005. Fundamentos para el Manejo Integral del Agua. Un enfoque de Simulación de Procesos. Libro Científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. 272 pp.
- _____. H. Macías Rodríguez, P. Heilmann, G. G. Cervantes, S. F. Mendoza M., M. A. Inzunza I. y J. Estrada A. 2006. Planeación Multiobjetivo en los Distritos de Riego de México. Aplicación de un Sistema de Auxilio para la Toma de Decisiones. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XXI, num 3. pp 101-111.
- Sánchez C., I. 2007. Manejo Integral del Agua en Cuencas Contrastantes de México: de la Investigación y Formación, a la Toma de Decisiones. Mega propuesta presentada al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Sheridan, C. 2007. Comunicación personal. Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS).
- Somlyódy, L., and Olli Varis. 2006. Freshwater under Pressure. International Review for Environmental Strategies, Vol 6, No 2. pp 181-204.
- World Water Assessment Programme. 2006. 2nd. UN World Water Development Report. 'Water, a shared responsibility'. The United Nations. USA. 550 pp.

Capítulo II

Sistema de Consulta y Procesamiento de Información Climatológica de México

M. C. Gabriel Díaz Padilla y Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	22
MÉTODOS DE APROXIMACIÓN	23
Bases de datos	23
Verificación de la calidad de los datos	24
Selección del generador climático adecuado	27
Generación de valores faltantes	33
RESULTADOS	35
CONCLUSIONES	36
LITERATURA CITADA	37

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es de crucial importancia la información climática con registros de calidad para la administración de riesgos relacionados con la variación y cambio en el clima (AGROASEMEX, 2006; Boissonade *et al.*, 2002). Éste tiene un comportamiento oscilatorio natural en cualquier periodo que se observe, ya sea días, años, incluso siglos (Magaña *et al.* 2005). También se considera uno de los factores ambientales determinantes en la adaptación, distribución y productividad de los seres vivos (FAO, 1981; Critchfield, 1983). El cambio climático influye directamente en actividades agropecuarias, pues las formas posibles para cultivar un terreno las determinan especialmente el clima y el suelo (Dennett y Elston, 1994).

Por otro lado, la industria, sobre todo la dependiente de materias primas del campo, presenta patrones estacionales de disponibilidad de dichas materias, condicionada por los efectos del clima durante el año; por lo tanto, debe considerarse como un recurso natural disponible al desarrollar una actividad productiva (Villalpando y García, 1993; Ruiz *et al.*, 1999), y dentro de éste, evaluar las restricciones a los sistemas productivos (Castro y Arteaga, 1993).

Para evaluar eficazmente las disponibilidades o limitantes climáticas regionales es necesario definir cuantitativamente el comportamiento en los elementos del clima como: la temperatura, precipitación pluvial, humedad ambiental, evaporación, radiación solar y viento, entre otros (Villalpando *et al.*, 1991), lo cual requiere la información climática representativa y confiable, mediante una base de datos climáticos con la máxima calidad en sus registros, actualizada y lo más completa posible, para apoyar áreas de investigación, planeación, desarrollo agrícola, pecuario y forestal, así como cubrir algunas otras expectativas de aplicación y constituir la como una herramienta de apoyo en cualquier campo del conocimiento, con información normalizada en cualquier periodo.

Aún con la importancia que representa la información climática, han sido pocos los esfuerzos por actualizarla en los últimos treinta años. El último trabajo relacionado lo realizó el Servicio Meteorológico Nacional en 1976; esa información se encontraba actualizada al año de 1970 (SMN, 1976); su utilidad ha sido considerable; sin embargo, la necesidad de contar con información renovada impulsó el desarrollo de bases de datos y sistemas de información climatológica a nivel nacional y estatal como los trabajos de García (1975) y Medina *et al.* (1994) para la República Mexicana, Villalpando y García (1993), Flores (1994), Ruiz *et al.* (2000a, 2000b) para el estado de Jalisco y Alcántar *et al.* (1999) para Michoacán.

A finales de los años 90's se dispusieron en el país diversas bases de datos relacionadas con el clima, la mayoría de ellas en disco compacto como ERIC I, ERIC II, Dat322, entre otros. Por su fácil distribución, estos datos los utilizó de manera intensiva la comunidad, como fuente de información climática hasta el año 2002, y a la fecha son la única fuente de datos conocida por algunos investigadores o instituciones usuarias (Vázquez, 2006).

En esta tesitura, el objetivo del presente capítulo es presentar un método para conformar una base de datos depurada de registros atípicos, detectar períodos con información faltante y estimarla posteriormente mediante un generador de información climática.

MÉTODO DE APROXIMACIÓN

Base de datos

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de la recopilación y análisis de la información climática diaria, la cual se compila en una base de datos climatológica nacional; los datos son registros diarios de precipitación pluvial, temperaturas mínima y máxima y evaporación de 5,088 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de monitoreo meteorológico de la Comisión Nacional del Agua (CNA) del país.

Esta información se integró en archivos de hoja de cálculo en el programa Excel de Microsoft y se revisó, con el objetivo de identificar las estaciones que contenían como mínimo 20 años de registros con información, y al menos el 75 por ciento de ella dentro de un período que comprende del año 1961 al 2003, sin que hubiesen suspendido labores antes del año 1990. Aplicando estos requerimientos sólo quedaron 2,271 estaciones (Figura 1).

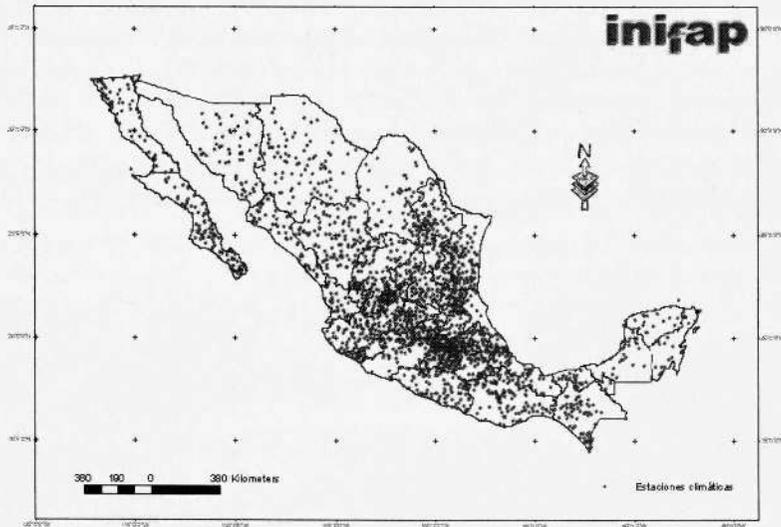


Figura 1. Distribución geográfica de 2,271 estaciones climatológicas en la república mexicana.

Verificación de la calidad de los datos

Posteriormente, con ayuda del programa R-Climdex (Zhang y Yang, 2004) se identificaron y eliminaron aquellos registros con datos de precipitación diaria menores a cero, datos de temperatura máxima diaria por debajo de la temperatura mínima, datos registrados en los días 29 de febrero cuando no es año bisiesto y en días 31 en meses con 30 días.

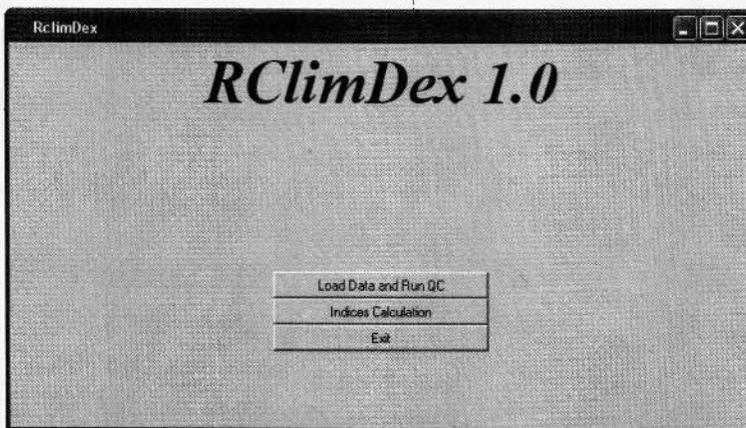


Figura 2. Panel de Inicio del programa RclimDex 1.0.

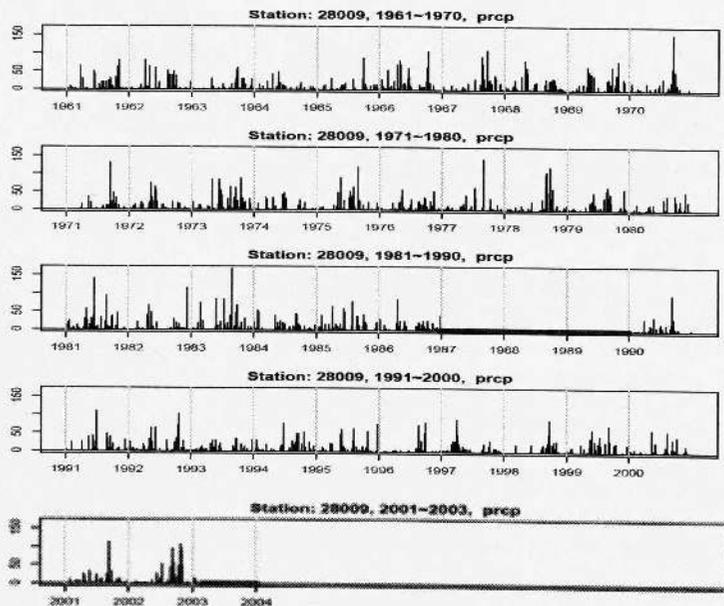


Figura 3. Serie de datos para la variable precipitación.

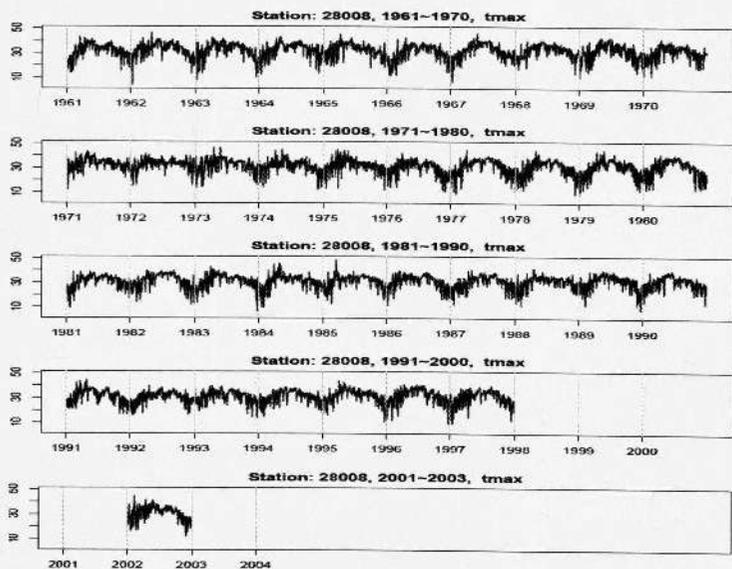


Figura 4. Serie de datos para la variable temperatura máxima.

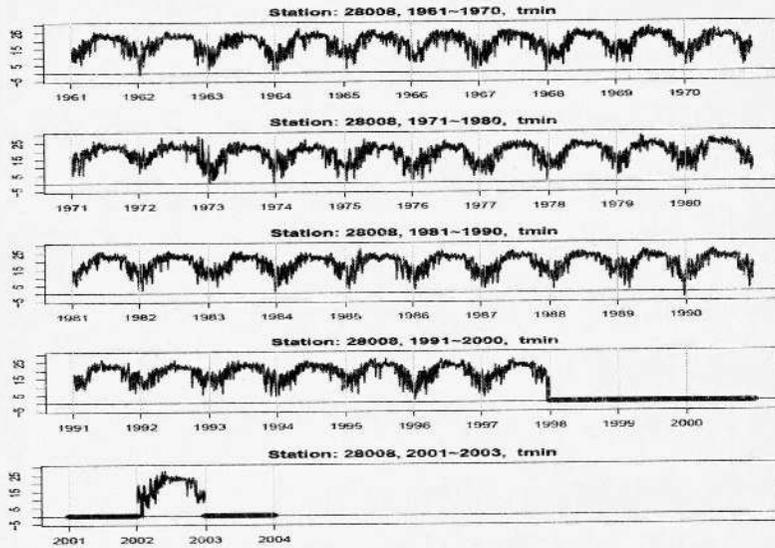


Figura 5. Serie de datos para la variable temperatura mínima.

Por otro lado, el programa también permite verificar reportes tabulares de inconsistencias en las variables climáticas ya mencionadas (Figura 6).

year	month	day	prcp	tmax	tmin	tmax-tmin
1966	11	27	0	23	23	0
1986	12	10	9.5	12	12	0
1989	12	23	20	8	8	0

year	month	day	prcp	tmax	tmin
1961	1	30	-1	0	19
1961	12	24	-1.5	4.5	30
1961	12	28	-0.5	4	11.5
1962	1	2	-0.5	2.5	10.5
1962	1	6	-0.3	-0.2	16
1962	1	7	-0.2	6	24
1962	1	8	-0.1	1.5	24.5
1962	1	10	-0.4	-0.3	6
1962	1	11	-0.6	-0.4	2
1962	1	12	-1.1	-0.7	5
1962	1	13	-0.9	1.5	23
1962	1	28	-0.5	2	21.5
1962	1	29	-0.5	3	22
1962	1	30	-1.5	3	23.5
1962	1	31	-0.5	2.5	25
1962	3	2	-0.5	1.5	22
1962	3	16	-0.2	3	9.5

Figura 6. Reportes tabulares de inconsistencias en las bases de datos climáticas.

Una vez revisada la calidad y coherencia de la información, se estimaron los registros con información faltante mediante el uso de un generador climático.

Selección del generador climático adecuado

Un generador climático produce una serie de tiempo con datos atmosféricos para un lugar específico, cuya longitud es ilimitada y generada basándose en las características estadísticas del tiempo observado de una localización específica (Semenov y Barrow, 1997). En la investigación agrícola es fundamental contar con información climática completa; sin embargo, esto suele ser un problema, por ello, los generadores climáticos son una opción factible que permite completar la información no registrada en una serie de precipitación, temperatura mínima y/o temperatura máxima. Actualmente se ha desarrollado una gran cantidad de programas computacionales que generan datos climáticos y por esta situación fue necesario implementar una prueba estadística que permitiera determinar cuál de éstos ofrecía una mayor aproximación a los registros reales.

Para la prueba fue necesario un proceso de muestreo de estaciones, el cual permite una referencia sobre lo que sucede en el total de estaciones, con base en la información contenida en una muestra. El proceso de muestreo empleado fue aleatorio simple, seleccionado de una población de tamaño N , de tal forma que cada muestra posible de tamaño n tiene la misma probabilidad de ser seleccionada (Scheaffer *et al.*, 1994). La ecuación utilizada en el cálculo de tamaño de la muestra (n) fue la siguiente:

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2} \quad 1$$

con

$$D = \frac{B^2}{4} \quad 2$$

Donde: N es el tamaño de la población, σ^2 representa la varianza poblacional de la variable de interés, B es el margen de error para la estimación (habitualmente es del cinco por ciento), D corresponde al cociente del margen de error para la estimación elevada al cuadrado del valor de tablas correspondiente a un nivel de confianza del noventa y cinco por ciento (1.64) el cual se redondea a dos.

Debido a que las estaciones se ubican en zonas con condiciones meteorológicas heterogéneas, se consideró un área geográfica con diversidad de climas para observar si los resultados de la generación de información faltante era acorde a la ubicación de su estación de origen.

Por lo anterior se consideró trabajar con la información de una muestra de estaciones distribuidas a lo largo y ancho del territorio del estado de Veracruz, debido a su diversidad climática. El tamaño de muestra quedó establecido en 12 estaciones, las cuales se seleccionaron aleatoriamente y el análisis comparativo se realizó con base a la variable precipitación. La distribución geográfica de las estaciones meteorológicas se despliega en la Figura 7.

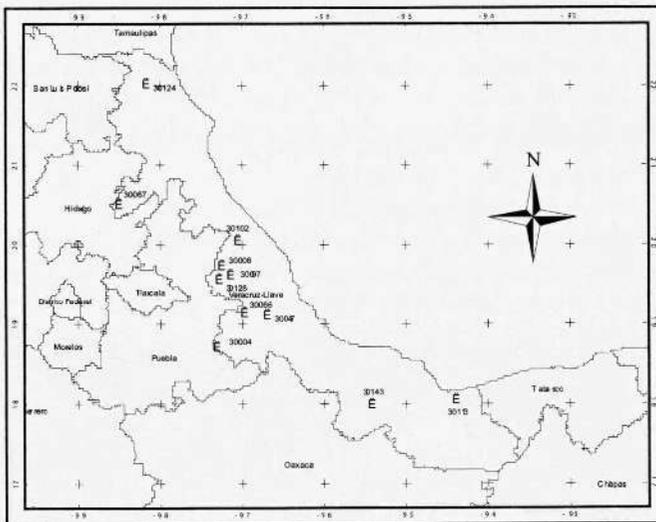


Figura 7. Estaciones seleccionadas del estado de Veracruz.

En el Cuadro 1 se muestra una lista de las estaciones seleccionadas con un muestreo aleatorio, y se anexa información que detalla la ubicación geográfica y el clima predominante donde se instalaron.

Cuadro 1. Descripción de las estaciones consideradas en la muestra.

Clave de la Estación	Nombre de la Estación	Clima	Latitud	Longitud	Elevación msnm	Período de observación
21040	Guadalupe, Buenavista	Seco	-97°21'36"	19°22'33"	2,407	1961-1988
30128	Perote, Perote	Seco	-97°16'01"	19°34'59"	2,329	1965-1997
30004	Acultzingo, Acultzingo	Templado	-97°18'00"	18°43'01"	1660	1961-1980
30008	Altotonga, Altotonga	Templado	-97°15'00"	19°45'00"	1899	1961-1991 1993-1997
30066	Huatusco de Chicuellar	Templado	-96°57'00"	19°09'00"	1198	1961-1990 1992-1997
30067	Huayacocotla	Templado	-98°28'59"	20°31'58"	2100	1961-1989
30097	Los pescados, Perote	Templado	-97°07'59"	19°35'59"	2,518	1964-1997
30047	El Coyol, Comapa	Lluvioso	-96°42'00"	19°07'11"	610	1964-1997
30102	Martínez de la Torre	Lluvioso	-97°03'00"	20°04'01"	85	1961-1997
30113	Nanchital	Lluvioso	-94°22'59"	18°04'01"	16	1960-1983
30124	Pánuco, Pánuco	Lluvioso	-98°10'01"	22°03'00"	9	1961-1988
30143	Juan Rodríguez Clara	Lluvioso	-95°24'00"	18°00'00"	113	1961-1984 1993-1997

Se considera importante que la generación de información climática sea lo más cercana a lo presentado en la realidad; para ello se extrajo información registrada durante la operación de la estación meteorológica en distintos periodos de días. Para esta labor; se seleccionaron grupos de datos en distintos tiempos, tomando como base un esquema de muestreo aleatorio simple con el fin de que la sustracción de información representara fielmente la serie de datos observados. El proceso para la seleccionar estos grupos de datos fue el siguiente:

1. Se contabilizaron todos los registros con información completa en las variables de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima de cada estación meteorológica; se eliminaron los que carecían de información en alguna de estas variables.
2. Se contabilizó el número total de grupos con series continuas de información en periodos de 1, 5, 10, 15 y 30 días, para cada una de las estaciones.
3. Se calcularon cinco tamaños de muestra (uno por serie), para posteriormente seleccionar los elementos de la muestra mediante un muestreo aleatorio.

El objetivo de este proceso es corroborar, mediante pruebas de hipótesis estadísticas, si existe diferencia significativa entre los valores reales de precipitación y los generados por las rutinas incluidas en los programas de libre acceso ClimGen (Nelson, 2003), el cual puede obtenerse en la dirección: <http://www.bsyse.wsu.edu/climgen> y Lars-WG (Semenov y Barrow, 1997) que se encuentra disponible en el sitio <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg/download.htm>.

Las hipótesis a probar son:

H_0 : No existen diferencias entre los valores observados de precipitación y los generados por ClimGen y Lars-WG.

vs

H_1 : Existen diferencias entre los valores observados de precipitación y alguno de los generados por ClimGen y Lars-WG.

Para probar esta hipótesis existen dos métodos:

- a. Las pruebas paramétricas que son un método de inferencia, relacionado con la estimación y verificación de hipótesis sobre un parámetro poblacional, y
- b. Las pruebas no paramétricas que son un método apropiado cuando las suposiciones mínimas de su aplicación no se cumplen para un

procedimiento paramétrico (independencia, normalidad, homogeneidad de varianza, etc.), o no se refieren a parámetros de población (Ramírez y Lopez, 1993).

Considerando lo anterior y el conocimiento de que los datos de la precipitación difieren de una distribución normal, se contrastaron las hipótesis con los métodos no paramétricos de Wilcoxon y Friedman, ya que permitirían detectar las diferencias entre los datos observados y los generados para cada una de las series de información en los periodos previamente establecidos. Con la prueba de Wilcoxon se realizó el análisis entre pares de datos; es decir, se contrastaron las combinaciones posibles de las tres fuentes de información. Por otro lado, la prueba de Friedman permitió una comparación múltiple entre los datos originales, los generados por Lars-WG y los generados por ClimGen de una sola vez.

Los datos se procesaron en el programa STATISTICA 7.1, con el apoyo del módulo de estadística no paramétrica, el cual al analizar la información da como resultado un valor p o valor de significancia, que puede utilizarse como un índice de la fuerza probatoria de los datos contra la H_0 , es decir, cuanto menor sea el valor de p , mayor será la carga de la prueba en contra de la hipótesis nula (Abraira, 2002). Los valores de p resultantes de las pruebas no paramétricas se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Valores de p asociados a las pruebas de Wilcoxon y Friedman.

Prueba	Wilcoxon												Friedman					
	Observados Vs ClimGen						Observados Vs Lars-WG						Observados Vs ClimGen Vs Lars-WG					
	Estación/Período	1	5	10	15	30	1	5	10	15	30	1	5	10	15	30		
21040	0.88	0.98	0.06	0.15	0.24	0.72	0.92	0.22	0.99	0.12	0.98	0.97	0.01 ^L	0.10	0.16			
30128	0.72	0.30	0.07	0.00 ^a	0.56	0.21	0.42	0.00 ^E	0.00 ^E	0.00 ^E	0.83	0.47	0.15	0.01 ^L	0.00 ^b			
30004	0.15	0.54	0.14	0.72	0.15	0.15	0.31	0.79	0.49	0.87	0.02 ^b	0.88	0.15	0.23	0.49			
30008	0.73	0.90	0.94	0.85	0.78	0.47	0.64	0.48	0.16	0.97	0.78	0.76	0.91	0.46	0.90			
30066	0.00 ^E	0.59	0.96	0.73	0.72	0.00 ^a	0.28	0.05 ^a	0.76	0.92	0.00 ^{b,c}	0.20	0.04 ^L	0.85	0.90			
30067	0.02 ^E	0.15	0.26	0.34	0.46	0.30	0.02 ^E	0.78	0.38	0.06	0.06	0.00 ^c	0.18	0.17	0.08			
30097	0.57	0.17	0.97	0.18	0.08	0.18	0.82	0.89	0.01 ^E	0.15	0.36	0.78	0.52	0.02 ^L	0.02 ^c			
30047	0.87	0.16	0.10	0.04 ^a	0.84	0.84	0.19	0.38	0.31	0.95	0.80	0.21	0.59	0.58	0.95			
30102	0.73	0.11	0.04 ^a	0.41	0.00 ^a	0.45	0.24	0.26	0.06	0.52	0.29	0.77	0.20	0.35	0.00 ^c			
30113	0.32	0.56	0.31	0.00 ^a	0.49	0.27	0.75	0.66	0.81	0.70	0.61	0.59	0.63	0.08	0.33			
30124	0.92	0.09	0.95	0.70	0.48	0.93	0.72	0.20	0.03 ^E	0.15	0.73	0.09	0.54	0.12	0.39			
30143	0.25	0.55	0.84	0.24	0.55	0.03 ^a	0.96	0.60	0.10	0.76	0.00 ^b	0.33	0.96	0.34	0.82			

^a Se detectaron diferencias entre los valores observados y los generados, considerando un valor límite de rechazo de $\alpha = 0.05$.

^b Las comparaciones múltiples de Friedman detectaron diferencias en los valores generados por Lars-WG considerando un valor límite de rechazo de $\alpha = 0.05$.

^c Las comparaciones múltiples de Friedman detectaron diferencias en los valores generados por ClimGen considerando un valor límite de rechazo de $\alpha = 0.05$.

Con base en los resultados anteriores se determinó el porcentaje de H_0 's no rechazadas, los cuales se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Resumen de hipótesis nulas no rechazadas con el uso de las pruebas de Wilcoxon y Friedman.

Concepto	Prueba Wilcoxon		Prueba Friedman	
	Observados Vs	Observados Vs	Observados Vs	Observados Vs
	ClimGen	Lars-WG	ClimGen	Lars-WG
Total de pruebas realizadas	60	60	60	60
H_0 's no rechazadas	53	52	56	52
H_0 's rechazadas	7	8	4	8
Porcentaje de H_0 's no rechazadas	88%	87%	93%	87%

^a H_0 : No existen diferencias entre los valores observados de precipitación y los generados por ClimGen y Lars-WG.

Con este fundamento se considera que el uso de cualquiera de estos generadores puede proporcionar datos climáticos confiables, ya que los obtenidos por ambos generadores tienen «altos» niveles de coincidencia con respecto a los datos reales.

Tanto ClimGen como Lars-WG tienen un formato bien definido de entrada de datos para generar registros faltantes, y esto involucra un manejo previo de la información fuente; por esto se consideró factible trabajar con ClimGen debido a que sus estimaciones son lo suficientemente aproximadas a las registradas originalmente y a la facilidad de empleo, en comparación con el procedimiento que debe seguirse con Lars-WG, el cual requiere mayor cantidad de procesos previos para preparar el formato de los datos adecuado.

Generación de valores faltantes

Una vez revisada la calidad y coherencia de la información se estimaron datos faltantes de temperatura y precipitación pluvial de las 2,271 estaciones climatológicas, con el programa ClimGen como se muestra en la Figura 8.

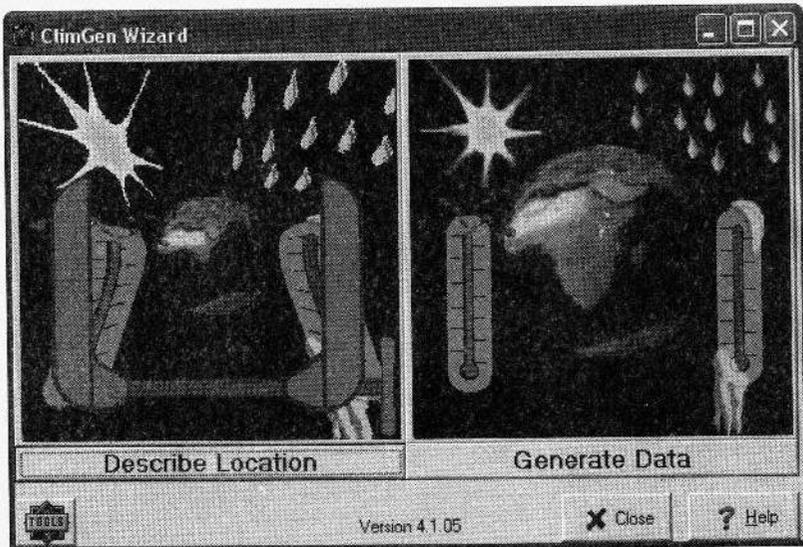


Figura 8. Panel de Inicio del programa ClimGen 4.1.05.

Este programa requiere un archivo por cada año de información y los datos faltantes deben registrarse con el valor -9999. Los registros con información son procesados, analizados y, en base a ellos, se calculan los parámetros necesarios para generar datos de precipitación y temperatura.

Los datos de temperatura diarios se generan con un proceso de interpolación, usando un modelo cuadrático llamado «Spline», sin necesidad de utilizar una variable de radiación, ni realizar regresiones periódicas. Se asume que la temperatura es un proceso débil y estacionario (Matalas, 1967). Por lo anterior, se considera que tanto las temperaturas máxima como mínima son un proceso estocástico continuo, con medias diarias y desviaciones estándar, condicionadas por el estado de la precipitación (húmedo o seco) del día (Richardson, 1981). Las series de tiempo de elementos residuales, tanto de las temperaturas máxima como mínima, se obtienen de remover las medias periódicas y del escalamiento periódico por las desviaciones estándar; así, los elementos se analizan para la dependencia del tiempo y la correlación cruzada.

Por otro lado, los datos de precipitación se generan utilizando cadenas de Markov para determinar la ocurrencia de precipitación, y mediante la función Weibull se calcula la cantidad de lluvia que pudo haberse precipitado. Una de las ventajas que ofrece este software es mantener los valores originales y sólo sustituir con un valor generado los registros donde existe un faltante (-9999). En la Figura 9 puede apreciarse de forma práctica el proceso de generación de datos.

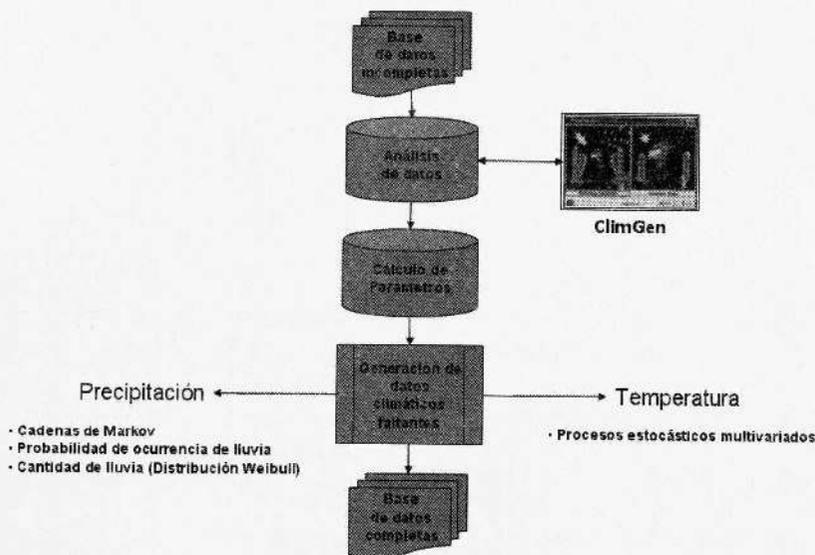


Figura 9. Proceso de generación de información.

Una vez completo este proceso, los datos se exportaron a una plantilla en Excel para contar con series de información completa de cada una de las 2,271 estaciones distribuidas en todo el territorio nacional y para facilitar su exportación a formato DBF, el cual simplificaría los posteriores procesos de información climática.

RESULTADOS

Como parte de las actividades de investigación sobre información climática en el INIFAP, era de suma importancia contar con una herramienta automatizada que procesara y analizara información en períodos diarios, mensuales, anuales e históricos, bajo un ambiente computacional accesible que integrara módulos de visualización gráfica de los datos de cada una de las 2,271 estaciones climáticas repartidas en todo el país.

Díaz y Cortina (2005) desarrollaron un sistema con funciones específicas, distribuidas en distintos módulos, cuya tarea es procesar la información climática contenida en los archivos con formato DBF y lleva como nombre Sistema de Consulta y Procesamiento de Información Climatológica de México (SICLIMA), cuyo panel de entrada se despliega en la Figura 10.

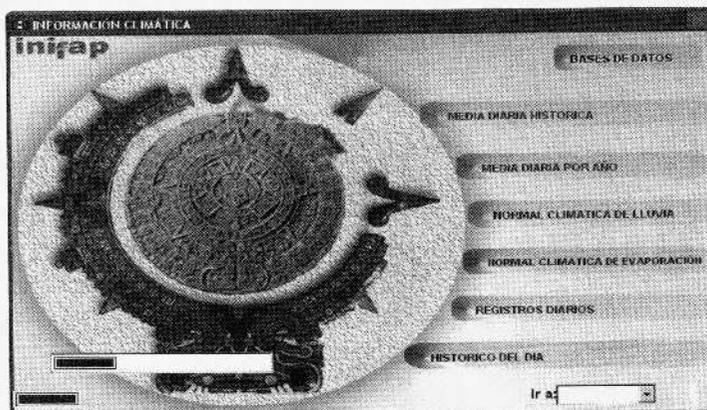


Figura 10. Panel de Inicio del sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México (SICLIMA).

Con el uso de este sistema se pueden procesar y consultar datos relacionados con:

- * Medias diarias históricas
- * Medias diarias anuales
- * Normales climáticas de lluvia
- * Normales climáticas de temperatura
- * Normales climáticas de evaporación
- * Históricos del día
- * Registros diarios

CONCLUSIONES

La actualización de información climática es una actividad que no se realizaba desde el año 1992, por lo que este trabajo implicó una ardua tarea e inversión de tiempo y personal para disponer de 2,271 estaciones, distribuidas en toda la república mexicana, con una base de datos climáticos que refleja adecuadamente las condiciones climáticas del territorio nacional.

Debido a la cantidad disponible de información climática fue necesario desarrollar un sistema de consulta que realizara elaborados procesos aritméticos y dieran como resultado indicadores vitales de gran apoyo en la toma de decisiones para distintas áreas de interés.

Las actuales bases de datos fueron el insumo principal en la edición de ejemplares relacionados con las estadísticas climatológicas básicas de cada uno de los estados del país y en el proceso de interpolación a una resolución de 90 metros de las variables precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima y evaporación, lo que originó un acervo cartográfico digital, el cual puede procesarse con el uso de los sistemas de información geográfica.

LITERATURA CITADA

- Abraira, V. 2002. Contraste de hipótesis: el valor de *p*. SEMERGEN 28(7), 374-375.
- AGROASEMEX, S.A. (2006). La Experiencia Mexicana en el Desarrollo y Operación de Seguros Paramétricos Aplicados a la Agricultura. Querétaro, Qro. México.
- Alcántar R., J. J., J. Anguiano C., V. M. Coria A., G. Hernández R., J. A. y Ruiz C. 1999. Áreas potenciales para el cultivo del aguacate en el estado de Michoacán. Revista Chapingo Serie Horticultura 5:151-154.
- Boissonnade, A. C.; L. J. Heitkemper, and D. Whitehead 2002. Weather Data: Cleaning and Enhancement. In: Dischel, Robert (ed). Climate Risk and the Weather Market. Financial Risk Management with Weather Hedges. RISK Books. London.
- Castro Z., R. y R. Arteaga R. 1993. Introducción a la Meteorología. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 275 p.
- Critchfield, H. J. 1983. General Climatology. 4th ed. Prentice Hall, New Jersey, U. S. A. 435 p.
- Dennett, M. D. and J. Elston 1994. Agricultural systems. In: Griffiths, J. F. (ed.). Handbook of Agricultural Meteorology. Oxford Univ. Press. New York, U. S. A. p. 236-240.
- Díaz P., G. y M. Cortina C. 2005. Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Campo Experimental Xalapa. Xalapa, Veracruz, México.
- Food Agriculture Organization. 1981. Informe del Proyecto de Zonas Agroecológicas. Vol. 3: Metodología y Resultados para América del Sur y Central. FAO 48/3. Roma, Italia. 143 p.
- Flores L., H. E. 1994. Análisis agroclimático del noreste de Jalisco, México, para el manejo en la producción de maíz *Zea mays* L. de temporal. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx., México. 155 p.
- García, E. 1975. Datos de precipitación mensual, carta de climas para la República Mexicana. Nacional Autónoma de México. México, D. F., México.
- Magaña, V., Matias M., J., Morales, R. y Millán, C. 2005. Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología. México. Obtenido de la red el 01 de febrero de 2006: <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/437/matiasmendez.html>

- Matalas, N. C. 1967. Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Research* 3(4), 817-829.
- Medina G., G. A. Bravo L., R. A. Martínez P. y R. Aveldaño S. 1994. Growth potential of plant species in Mexico. In: *Proc. World Congress of Soil Science*. Acapulco, Gro., México. 4(B):175-176.
- Nelson, R. 2003. ClimGen. Weather Generator. Washinton State University. Obtenido el 5 de noviembre de 2003: <http://www.bsyse.wsu.edu/climgen>.
- Ramírez G., M. y Q. López T. 1993. Métodos estadísticos no paramétricos. Universidad Autónoma Chapingo, México 223 p.
- Richardson, C. W. 1981. Sthocastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research* 17(1):182-190.
- Ruiz C., J. A., G. Medina G., Z. Ortiz T., I. J. González A., H. E. Flores L., R. A. Martínez P., y K. F. Byerly M. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. INIFAP. CIRPAC. Campo Experimental Centro de Jalisco. Conexión Gráfica (ed.). Guadalajara, Jal., México. 324 p. (Libro Técnico Núm. 3).
- Ruiz C., J. A., J. L. Ramírez D., F. J. Flores M., y J. J. Sánchez G., 2000a. Cambio climático y su impacto sobre la estación de crecimiento de maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23(2):169-181.
- Ruiz C., J. A., J. L. Ramírez D., F. J. Flores M., y J. J. Sánchez G. 2000b. Cambio climático y efecto sobre las áreas potenciales para maíz en Jalisco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 23(2):183-193.
- Semenov, M. A. and E. M. Barrow. 1997. Use of stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climateic Change* 35, 397-414.
- Scheaffer, R. L., W. Mendenhall, y L. Ott. 1994. Elementos de Muestreo. Trad. de la 3ª. ed. En inglés por Gilberto Rendón Sánchez y José Roberto Gómez Aguilar. Grupo Editorial Iberoamericana. México. 321 p.
- Servicio Meteorológico Nacional. 1976. Normales climatológicas, período 1941-1970. Dirección General de Geografía y Meteorología. Servicio Meteorológico Nacional. México, D. F., México. 799 p.
- Vázquez A., J. L. 2006. Datos climáticos de la República Mexicana: Panorama actual y requerimientos inmediatos. Primer Foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz. México. p. 1-14.

- Villalpando I., J. F., B. C. Biwas, A. Coulibaly, Z. Gat, Z., B. S. Lomoton, K. B. Perry y E. S. Ulanova. 1991. Practical use of agrometeorological data and information for planning and operational activities in all aspects of agriculture, including farming systems. WMO. CAgM (USA). Report No. 60. Geneva, Switzerland. 131 p.
- Villalpando I., J. F. y E. García. 1993. Agroclimatología del Estado de Jalisco. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Laboratorio Bosque La Primavera. Guadalajara, Jal., México. 40 p. y anexo cartográfico.
- Zhang X. y F. Yang. 2004. RclimDex 1.0. Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. Obtenido el 9 de noviembre de 2004:
<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>.

Capítulo III

Recarga Artificial en Acuíferos. Estudio de caso La Comarca Lagunera, México

M. C. Carlos Gutiérrez Ojeda y M. I. Gerardo Ortiz Flores

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	42
Comarca Lagunera, estudio de caso	42
ANTECEDENTES	43
Selección del sitio	43
Capacidad de infiltración del terreno	44
Diseño del experimento	45
Desarrollo del experimento	46
RESULTADOS	47
CONCLUSIONES	47
LITERATURA CITADA	49

INTRODUCCIÓN

La sobreexplotación de las reservas de agua es una realidad en el mundo, y en algunos países ha alcanzado cifras alarmantes que ponen de manifiesto la vulnerabilidad de los ecosistemas que de éstas se sirven (Custodio y Llamas, 1976; Freeze an Cherry, 1979). En México, el 64 por ciento del volumen para abasto público; el 33 por ciento del volumen para uso agropecuario, y el 24 por ciento del volumen que utiliza la industria, provienen de las aguas subterráneas (CNA, 2006). De los 653 acuíferos identificados en el país, al 2004, 104 tenían la categoría de sobreexplotados; esto es por la extrema presión sobre el recurso en zonas de alta demanda y escasa disponibilidad. Otro problema añadido a la sobreexplotación es la calidad del agua debido a la estrecha relación existente entre la profundidad de extracción y esta variable. También en algunas zonas del país como en el acuífero principal de la Comarca Lagunera en el Distrito de Riego 017 en parte de los estados de Coahuila y Durango, la sobreexplotación es tal que actualmente se extrae agua fósil con más de diez mil años de antigüedad con las características químicas que esta situación implica (Brouste, 1996).

Comarca Lagunera, estudio de caso

La explotación intensiva del acuífero principal de la Región Lagunera, Coahuila-Durango ha provocado en las últimas décadas el avance de los frentes de arsénico, la reducción de los niveles de bombeo y la disminución de los caudales de extracción, en especial en la zona donde se abastece de agua a la población (Figura 1). Los estudios realizados por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en 1991 y 2000 demostraron la factibilidad de incrementar el volumen de agua disponible mediante la recarga artificial del acuífero de Villa Juárez, Durango. Sin embargo, la competencia por el recurso subterráneo en dicha zona por la termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), puede limitar la viabilidad del proyecto. Debido a lo anterior, fue necesario evaluar la factibilidad del sitio, comparar su impacto y limitaciones con respecto a otras zonas potenciales para la recarga, en especial el tramo del río Nazas comprendido entre la derivadora San Fernando y el estrechamiento Calabazas.

El objetivo fundamental del proyecto de recarga artificial en el acuífero principal de La Laguna, consistió en establecer la factibilidad de emplear esta metodología, ya sea por vía superficial o por inyección directa en pozos (Asano, 1985; Jonson and Finlayson, 1989), con el propósito de recuperar los niveles del agua subterránea, preservando además la calidad de ésta.

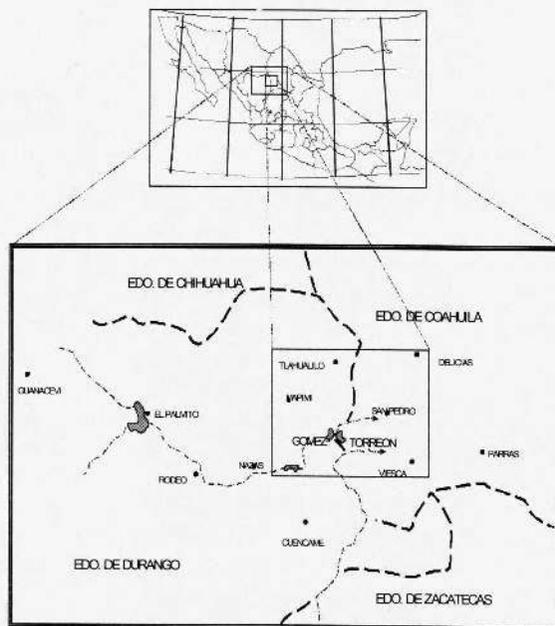


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

ANTECEDENTES

Con el propósito de verificar la factibilidad de la recarga artificial por la vía superficial, en 1991 y 1999 se realizaron algunas visitas a la Comarca Lagunera, para seleccionar un sitio apropiado donde llevar a cabo en forma experimental el proyecto.

Los recorridos efectuados a lo largo del cauce del río Nazas, desde la derivadora San Fernando hasta el poblado de San José de Viñedo, permitieron identificar los sitios, todos ellos ubicados dentro de la zona denominada como reserva exclusiva para agua potable.

Los sitios seleccionados se ubican sobre el cauce del río Nazas a la altura de la derivadora San Fernando, Calabazas, área del desfogue 3+500 y 11+420.

Selección del sitio

La zona aledaña a la derivadora San Fernando y Calabazas posee características idóneas para propiciar la fácil infiltración del agua para recarga; sin embargo, existen otros factores que limitan la viabilidad del proyecto.

En 1991, el sitio ubicado en la vecindad del poblado Bella Unión, a pesar de tener características menos idóneas que los anteriores desde el punto de vista granulométrico, constituye una excelente opción debido a su ubicación respecto al canal principal Sacramento. En efecto, el desfogue del canal principal Sacramento del cadenamamiento 11+420, constituye la estructura ideal de suministro y control del agua para llevar a cabo la recarga (IMTA, 1991; 1992).

En el año 2000, el sitio ubicado en la vecindad del Desfogue 3+500, a pesar de tener características también menos idóneas que los sitios ubicados en San Fernando y Calabazas, desde el punto de vista granulométrico, ya que los materiales del estrato superficial no son tan gruesos, constituye una excelente opción debido a su ubicación respecto al canal principal Sacramento (IMTA, 1999, 2000). De la misma manera que el experimento realizado en 1991, el desfogue del canal principal Sacramento del cadenamamiento 3+500, constituye la estructura ideal de suministro y control de agua.

Los sitios seleccionados corresponden a la zona del cauce del río Nazas en la vecindad del desfogue 3+500 y 11+420. Las depresiones pueden aprovecharse como embalses, requiriendo actividades de nivelación y construcción de un dique para prevenir un desbordamiento y provocar problemas viales por la presencia del periférico.

Capacidad de infiltración del terreno

Una vez seleccionado el sitio para el experimento se procedió a realizar pruebas de infiltración dentro del área. Esto se llevó a cabo mediante infiltrómetros de doble anillo (De la Peña y Llerena, 2001).

Se eligieron tres sitios para llevar a cabo las pruebas, ubicados estratégicamente en el área para obtener valores representativos. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de pruebas de infiltración.

Sitio	Capacidad de Infiltración (mm hr ⁻¹)
Experimento 1991	
1	40.0
2	72.5
3	17.0
Experimento 2000	
1	240
2	410
3	730

Diseño del experimento

De acuerdo con el diseño del proyecto, el agua proveniente del sistema de presas y que conduce el canal Sacramento debe ser desviada a través de los desfogues 11+420 (1991) y 3+500 (2000) para descargar directamente al embalse de sedimentación.

En el experimento de 1991 se utilizaron 44 hectáreas de la superficie del río Nazas, en donde de acuerdo con el levantamiento topográfico realizado en la zona de interés fue posible diseñar un esquema de recarga, consistente de un embalse de sedimentación y infiltración. Para la construcción de estos embalses se proyectaron los diques A, B y C (Figura 2).

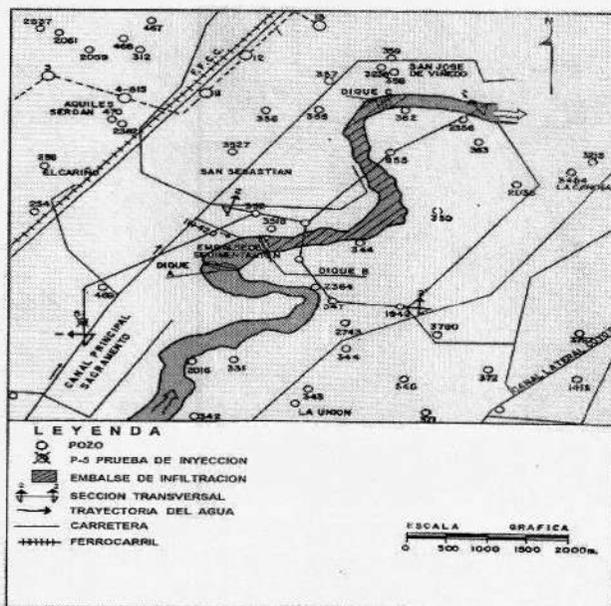


Figura 2. Diseño del experimento (1991).

En el experimento realizado en el 2000, los embalses corresponden a depresiones naturales en el lecho seco del río Nazas. De acuerdo con el levantamiento topográfico, la capacidad que puede almacenar el embalse No. 1 es de 197 mil 386 m³ a la elevación 1,122.5 msnm (metros sobre el nivel del mar), mientras que su elevación inferior corresponde a los 1,116.00 msnm; en este embalse se recomendó colocar escalas a las elevaciones 1,121.00 y 1,122.50 msnm. Adicionalmente fue necesario realizar algunos trabajos de nivelación del terreno y construcción de un bordo sobre el sifón que cruza el río a 10 m aguas abajo del embalse (Figura 3).

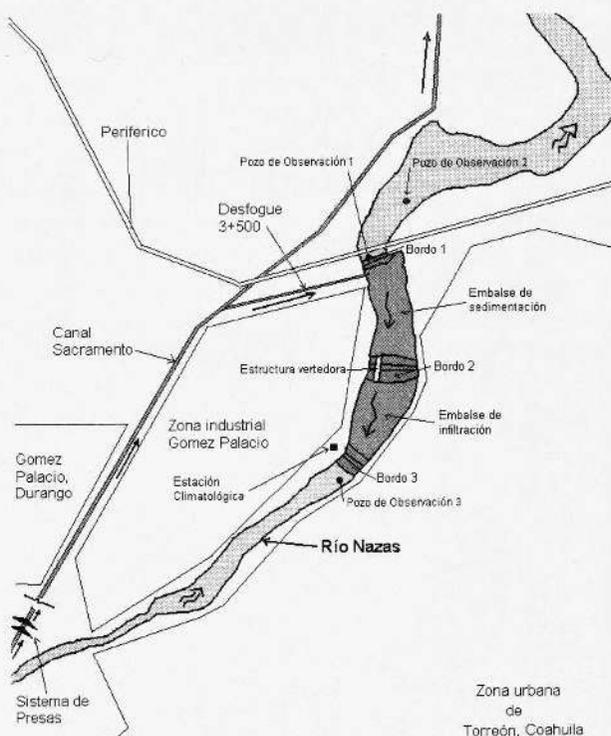


Figura 3. Diseño del experimento 2000.

De acuerdo con el censo de pozos (IMTA, 1991 y 2000), se identificaron los aprovechamientos cercanos al área de experimentación y se seleccionó una red de pozos para la observación y monitoreo de los experimentos. Posterior al inicio del experimento en el año 2000, se perforaron y equiparon tres pozos de observación, los cuales se ubicaron gradiente arriba y abajo del experimento.

Desarrollo del experimento

Para el experimento realizado en 1991, se dio inicio el 22 de julio a las 14:00 horas, descargando un gasto de $2 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ a través del desfogue 11+420 del canal Sacramento. Este caudal se mantuvo constante hasta el día 11 de agosto del mismo año, fecha en que finalizó al experimento, debido a las descargas efectuadas en la presa El Palmito, producto de las fuertes precipitaciones ocurridas en la cuenca alta del Nazas.

La fase experimental del proyecto se inició el día 28 de mayo del 2000, a las 7:30 horas, descargando gastos variables que fluctuaron entre 0.3 y 21.0 m³ seg⁻¹, hacia el lecho seco del río Nazas, a través del desfogue 3+500 del canal Sacramento.

Esta descarga fue suspendida aproximadamente a las 18:40 horas del 1º de junio. El nivel del agua en el embalse No. 1 alcanza la cota 1,122.00 msnm. De acuerdo con el programa de operación del embalse, una vez que el desfogue fue suspendido se registró la evolución de los niveles en el embalse hasta alcanzar la cota mínima de 1,121.00 msnm, reiniciando los desfogues hasta alcanzar una cota máxima establecida de 1,122.50 msnm, continuando así de manera sucesiva hasta completar los volúmenes autorizados para la realización del experimento.

El 17 de junio se inició el vertido de agua almacenada en el embalse N° 1 hacia la depresión denominada embalse N° 2; esta acción se realizó con la excavación de un canal de desvío de aproximadamente 5 m de ancho por 50 m de largo. Cabe señalar que la sección transversal de este canal de tierra no es uniforme, por lo cual la cuantificación de los caudales trasvasados fue estimada utilizando el método de sección-velocidad. El gasto estimado asciende a los 2 m³seg⁻¹.

RESULTADOS

En 1991 la fase experimental del proyecto duró en total 18 días. Durante este período se extrajeron del canal Sacramento 3.4 Mm³, de los cuales, de acuerdo con el balance, se habrían infiltrado 3.2 Mm³. Los pozos ubicados en la vecindad del experimento reportaron un ascenso de nivel. En el 2000 el experimento de recarga duró 65 días y se terminó el 7 de agosto del mismo año. Durante este período se extrajeron del canal Sacramento 5.2 Mm³, de los cuales se estima que se infiltraron 3.7 Mm³ en el embalse 1 y 1.4 Mm³ en el embalse 2. En los balances efectuados se consideraron los volúmenes de lluvia ocurridas durante el experimento, así como las evaporaciones registradas en las cercanías del experimento. La capacidad de infiltración calculada fluctúa entre los 0.11 y 3.5 m/día. Los pozos que componen la red de observación experimentaron ascensos en los niveles piezométricos debido a los llenados y vaciados de los embalses. Los análisis físico-químicos efectuados no mostraron ningún cambio en la calidad del agua.

CONCLUSIONES

De los experimentos llevados a cabo en 1991 y 2000 se concluye que es posible infiltrar volúmenes mayores a los 5 Mm³ en la zona de reserva exclusiva. El cauce del río Nazas ubicado en el tramo comprendido entre San Fernando y el estrechamiento Calabazas, ofrece las características físicas más adecuadas para llevar a cabo la recarga artificial vía superficial. El volumen factible de infiltrar anualmente puede llegar a los 50 Mm³, siempre y cuando se proporcione un

tratamiento previo al agua proveniente del canal Sacramento, para remover un alto porcentaje de sólidos en suspensión.

Agradecimientos

Los autores desean hacer patente su agradecimiento a la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua por el apoyo otorgado y dirección para la realización de los proyectos contratados.

LITERATURA CITADA

- Asano, Takashi, 1985, Artificial Recharge of Groundwater, Butterworth Publishers, Boston.
- Brouste, L. 1996. Hydrochimie et Geochimie Isotopique de la nappe Phreatique de la Comarca Lagunera (nord Mexique). These Univ. Paris XI Orsay. 227 pp.
- Comisión Nacional del Agua. 2006. El Agua en México. 34 pp.
- Custodio, E., y Llamas, M.R., 1976, Hidrología Subterránea, Ediciones Omega, Barcelona, España.
- De la Peña, I., y F. A. Llerena V. 2001. Manual del Uso y Manejo del Agua de Riego. Tercera Ed. 216 pp.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua 1991, Geohidrología de la Laguna–Parte I, México-CNA.
- _____ 1992, Geohidrología de la Laguna–Parte II, México-CNA.
- _____ 1999, Sistema de recarga artificial en el acuífero de la Comarca Lagunera, México-CNA.
- _____ 2000, Sistema de recarga artificial en el acuífero de la Comarca Lagunera, México-CNA.
- Johnson, A.I., and Finlayson, D.J., 1989, Artificial Recharge of Groundwater, American Society of Civil Engineers, New York.

Capítulo IV

Aspectos Hidrometeorológicos en el Manejo Integral de Cuencas

Dr. Christopher Watts

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	52
Precipitación	52
Evapotranspiración (ET)	55
LITERATURA CITADA	60

INTRODUCCIÓN

El concepto de manejo *integral* de una cuenca hidrológica es importante, ya que los cambios en algún sitio de la cuenca tendrán consecuencias aguas abajo. Entonces, es necesario contar con modelos que permitan estudiar estas relaciones. Algunos ejemplos relevantes para resaltar la importancia de este enfoque en aspectos de administración del agua son: evaluar la conveniencia de construir nuevas presas, determinar las consecuencias hidrológicas del reemplazo de matorral y bosque tropical con zacate bufel o la construcción de bordos en las partes altas de una cuenca (cambio de uso del suelo), etc. En muchos casos, los programas gubernamentales producen resultados inesperados o al menos no previstos en la fase de planeación. Por ejemplo, el programa de apoyo de la SAGARPA para el cultivo de maíz provocó severos daños ecológicos, ya que muchos campesinos desmontaron bosque saludable para sembrar maíz y así obtener los apoyos (Tiscareño, 2002). Posteriormente se abandonaron muchas de estas tierras, ya que resultaron no aptas para ese cultivo.

El balance hidrológico en la superficie del suelo puede escribirse:

$$P - ET = I + Q + \Delta A$$

1

Donde P es la precipitación, ET es la evapotranspiración (se acostumbra combinar la evaporación y transpiración), I es la infiltración, Q es escurrimiento superficial y ΔA es el cambio en el almacenamiento de la superficie. Los términos son volúmenes de agua (en m^3) o pueden expresarse como láminas (en mm). La diferencia $P - ET$ es considerada como la precipitación disponible a infiltrarse, escurrirse o quedarse almacenada en la superficie. En regiones áridas y semi-áridas esta precipitación disponible es muy pequeña, lo que justifica el estudio para su cuantificación ya que, aunque su valor es relativamente pequeño, es de suma importancia en el balance del agua.

Precipitación

El método tradicional de estimar la lluvia sobre una cuenca es por interpolación de mediciones puntuales. En México existe una red de estaciones climatológicas con mediciones diarias de lluvia y temperaturas máximas y mínimas, siendo la densidad media de esta red de una estación por cada mil km^2 aproximadamente lo que se considera insuficiente a fin de obtener detalle sobre la distribución espacial y temporal de la lluvia. El Servicio Meteorológica Nacional (SMN) tiene una red de 94 estaciones meteorológicas automáticas (EMA) que arrojan valores promedios en intervalos de 10 minutos.

Para la cuantificación de esta variable en el contexto del experimento del Monzon Mexicano de América del Norte (NAME), se instalaron 92 pluviógrafos de balancín en Sonora, Sinaloa, Chihuahua y Durango (Gochis *et al.*, 2003, 2004, 2006); la Figura 1 muestra los sitios sobre un modelo digital de elevación, ya que uno de los objetivos fue estudiar la relación entre topografía y la lluvia. La implementación de una red de pluviógrafos de muy alta densidad, suficiente para determinar la distribución espacio-temporal de la lluvia en las cuencas del país es costosa y difícil de complementar; sin embargo, estas redes proporcionan datos muy útiles y son de crucial importancia en la validación de otras técnicas de estimación de lluvia. Es importante enfatizar la importancia de mantenimiento y calibración en la operación de las redes de monitoreo.

En caso de los pluviógrafos, es necesario visitar los sitios al menos una vez por año para limpiar los instrumentos, nivelarlos y verificar su calibración. En el caso de los pluviógrafos de balancín se utiliza una pipeta para checar los volúmenes requeridos para cada movimiento del balancín y ajustarlos si es necesario. Para la red NAME se utiliza un criterio de ± 2.5 por ciento en el error de medición. Periódicamente se debe realizar una calibración simulando diferentes intensidades de lluvia entre 50 y 500 mm hora⁻¹. Actualmente se investiga la posibilidad de una corrección cuadrática genérica que podría reducir la subestimación observada en pluviógrafos de balancín para lluvias intensas.

Los radares meteorológicos modernos producen mapas de intensidad de lluvia cada 10 minutos con rango nominal de 480 km desde el sitio del radar. Sin embargo, la elevación del rayo aumenta con distancia, por lo que la precisión de las estimaciones se reduce considerablemente a distancias grandes. El SMN actualmente opera doce radares distribuidos en todo el país; sólo cuatro están funcionando adecuadamente y dos producen mapas de intensidad de lluvia en mm hr⁻¹.

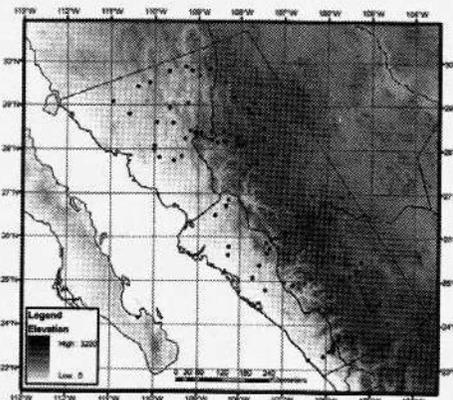


Figura 1. Ubicación de los pluviógrafos en el estudio NAME.

La estimación de precipitación usando satélites empezó hace 50 años (Barrett y Martín, 1981). La NOAA (Nacional Oceanic And Atmospheric Administration), ha desarrollado técnicas usando satélites geoestacionarios, y la última versión llamada HydroEstimator (Vicente, *et al.*, 1998) ha sido implementado en el SMN (<http://smn.cna.gob.mx/productos/hydroes/he.html>).

Este método (como la gran mayoría) está basado en la relación inversa entre la intensidad de lluvia y temperatura en la parte superior de las nubes. Así, la Figura 2 muestra la relación usando radar y GOES 8. Esta relación es esperada para tormentas convectivas, pero aún en estos casos generalmente produce una sobreestimación de la lluvia, ya que el área afectada por lluvias intensas suele ser mucho menor que el área de la nube. *Persiann* es otro sistema que utiliza datos satelitales en una red neuronal artificial (Hsu *et al.*, 1997; Sorooshian *et al.*, 2000). Este método incorpora información y datos del satélite Misión para Medición de la Lluvia Tropical (TRMM) además de los datos de GOES. Un aspecto importante es que las estimaciones podrían ser muy útiles, pero es necesario compararlas con los datos de la red pluviográfica.

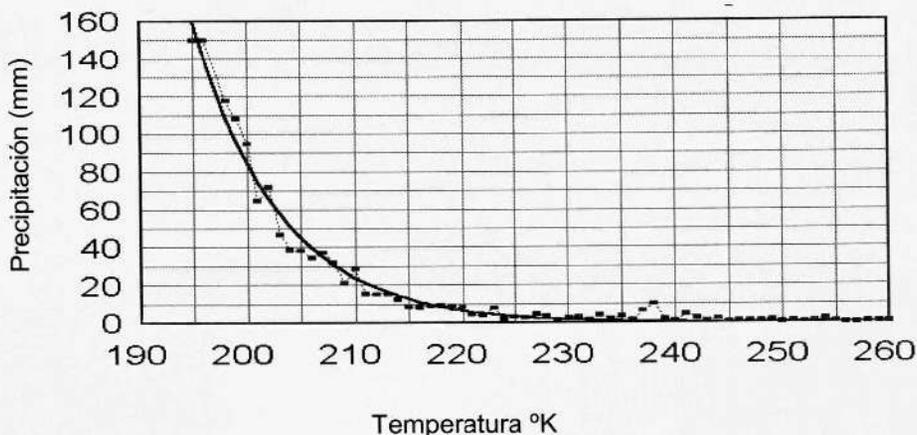


Figura 2. Precipitación y temperatura con GOES 8.

Otra técnica útil para estimar la precipitación de lluvias convectivas es el conteo de rayos. La Figura 3 muestra la correlación existente entre el número de rayos observados en un día y la precipitación medida en la superficie para un estudio en Arizona.

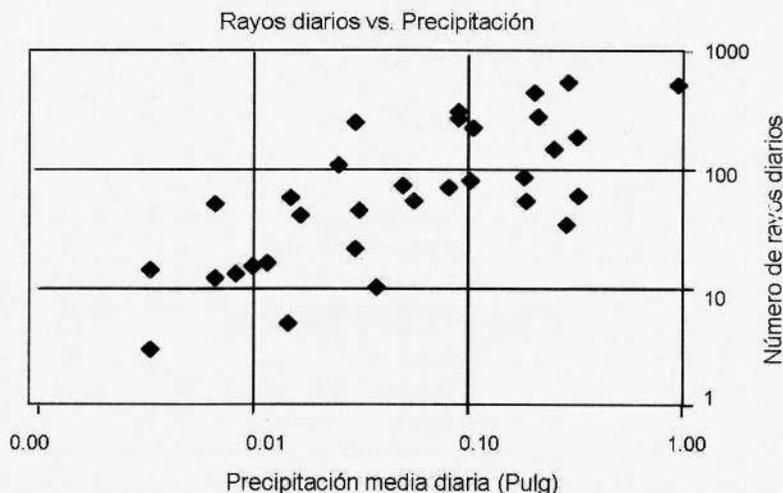


Figura 3. Relación entre el número de rayos observados durante el día y las cantidades de precipitación.

Existe una correlación significativa, pero también hay mucha dispersión. Obviamente, este método no es aplicable a tormentas ausentes de rayos.

Evapotranspiration (ET)

La medición directa de ET es extremadamente difícil. El instrumento tradicional, instalado en muchas estaciones climatológicas es el tanque evaporímetro en el cual se mide la evaporación a intervalos diarios. Este método sencillo ha sido útil para la estimación de la evaporación en embalses, siempre y cuando se aplique una calibración adecuada. Sin embargo, es mucho más difícil relacionar estas mediciones con la transpiración en las plantas, correspondiente a la mayor parte de ET en una cuenca. Otro instrumento clásico que utiliza el balance de masa es el lisímetro. Este instrumento proporciona una estimación precisa y confiable de la ET sobre la vegetación y suelo bajo estudio. Desafortunadamente, esta área es usualmente muy pequeña (unos cuantos metros cuadrados), debido a los costos y dificultades técnicas de construir lisímetros grandes. La operación y mantenimiento de los lisímetros también es onerosa y hay muy pocos funcionando en México y otros países.

Un instrumento relativamente nuevo pretende medir el flujo de sabia en los árboles. El método es indirecto (se infiere el flujo de sabia del flujo de calor) y cada sensor sólo mide el flujo a una rama de un árbol, por lo que es complicado usarlos para la estimación de ET en un bosque. Hoy en día, los métodos más aceptados

para la estimación de ET sobre áreas grandes son los aerodinámicos que miden directamente el flujo turbulento del vapor de agua en la atmósfera. La misma metodología puede utilizarse para medir el flujo de CO₂ y otros gases, y actualmente existe una red de sitios en todo el mundo llamado FLUXNET. Sin embargo, el costo de la instrumentación es muy alto, su operación requiere personal especializado y el post-procesamiento de los datos es muy complicado (Lee *et al.*, 2004), por lo que la instalación de una red densa de estos sitios no representa una opción viable. Por lo anterior, es necesario buscar modelos que permita estimar la ET usando información disponible de variables meteorológicas y la condición de la superficie. Los sensores remotos son muy útiles en este esfuerzo.

La evapotranspiración es un término que incluye distintos procesos como la evaporación de una superficie de agua, evaporación del suelo y transpiración de las plantas. Los mecanismos detallados de estos procesos son diferentes pero en todos se produce la conversión de agua líquida a vapor que requiere cantidades considerables de energía: aproximadamente 2.5 millones de Joules por kilogramo (el calor latente de vaporización del agua λ). Entonces, ET es un componente importante del *balance de energía* de una superficie (enlaza éste con el *balance hidrológico*) que se escribe:

$$R_n = G + H + LE \quad 2$$

Donde todos los términos se expresan como un flujo de energía por unidad de área horizontal (en W m⁻²). La radiación neta que recibe la superficie (R_n) se utiliza para calentar el suelo (G), calentar la atmósfera (H) y evaporación ($LE = \rho\lambda ET$). En esta ecuación no se incluye advección ni cambios en almacenamiento de energía. Entonces, se pudiera utilizar esta ecuación para estimar ET si se mide o se calculan los otros flujos.

La importancia relativa de esos flujos depende de la condición de la superficie, especialmente su humedad. Un indicador útil es la fracción evaporativa (EF) expresada como:

$$EF = \frac{LE}{LE + H} \quad 3$$

Para superficies secas el valor de EF es muy pequeño (cerca de 0). Valores de $EF > 1$ indica la presencia de advección.

La radiación solar R_s (en las bandas visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético) es la fuente principal de energía a la superficie y una parte se refleja otra vez al espacio. La superficie también recibe y emite radiación en la

banda infrarroja térmica, produciéndose normalmente una pérdida neta de energía día y noche. Sin embargo, durante el día R_s es el componente dominante de R_n en la mayoría de circunstancias. Las zonas áridas del norte de México tienen valores muy altos de radiación solar por estar cerca o dentro de la región tropical y tener atmósferas relativamente limpias con poca nubosidad.

R_s es una función de latitud, día del año, hora del día, nubosidad y pendiente del terreno. En superficies planas en el hemisferio norte la máxima intensidad solar se encuentra a latitudes bajas, en verano, a mediodía y sin nubes. Si la superficie no es horizontal, la intensidad de la radiación que recibe puede cambiar significativamente, como se percibe en la foto tomada en una pequeña cuenca en Nuevo México (Gutiérrez-Jurado *et al.*, 2006).

La imagen fue tomada en la dirección del flujo de agua, del oeste hacia el este. En este caso, la superficie a la izquierda está inclinada hacia el sur, por lo que recibe mucho más radiación solar que la superficie a la derecha, inclinada hacia el norte. Entonces su evaporación será mayor y la disponibilidad de humedad en el suelo será menor. La imagen muestra las diferencias marcadas en la vegetación producidas por estos efectos. Estas diferencias entre superficies inclinadas hacia el sur y hacia el norte son muy comunes e importantes en zonas serranas. Un buen ejemplo en México es el volcán Popocatepetl, donde se observan grandes diferencias en la cobertura vegetal en el lado norte (donde existía un glaciar durante muchos años) y el lado sur sin vegetación significativa.

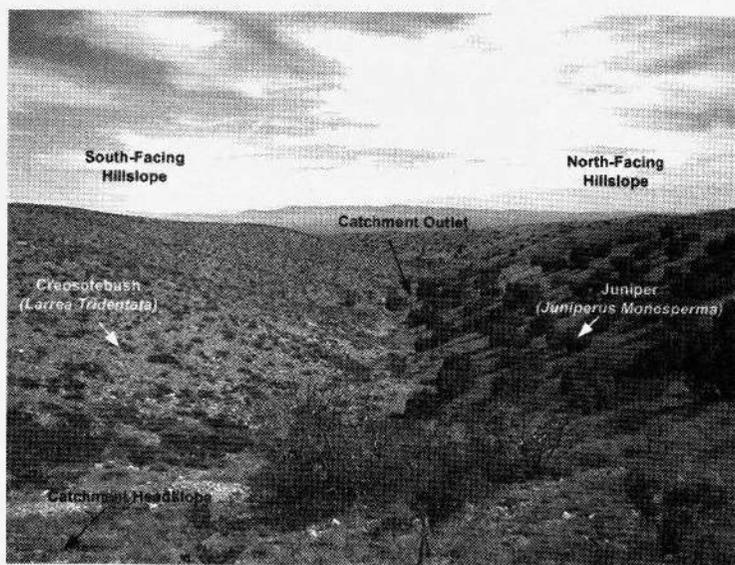


Figura 4. Diferentes exposiciones de terreno a la radiación solar.

La estimación de ET requiere información sobre diferentes propiedades de la superficie: temperatura (T_s), humedad de suelo (θ_s), rugosidad aerodinámica, reflectancia, emisividad, índice de área foliar (IAF), fracción cubierta por vegetación, entre otras. Además, requiere variables externas a la superficie. La radiación solar es la variable externa más importante, pero otras son: temperatura del aire (T_a), humedad relativa del aire (f), velocidad del viento (u), etc. Penman y Monteith obtuvieron la ecuación Penman-Monteith (PM) para estimación de ET combinando la ecuación del balance energético con modelos sencillos del flujo de calor y vapor análogos a las leyes de Ohms para el flujo de electricidad (Monteith y Unsworth, 1990):

$$H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad 4$$

$$LE = \rho \lambda \frac{q_s(T_a) - q_a}{r_a + r_{st}} \quad 5$$

Donde ρ es la densidad del aire (1.2 kg m^{-3}) y C_p es la capacidad calorífica del aire a presión constante ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), q_a es la humedad específica del aire (en kg kg^{-1}) y $q_s(T_a)$ es la humedad específica de aire saturado a la temperatura del aire. Las ecuaciones contienen dos parámetros nuevos: la resistencia aerodinámica (r_a) y la resistencia estomatal (r_{st}), ambos con unidades de s m^{-1} . La resistencia r_a depende de la estabilidad atmosférica y la velocidad del viento, y existen procedimientos establecidos para su cómputo. Sin embargo, aún no existe una teoría madura para obtener r_s . Es probable que la solución emane de los estudios integrales de los procesos de fotosíntesis, ET y respiración. Actualmente, sólo existen relaciones empíricas relacionando r_s con humedad de suelo, radiación solar, humedad del aire, etc. Esta situación hace que la ecuación de Penman-Monteith tenga poca utilidad predictiva debido a que reemplaza la incógnita ET con otra, r_s . De hecho, muchos investigadores utilizan la ecuación PM con mediciones de ET para generar valores de la resistencia estomatal.

Es importante recordar que una de las metas principales de los primeros investigadores modernos sobre ET fue eliminar la temperatura de la superficie de las ecuaciones, siendo ésta una variable muy difícil de obtener. Hoy en día, los sensores en la banda infrarroja térmica (TIR) de los satélites de observación terrestre producen estimaciones de T_s con diferentes escalas en espacio y tiempo. Por ejemplo, los satélites geoestacionarios dan valores cada 15 minutos con una resolución espacial de 3 ó 4 km. Los satélites de órbita polar de la NOAA producen valores dos veces por día con una resolución espacial de 1 km. Actualmente hay

tres satélites operacionales, dando un total de seis valores de T_s por día. Los sensores de investigación MODIS en los satélites Terra y Aqua dan valores cada dos días con una precisión mejorada debido al número de canales disponibles en TIR.

Incrementos abruptos en T_s están asociados con decrementos en humedad de suelo y ET como fue observado durante el experimento del Monzón en 2004 (Watts et al., 2006) y se utilizan como indicadores en modelos comunes para ET como SEBAL (Bastiaanssen *et al.*, 1998) y sus variantes (Menenti *et al.*, 2003).

LITERATURA CITADA

- Barrett E. C. and D. W. Martin, 1981, *The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring*, Academic Press, New York, 340 pp.
- Bastiaanssen, W. G. M., M. Menenti, M., Feddes, R. A. Y A. A. M. Holtslag, 1998, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation, *Journal of Hydrology*, 212-213, 198-212.
- Gochis, D. J., J. C. Leal, W. J. Shuttleworth, C. J. Watts and J. Garatuza-Payan, 2003, Preliminary Diagnostics from a New Event-Based Precipitation Monitoring System in Support of the North American Monsoon Experiment, *Journal of Hydrometeorology* 4: 974–981.
- _____, D. J., A. Jiménez, C. J. Watts, J. Garatuza-Payán and W. J. Shuttleworth, 2004, Analysis of 2002 and 2003 Warm-Season Precipitation from the North American Monsoon Experiment Rain Gauge Network, *Monthly Weather Review* 132: 2938-2953.
- _____, D. J., C. J. Watts, J. Garatuza-Payán y J. C. Rodríguez, 2006, Spatial and temporal patterns of precipitation intensity as observed by the NAME Event Rain Gauge Network from 2002 to 2004, *Journal of Climate* (in press).
- Gutierrez-Jurado, H. A., Vivoni, E. R., Harrison, J. B. J. y H. Guan, 2006, Ecohydrology of root zone water fluxes and soil development in complex semiarid rangelands, *Hydrological Processes*, 20, en prensa.
- Hsu, K., X. Gao, S. Sorooshian, and H.V. Gupta, 1997, Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks, *Journal of Applied Meteorology*, 36, 1176-1190.
- Lee, X., W. Massman and B. Law 2004, *Handbook of Micrometeorology (a Guide to Surface Flux Measurement and Analysis)*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Menenti, M., Jia, L. and Z. Su, 2003 On SEBI-SEBS validation in France, Italy, Spain USA and China *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions*, Montpellier, France.
- Monteith JL y Unsworth MH (1990) *Principles of environmental physics*. London etc. Edward Arnold, 2nd Ed. 291 pp.

- Sorooshian, S., K. Hsu, X. Gao, H.V. Gupta, B. Imam, and D. Braithwaite 2000 Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall, *Bulletin American Meteorology Society*, 81, 2035-2046.
- Tiscareño, M., 2002, Taller sobre agricultura de precisión. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Guadalajara, Jalisco; 12 pp.
- Vincent, G. A., R. A. Scofield and W. P. Menzel, 1998, The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique, *Bulletin American Meteorological Society*, 79(9): 1883-1898.
- Watts, C. J., Scott, R. L., J. C. Rodríguez, J. Gratuza P., J. H. Prueger, W. P., Kustas and Douglas, M. D., 2006, Changes in Vegetation and Surface Fluxes associated with the North American Monsoon Experiment, *Journal of Climate*, en prensa.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). <http://smn.cna.gob.mx/productos/hydroes/he.html>). Julio, 2006.

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

INTRODUCCIÓN	64
MÉTODO DE APROXIMACIÓN	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
Esguerrimiento	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
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
CONCLUSIONES	81
LITERATURA CITADA	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 km² dentro de los municipios de Santa María del oro, San Bernardo, Indé, Guanaceví, Tepehuanes y Santiago Papasquiario.

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 m²; 13 parcelas de 50 m²; tres parcelas de 10 m² y 32 parcelas de 1m², 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.

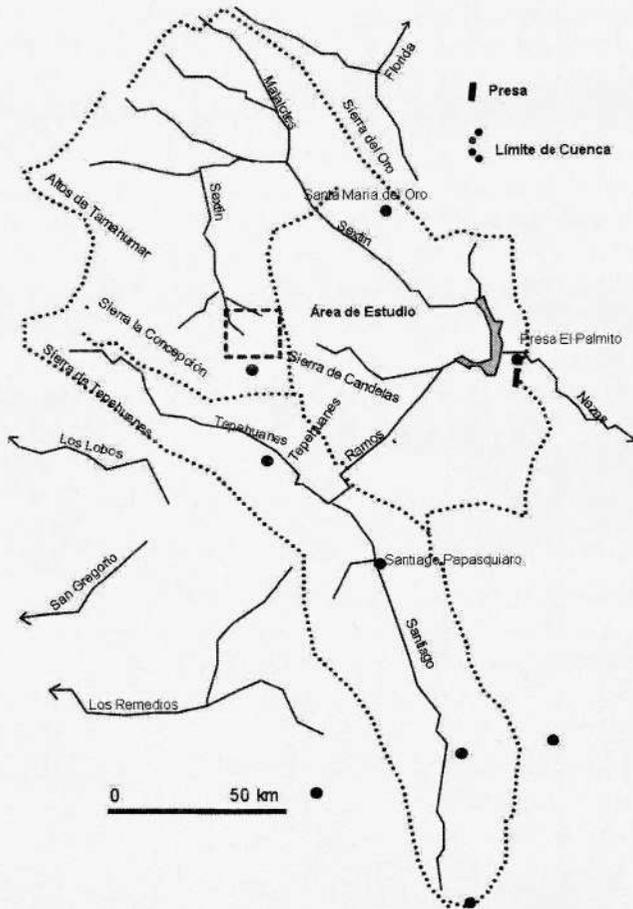


Figura 1. Cuenca Alta del río Nazas.

Escala de pequeña cuenca vertiente

Se identificaron siete pequeñas cuencas vertientes de 1 a 50 km² 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.

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 km²) y Sardinias (4,660 km²).

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 abrevar 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 Sardinas y Salomé Acosta.

Infiltración y flujo subsuperficial

Para estudiar el comportamiento hidrodinámico al interior del suelo se implementaron pruebas de infiltración con cilindrómetros tipo Roose e infiltrómetros 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 Bouyocous.

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 m² 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 Sardinias.

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.

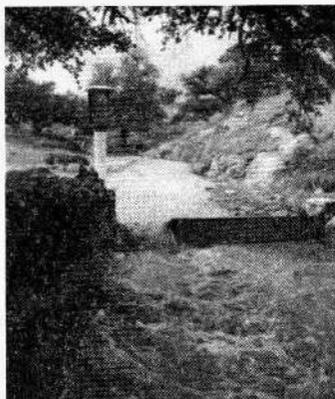


Figura 3. Pequeña obra de aforo hidrológico. Figura 4. Aforo con medidor «parshall».

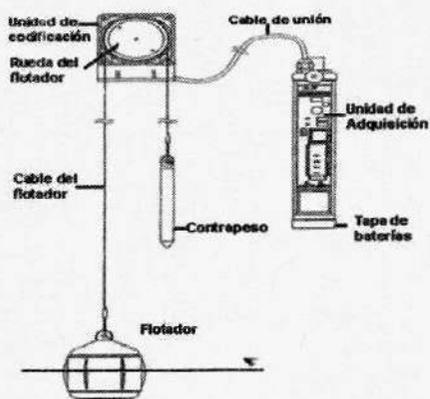


Figura 5. Limnógrafo automático Thalimides.

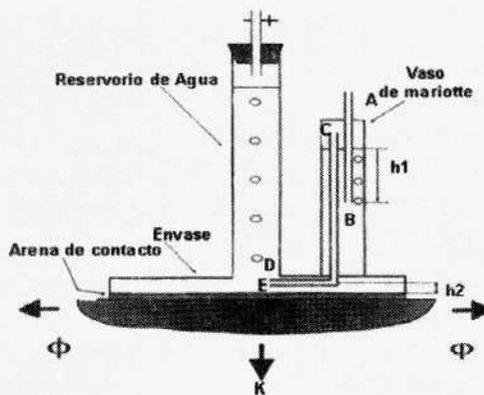


Figura 6. Infiltrómetro de discos TRIMS.



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 m² 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 guijarros, 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 guijarros 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 (Figuuras 13, 14 y 15).

A continuación se detallan más los resultados de estas pruebas.

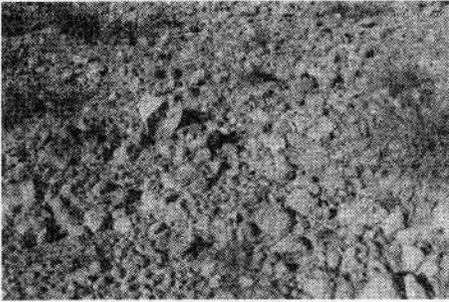


Figura 10. Piedras y bloques sueltos.



Figura 11. Costra con gravas.

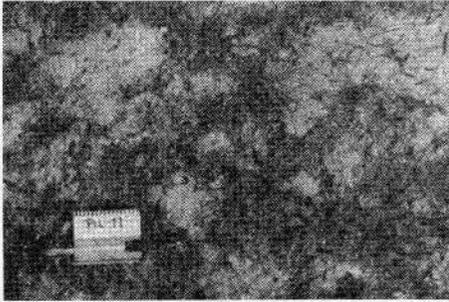


Figura 12. Superficie endurecida.

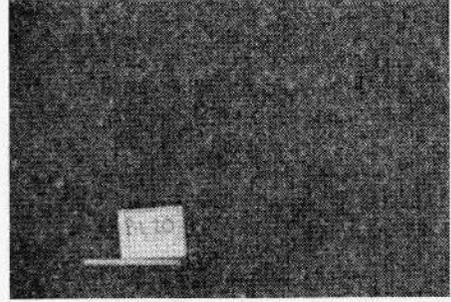


Figura 13. Superficie con pasto.

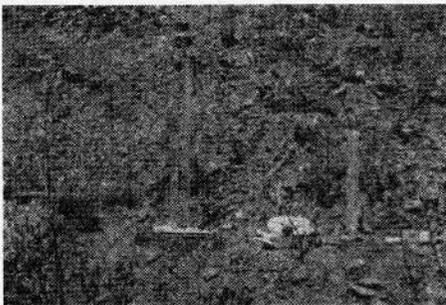


Figura 14. Infiltración en terracita.



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.

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 mojado: 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 θ (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 ($h \gg 0$), 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 α 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 α 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 α calculados para tres estados con superficie forestal.

G	K_s (mm h ⁻¹)	α (mm h ⁻¹)	α_{sat} (mm h ⁻¹)
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 α 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 α_{sat} que corresponde a α 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 β 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 σ 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 λ_m calculado a partir de la Ecuación 3.

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

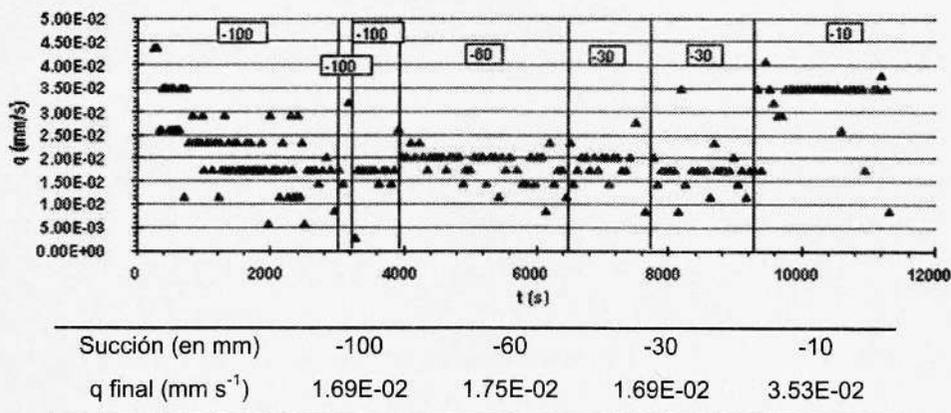


Figura 16. Infiltrometría en superficie con terracita.

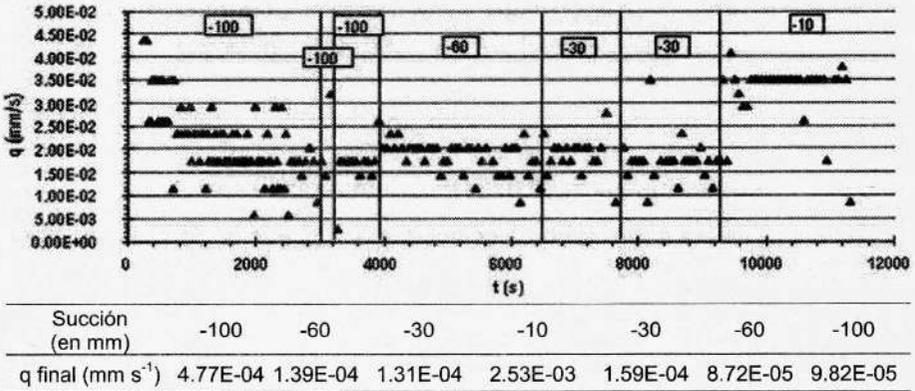


Figura 17. Infiltrometría en superficie con mantillo de pino.

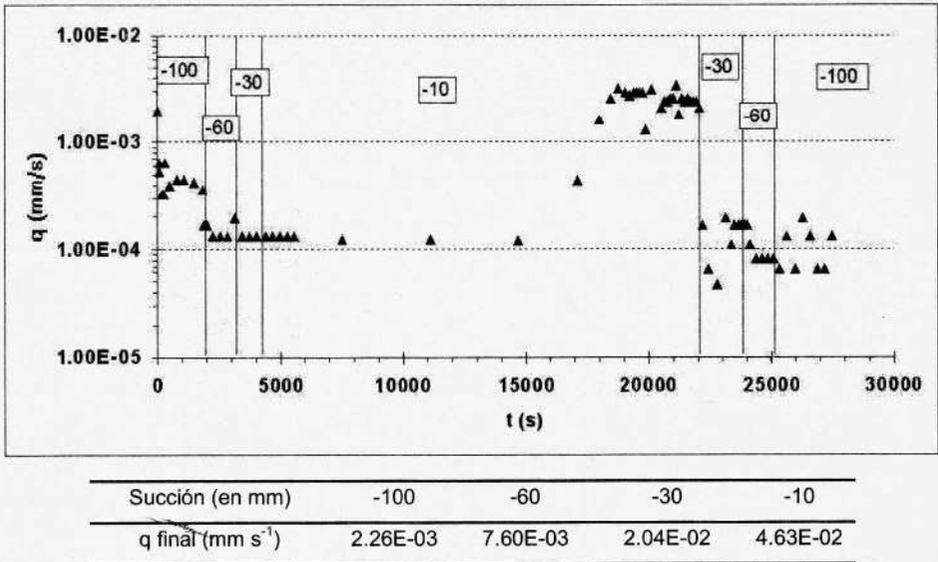


Figura 18. Infiltrometría en superficie con pasto.

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. Digonnet, 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.

Capítulo VI

Uso Actual y Perspectivas de la Percepción Remota en el Manejo Integral del Agua

Dr. Jaime Garatuza Payán

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	88
APLICACIONES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA	89
Agricultura	89
Hidrología	91
CONCLUSIONES	94
LITERATURA CITADA	96

INTRODUCCIÓN

El manejo de recursos hídricos es el concepto integrador para un número de subsectores como la hidrogenación, suministro de agua potable y saneamiento, irrigación y drenaje, entre otros. La perspectiva de manejo integrado del agua asegura que las dimensiones social, económica, ambiental y técnica, sean tomadas en cuenta en el manejo y desarrollo de los recursos hídricos.

Básicamente todos los países del planeta se esfuerzan en el avance de sus medios para operar sus recursos hidráulicos, incluyendo el manejo y la distribución del agua de riego. El énfasis en un manejo mejorado se da por la necesidad de incrementar la producción de alimentos para sostener la creciente población y preservar la salud e integridad del medio ambiente. Para tener mejores niveles de manejo del agua se requiere una mayor precisión y sofisticación en la manera en que se cuantifican los componentes del ciclo hidrológico, incluyendo la evapotranspiración (ET). La evapotranspiración de cultivos bajo riego representa un gran consumo de agua en el mundo, además de que es altamente variable en el tiempo, espacio y tipo de vegetación.

Recientemente se han probado nuevas herramientas de sensores remotos montados en plataformas satelitales que podrían ayudar a entender y manejar mejor los recursos hídricos de un país. Las lecciones aprendidas en algunos países muestran que es posible implementar programas de sensores remotos de apoyo a la asignación de recursos y estrategias de seguridad alimentaria. Usando estas herramientas los especialistas y los tomadores de decisiones pueden disponer de información acerca de la cantidad de agua utilizada por los cultivos y vegetación natural, la tasa de crecimiento de la vegetación o cuánta agua está disponible para escurrimiento en un río.

Estas herramientas pudieran mostrar áreas donde la agricultura debe ser extendida, dónde los cultivos tienen suficiente agua y dónde no. Pudieran también ayudar a determinar las necesidades de agua de los humedales naturales y de otros ecosistemas y calcular cuánta agua está disponible para otros usos, tales como el doméstico o las necesidades industriales. Con la información generada por estas herramientas se puede observar la situación de los recursos hídricos más claramente y tomar decisiones más oportunas y acertadas en el manejo del agua, tales como la reasignación del recurso dentro de un esquema de riego para prevenir el estrés hídrico en los cultivos, antes de que los rendimientos se vean afectados, o para manejar las cuencas más efectivamente, o para identificar áreas de los esquemas de riego que necesiten rehabilitarse, o dónde el manejo debería ser mejorado. Estas herramientas, para los administradores del riego, podrían ser tan valiosas como los pronósticos meteorológicos para mejorar el desempeño de los sistemas.

En este capítulo se presentan ejemplos de las experiencias y resultados del uso de sensores remotos en aplicaciones específicas relacionadas con el manejo integral de los recursos hídricos, en la mayoría de las cuales ha participado el autor. El listado no es exhaustivo pero provee un panorama general del tipo de aplicaciones que pudieran ser agentes de cambio e innovación en un país en desarrollo y cuyos resultados pudieran ser responsables para el desarrollo de técnicas, políticas y programas que ayuden al manejo integral de los recursos hídricos, respondiendo a los retos del desarrollo sustentable, los bruscos cambios y movimientos en las condiciones políticas, económica, sociales y ambientales de México. Por lo anterior, es necesaria la integración de estas herramientas en los procesos de planeación y toma de decisiones.

El uso de sensores remotos como parte de un sistema complejo e integrado de extensiva captura de datos acerca de parámetros y fenómenos físicos, modelación, manejo integrado de proyectos y pronóstico, constituye una herramienta valiosa que requiere un alto grado de especialización científica. Los resultados de las aplicaciones que se exponen más adelante pueden servir como ejes conductores de muchas acciones que lleven a la conservación y beneficio de los recursos hídricos fomentando labores y estudios relacionados con el uso sustentable.

APLICACIONES DE LA PERCEPCIÓN REMOTA

Agricultura

El manejo integral del agua en la agricultura se puede ver beneficiado grandemente del uso de herramientas como los sensores remotos, especialmente utilizando índices de vegetación para monitoreo de cultivos, pronóstico de cosecha y mapeo de grandes extensiones, utilizando las bandas del infrarrojo térmico para monitoreo del estrés hídrico y evapotranspiración, entre otras aplicaciones. Por ejemplo, Lobell *et al.* (2003), describen sus experiencias en el Valle del Yaqui en el estado de Sonora, México, en la estimación de rendimientos de cultivos de trigo utilizando imágenes Landsat. En ellos se mostró la estimación hecha con relación en la etapa de desarrollo del cultivo, así como el uso de sensores remotos en el monitoreo de malezas. En otro ejemplo, Rodríguez *et al.* (2001 y 2004) llevaron a cabo el monitoreo del cultivo y pronóstico de las cosechas utilizando imágenes MODIS en el Valle del Yaqui, Sonora, para investigar la viabilidad del uso de MODIS en una parcela de 80 hectáreas de trigo durante el período de cultivo 1999-2000. Durante este período se midieron variables meteorológicas (incluyendo evapotranspiración con técnicas de correlación de turbulenta) y transectos semanales con un radiómetro de campo (CROPSCAN MSR5). Además, se obtuvieron las tres imágenes disponibles con cielos despejados del satélite LANDSAT7 ETM, durante

el período de las mediciones. La metodología propuesta no representó una solución general puesto que varias parcelas en las zonas agrícolas tienen áreas más pequeñas, por lo que se requiere una resolución espacial más fina. Una solución que ha sido propuesta por CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, France) es el pequeño satélite experimental francés del proyecto VENUS, el cual tendría el potencial de capturar imágenes diarias del mismo sitio con una resolución espacial de 20 m.

Aunque MODIS ofrece una combinación única de resolución espectral, temporal y espacial, comparada con sensores globales anteriores, convirtiéndolo en un buen candidato para el mapeo de tipo de cultivos a gran escala y, por lo tanto, en una gran ayuda en el manejo integral del agua para grandes áreas, la heterogeneidad dentro de un píxel (heterogeneidad subpíxel), hace que la aplicación tradicional de aproximaciones de clasificación duras resulte en errores significativos en la estimación del área de cultivo. Lobell y Asner (2004), desarrollaron y probaron una aproximación de desagregación lineal con MODIS que estima fracciones de tipo de cultivo dentro de un píxel, basados en las firmas espectrales temporales a través de la etapa de crecimiento. En este método, llamado desagregación temporal probabilística, se construyeron grupos de datos utilizando Landsat para identificar píxeles puros y la incertidumbre resultante de la variabilidad fue cuantificada utilizando simulación Monte Carlo. La aproximación se evaluó utilizando mapas de clasificación de LANDSAT en dos regiones de agricultura intensiva, en el Valle del Yaqui en Sonora y las grandes planicies sureñas de los EU, demostrando la importancia de la heterogeneidad subpíxel en los sistemas de cultivo y el potencial de la desagregación temporal para proveer estimaciones rápidas y confiables de la distribución de cobertura del suelo utilizando sensores de resolución amplia tal como MODIS.

Conocer la fecha de siembra de todas las parcelas en un esquema de riego grande es un elemento tan importante como la información meteorológica para una eficiente programación del riego y, por ende, del manejo integral del agua. En este sentido, Lobell *et al.* (2003) en otro estudio, estimaron el área de cultivo, fechas de siembra y rendimientos para dos años de imágenes de LANDSAT en una región de agricultura intensiva en el noroeste de México (el Valle del Yaqui), combinando conocimientos de fenología del cultivos con imágenes multitemporales para estimar rotaciones de cultivo. Sus resultados revelaron que las predicciones regionales de cosecha variaron hasta un 20 por ciento, pero fueron relativamente insensitivos para variabilidad modelada en fenología de cultivo, eficiencia en el uso de luz, e índice de cosecha (la relación de masa del grano a biomasa aérea). Comparaciones de las estimaciones basadas en satélite y en campo indicaron errores en la estimación de cosechas regionales de trigo de menos del cuatro por ciento para los datos de ambos años. En contraste, los cálculos de fechas de plantación exhibieron

incertidumbre de hasta un 50 por ciento utilizando un escaso muestreo de tres días de un sensor basado en satélite.

Hidrología

Determinar la extensión de inundación es una función de la comunidad de investigación hidrológica y provee un servicio vital para ingenieros y planificadores en el uso y manejo del recurso. Para sistemas de grandes ríos localizados en regiones alejadas es práctico utilizar sensores remotos. Hudson y Colditz (2003), combinaron sensores remotos y acercamientos geomórficos para delinear la extensión de un gran huracán provocando una inundación en la parte baja del Pánuco (98,227 km²), el séptimo río más grande que drena en el Golfo de México. Los datos incluyeron una escena de LANDASAT5 TM y una de LANDASAT7 ETM, datos topográficos y del tamaño de partícula levantados en terreno y de análisis del laboratorio. La imagen de LANDASAT5 TM se adquirió después del gran evento de inundación en 1993, mientras que la escena del LANDASAT7 ETM se obtuvo durante la estación seca en el año 2000. Ellos demostraron que los sensores remotos ofrecen la habilidad de examinar grades valles aluviales con características diferentes además de la importancia de incluir análisis geomórficos de campo de manera que se considere la complejidad de los distintos ambientes en las planicies de inundación y en el manejo del agua.

En la relación entre vegetación y precipitación, otro elemento importante a considerar en el manejo integral del agua en grandes áreas, Salinas-Zavala *et al.* (2002), analizaron la relación entre la variabilidad interanual de un índice de vegetación (NDVI), la precipitación y la circulación atmosférica a 700 mbar en el noroeste de México, durante las fases fría y caliente de El Niño Oscilación del Sur (ENSO). Encontraron también que la fase negativa del ENSO está asociada con las condiciones de sequía con un retraso de cuatro a seis meses relacionado con el inicio del evento, mientras que la fase positiva está relacionada con los altos valores de NDVI durante la estación más seca de la región y determinaron que los veranos con altos valores de NDVI están relacionados con una intensificación del monzón mexicano en verano, mientras que, en veranos secos, el flujo se caracteriza por la presencia de un frente reforzado de alta presión sobre la mayor parte del territorio nacional. En inviernos con altos valores de NDVI, un intenso frente de baja presión induce un flujo meridional con penetración de aire húmedo asociado con la actividad frontal. Este patrón de circulación es común durante la fase caliente del ENSO. Inviernos con bajo NDVI están asociados con los patrones de circulación atmosférica típicos del llamado Pacífico Norteamericano (PNA).

En el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) se ha desarrollado una larga tradición de aplicaciones de sensores remotos para la estimación de variables

hidrológicas en colaboración con una gran variedad de instituciones. Al inicio de los 90's Garatuza y Watts (1993) utilizaron los datos del satélite geostacionario GOES para estimar el área de cobertura de nieve y, con la ayuda el Instituto de Hidrología y la Universidad Agrícola de Wageningen (Stewart *et al.*, 1995), se construyó un sistema computacional para estimar diferentes variables utilizando datos de GOES recibidos directamente en una estación de recepción localizada en el ITSON, en México. En cooperación con la Universidad de Arizona se llevó a cabo un estudio para mapear parámetros de vegetación con sensores remotos (Shuttleworth *et al.*, 1995). En una colaboración a largo plazo entre ITSON, la Universidad de Arizona y la Universidad de Maryland, se realizaron observaciones de nubosidad de alta resolución con datos GOES (Yucel *et al.*, 1998 y Garatuza *et al.*, 2001a). Con los mismos socios, así como con la colaboración del Instituto de Hidrología y de la Universidad Agrícola de Wageningen, se completaron las estimaciones de radiación solar utilizando datos GOES de la estación receptora de ITSON (Watts *et al.*, 1995, 1999, Stewart *et al.*, 1999, Garatuza *et al.*, 2001b y 2001c). Estos trabajos demostraron la existencia de algunos rasgos importantes de la nubosidad en el noroeste de México y su uso en una nueva estimación de radiación solar de alta resolución, variables valiosas ambas en estudios hidrológicos y de manejo integral del agua. Aún más, en muchos otros estudios, el ITSON ha participado en la medición, modelación y estimación de la evapotranspiración de cultivos agrícolas (Garatuza *et al.*, 1998, 2001d; Garatuza y Watts, 2005) y vegetación natural (Untad *et al.*, 1997; Garatuza *et al.*, 2005b) integrando información colectada *in situ* y datos remotamente censados de alta y baja resolución (ver Figuras 1 y 2). Además, se ha llevado a cabo una estimación real de los flujos de superficie sobre mosaicos de campos agrícolas y el desarrollo de reglas de agregación para la estimación de flujos de calor sensible (Watts *et al.*, 2001; Chehbouni *et al.*, 2001).

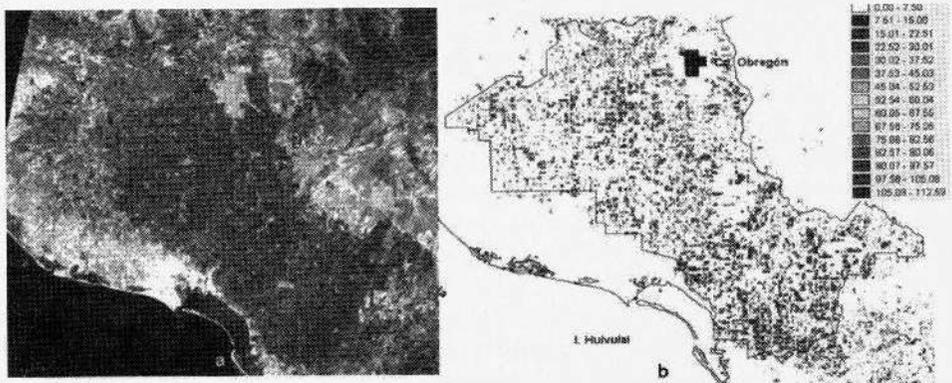


Figura 1. a) Composición en color real (Landsat 1, 2, 3) y b) evapotranspiración (en $W m^2$) en trigo en el Valle del Yaquí, México en un día durante la temporada de crecimiento del 2000.

Recientemente el ITSON ha participado con varias instituciones en el Proyecto SALSA (Semi Arid Land Surface Atmosphere Program), un esfuerzo multiagencias y multinacional de investigación del cambio global que busca evaluar las consecuencias de los cambios naturales y antropogénicos en el uso integral del agua en ambientes semiáridos con investigaciones enfocadas en la parte alta de la cuenca del Río San Pedro en el sureste de Arizona, USA, y el noreste de Sonora, México (Goodrich *et al.*, 2001). Los sensores remotos se utilizaron para evaluar la degradación del suelo debido al sobrepastoreo y extracción de agua subterránea para uso doméstico y agrícola y para determinar el efecto de este cambio en el balance energético y de agua de la cuenca.

Más recientemente aún, el ITSON está también trabajando en conjunto con el programa NAME (Experimento del Monzón de Norte América, por sus siglas en inglés), parte del programa CLIVAR/VAMOS y del Proyecto GEWEX de Predicción para América (GAPP), para promover un mejor entendimiento y simulaciones más reales de los procesos convectivos de la temporada cálida en terrenos complejos, de la variabilidad intraestacional del monzón, de la respuesta de la circulación atmosférica en la temporada cálida y de los patrones de precipitación a las lentamente variables y potencialmente predecibles condiciones oceánicas y de capa límite superficial continental, y la evolución del sistema del monzón de Norte América y su variabilidad (Gochis *et al.*, 2003 y 2004; <http://www.ofps.ucar.edu/name/>).

Algunos resultados del programa, relevantes al manejo integral del agua, se describen en Gochis *et al.* (2005), entre otros, quienes emplearon redes superficiales de pluviógrafos junto con radares meteorológicos y satélites de órbita polar para observar la precipitación de una forma hasta ahora sin precedente para esta región semiárida. Ellos encontraron que la precipitación total de julio-agosto de 2004 fue similar en grado y magnitud espaciales al promedio a largo plazo, aunque substancialmente más húmedo que el 2003. Los análisis estadísticos de los datos de intensidad de la precipitación revelan que los mayores eventos de precipitación en escalas horaria y diaria están restringidos a las áreas costeras y de baja elevación al oeste de las montañas de la Sierra Madre Occidental. En la escala de tiempo de 10 minutos, los valores máximos de la intensidad, iguales a los observados en las regiones de elevaciones bajas, se podrían observar en elevaciones más altas, aunque eran comparativamente poco frecuentes. También se demuestra que la inclusión de estas observaciones en análisis operacionales existentes ayuda a corregir sesgos significativos, los cuales, en la escala estacional, son de similar magnitud que la variabilidad interanual de la precipitación en las cuencas importantes del noroeste de México.

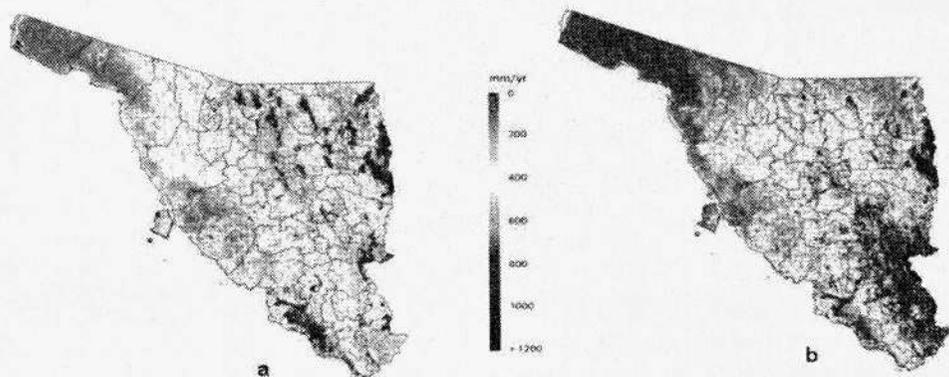


Figura 2. Evapotranspiración anual en Sonora, México, a) de octubre de 1999 a septiembre del 2000 basada en datos de NOAA-AVHRR, y b) de octubre del 2002 a septiembre del 2003 basada en datos de MODIS. Los límites administrativos (municipios) fueron sobrepuestos.

CONCLUSIONES

A medida que México avanza en una era de globalización y cambios rápidos, trae consigo virajes en las condiciones políticas, económicas, sociales y ambientales, debe responder a algunos de los desafíos de desarrollo regional a través de la educación, entrenamiento, investigación y aplicación de tecnologías como los sensores remotos, sobre todo en áreas de seguridad nacional como es el manejo integrado del agua. Como se muestra en este capítulo, la aplicación y resultados de la percepción remota pueden ser propicios para cambios positivos en el manejo del agua y en el desarrollo regional con la emergencia de programas y políticas.

En los ejemplos anteriores se ha visto cómo la percepción remota podría impactar en el desarrollo regional a través de un manejo adecuado del agua. La Comisión Nacional del Agua ha adoptado una estrategia de descentralización del manejo del agua hacia los organismos operadores de cuenca, lo que permitirá una integración más balanceada de los asuntos territoriales y de transferencia de presupuestos para tratar las disparidades regionales en niveles de vida, educación y productividad, lo que permite que los sensores remotos jueguen un papel muy importante en este sentido.

Este capítulo ha demostrado que el uso de la percepción remota como parte de un sistema complejo e integrado de captura de datos acerca de parámetros

físicos, constituye una herramienta valiosa, catalizadora hacia un manejo sustentable de los recursos hidráulicos del país y que demanda un alto grado de especialización científica. Los esfuerzos realizados por el *Instituto Tecnológico de Sonora* (ITSON) respecto a la estimación de variables agrícolas e hidrológicas pudieran proveer información y dicha especialización.

LITERATURA CITADA

- Chehbouni, A., C. Watts, J. C. Rodríguez, F. Santiago, J.-Payán and J. Schieldge, 2001. Area-estimates of surface fluxes over a mosaic of agricultural fields. *In: Remote Sensing and Hydrology 2000, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, April 2000, edited by Manfred Owe, Kaye Brubaker, Jerry Richtie & Albert Rango, IAHS Publ. no. 267, 220-222.*
- Garatuza-Payan, J. y C.J. Watts. 1993. El uso de Imágenes de Satélite en la Estimación de Áreas Cubiertas por Nieve. *Revista ITSON-DIEP*, Ciudad Obregón, México. I No. 4, pp 3-15.
- _____. W. J. Shuttleworth, D. Encinas, D. D. Mc. Neil, J. B. Stewart, H. de Bruin and C. J. Watts. 1998. Measurement and Modelling Evaporation for Irrigated Crops in Northwest Mexico. *Hydrological Processes*, Vol 12, 1397-1418.
- _____. Pinker, R.T. and W. J. Shuttleworth, 2001a. High resolution day-time cloud observations for northwestern Mexico from GOES-7 satellite data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 39-56.
- _____. Shuttleworth, W. J. and R. Pinker, 2001b, Satellite measurements of solar radiation in the Yaqui Valley, Northern Mexico, *Geofísica Internacional*, Vol 40, No.3, pp 207-218.
- _____. Pinker, R.T., Shuttleworth, W. J. and C. Watts, 2001c, Solar radiation and evapotranspiration in northern Mexico estimated from remotely sensed measurements of cloudiness. *Hydrological Sciences Journal*, Vol 46, No. 3, pp. 465-478.
- _____. Pinker, R.T., Shuttleworth, W. J. and C. Watts, 2001d. Remotely Sensed Estimates of Evaporation for Irrigated Crops In Northern Mexico. *In: Remote Sensing and Hydrology 2000, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, April 2000, edited by Manfred Owe, Kaye Brubaker, Jerry Richtie & Albert Rango, IAHS Publ. no. 267, pp. 286-291.*
- _____. A. Tamayo, C. Watts and J.C. Rodríguez, 2003, Estimating Large Area Wheat Evapotranspiration from Remote Sensing Data, 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, I: 380–382
- _____. C. J. Watts, 2005. The use of remote sensing for estimating ET in NW Mexico, *Irrigation and Drainage Systems* Vol 19: 301-320.
- _____. W. Bastiaanssen and C. Watts, 2005b. Estudio histórico de uso y extracción del agua subterránea en dos áreas-piloto del Estado de Sonora. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, Reporte Final, 113p.

- Gochis, D. J., J. C. Leal, W. J. Shuttleworth, C. J. Watts and J. Garatuza-Payan, 2003. Preliminary Diagnostics from a New Event-Based Precipitation Monitoring System in Support of the North American Monsoon Experiment *Journal of Hydrometeorology*, 4: 974-981.
- _____. A. Jimenez, C. J. Watts, J. Garatuza-Payan and W. J. Shuttleworth. 2004. Diagnostic Analyses of 2002 and 2003 North American Monsoon Precipitation from the NAME Event Raingauge Network (NERN). *Monthly Weather Review*, Vol. 132, No. 12, 2938-2953.
- _____. C. J. Watts, J. Garatuza-Payan and J.C. Rodriguez 2005. Spatial and temporal patterns of precipitation intensity as observed by the NAME Event Rain Gauge Network from 2002 to 2004. *J. of Climate*. (Accepted).
- Goodrich, D. C., A. Chehbouni, B. Goff, B. Macnish, T. Maddock, S. Moran, W. J. Shuttleworth, D. G. Williams, C. Watts, L. H. Hips, D. I. Cooper, J. Schieldge, Y. H. Kerr, H. Arias, M. Kirkland, R. Carlos, P. Cayrol, W. Kepner, B. Jones, R. Avissar, A. begue, J. M. Bonnefond, G. Boulet, B. Branan, J. P. Brunel, L. C. Chen, T. Clarke, M. R. Davis, H. Debruin, G. Dedieu, E. Elguero, W. E. Eichinger, J. Everitt, J. Garatuza-Payan, V. I. Gempko, H. Gupta, C. Harlow, O. Hartogensis, M. Helfert, C. Holifield, D. Hymer, A. Kahle, T. Keefer, S. Krishnamoorthy, J. P. Lhomme, J. P. Lagouarde, D. Lo Seen, D. Luquet, R. Marsset, B. Monteny, W. Ni, Y. Nouvellon, R. Pinker, C. Peters, D. Pool, J. Qi, S. Rambal, J. Rodriguez, F. Santiago, E. Sano, S. M. Schaeffer, M. Schulte, R. Scott, X. Shao, K. A. Snyder, S. Sorooshian, C. L. Unkrich, M. Whitaker, I. Yucel, 2000. Preface paper to the semi-arid-land-surface-atmosphere (SALSA) program special issue, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 105, pp 3-20.
- Lobell, D. B., G. P. Asner, J. I. Ortiz-Monasterio, and T. L. Benning, 2003. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 94 (2003) 205–220.
- _____. and G. P. Asner, 2004. Cropland distributions from temporal unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 93 (2004) 412– 422.
- Rodriguez, J. C., C. Watts, G. Maubert, J. Garatuza-Payan, A. Tamayo, L. Palacios, y E. Palacios, 2001. Monitoreo de Cultivos Utilizando Imágenes Modis. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana*, Reunión Anual 2001 Vol. 21, No. 3, P. 349.
- _____. B. Duchemin, C. J. Watts, R. Hadria, J. Garatuza, A. Chehbouni, G. Boulet, M. Armenta and S. Er-Raki, 2003, «Wheat Yields Estimation Using Remote

- Sensing and Crop Modeling in Yaqui Valley in Mexico», 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IV: 2221–2223.
- _____. Duchemin, B., Hadria, R., Watts, C., Garatuza, J., Chehbouni, A., Khabba, S., Bouletb, G., Palacios, E. and A. Lahrounic, 2004. Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semiarid Yaqui valley, Mexico. *Agronomie* 24 (2004) 295–304.
- Salinas-Zavala, C. A., A. V. Douglas, and H. F. Diaz, 2002. Inter-annual Variability of NDVI in Northwest Mexico. Associated Climatic Mechanisms and Ecological Implications. *Remote Sensing and Environment* 82 (2-3): 417-430 p.
- Shuttleworth, W. J., M. A. Arain, J. Michaud, J. Garatuza, Z.-L. Yang and A. J. Dolman. 1995. Mapping vegetation parameters with remotely sensed landcovers and P1PE- and ABRACOS-validated aggregation rules. EOS, Transactions, American Geophysical Union, Spring Meeting, Supplement, Vol. 76, No. 17, page S 116.
- Stewart, J. B., H. R. R. de Bruin, J. Garatuza-Payan and C. J. Watts. 1995. Use of satellite data to estimate hydrological variables for northwest Mexico, 21st Annual Conference of the International Society of Remote Sensing, Southampton, UK, p. 91 - 98.
- _____. C. J. Watts, J. C. Rodríguez, H. A. R. de Bruin, A. R. Van den Berg and J. Garatuza-Payan, 1999. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for northwest Mexico. *Agricultural Water Management*, 38: 181-193.
- Unland, E. H., A. M. Arain, C. Harlow, P. R. Houser, J. Garatuza-Payan, P. Scott, O. L. Sen, and W. J. Shuttleworth. 1997. Evaporation from a Riparian System in a Semi-Arid Environment. *Hydrological Processes*, Vol 12, 527-542.
- Watts, C. J., J. C. Rodriguez, J. Garatuza-Payan, H. R. R. de Bruin and J. B. Stewart. 1995. Estimates of Solar Radiation from GOES data on Northwest Mexico, 21st Annual Conference of the International Society of Remote Sensing, Southampton, UK, p. 930-910.
- _____. 1999. Estimación de evaporación y radiación solar en el valle del Yaqui, Sonora, usando datos de satélite, *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XIV, 3: 45-53.
- _____. A. Chehbouni, J. C. Rodríguez, F. Santiago, J. Garatuza-Payán and J. Schieldge, 2001. Aggregation rules for sensible heat flux estimates over

agricultural fields in Mexico. *In*: Remote Sensing and Hydrology 2000, Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, April 2000, edited by Manfred Owe, Kaye Brubaker, Jerry Richtie & Albert Rango, IAHS Publ. no. 267, pp. 217-219.

Yucel, I., J. Garatuza-Payan, J. J. Toth, J. J. Shuttleworth and R. T. Pinker. 1998. Cloud Screened Surface Radiation Estimates with High Resolution from Goes-9 Data. American Meteorological Society, Special Symposium on Hydrology, Phoenix, Arizona. Paper-P2.2.

Capítulo VII

Funcionamiento Hidrodinámico del Suelo en una Cuenca del Norte de México Utilizando la Simulación de Lluvia

Dr. Guillermo González Cervantes, Dr. Juan Estrada Avalos,
Dr. Jean Yves Loyer y Dr. J. P. Rossignol

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	102
MÉTODO DE APROXIMACIÓN	102
Selección y ubicación de los sitios experimentales	104
Dinámica del agua en la superficie de los suelos	104
RESULTADOS	107
Caracterización físico-química de la superficie de los suelo	107
Simulación de lluvia y escurrimiento	108
CONCLUSIONES	112
LITERATURA CITADA	114

INTRODUCCIÓN

El norte de México presenta un clima de árido a semiárido con un gradiente de precipitación pluvial anual de 250 a 600 mm según la altitud (Buendía, 1998; Estrada, 1999). Bajo estas condiciones climáticas las actividades agrícolas son poco favorables, de ahí que los agricultores se orienten hacia una explotación de la ganadería extensiva (1/9 UA) (Anaya 1998, Anaya y Barral, 1995) como principal actividad económica; para ello intentan aprovechar al máximo el agua de escurrimiento durante la temporada de lluvias (julio-octubre) mediante la construcción de pequeños bordos de retención ubicados en la partes bajas de las cuencas vertientes, el resto del año tienen que hacer uso del agua subterránea para abreviar el ganado (Anaya y Barral, 1995, Barral *et al.*, 1993).

Dada la fragilidad de los ecosistemas presentes en las zonas áridas y semiáridas, resalta la importancia de hacer un buen uso del agua de escurrimiento y un almacenamiento eficaz en los pequeños bordos de retención (Descroix *et al.*, 1997). Bajo este contexto se desarrolló esta investigación -al nivel del funcionamiento hidrodinámico de los suelos- (Audry, 1973; Delhoume, 1996; Viramontes, 2000; Descroix *et al.*, 2002), a través de su comportamiento en superficie (infiltración-escurrimiento) (Horton, 1933; Lafforgue, 1977; Collinet y Valentin, 1979; Lafforgue y Casenave, 1980; Asseline, 1997; Delhoume, 1997). El objetivo del presente capítulo es describir el enfoque experimental utilizado en una cuenca vertiente del norte de México para estudiar el funcionamiento hidrodinámico de la superficie del suelo.

MÉTODO DE APROXIMACIÓN

Los trabajos de campo se realizaron en la cuenca vertiente de Carboneras (1.06 km²) dentro de las instalaciones del rancho Atotonilco (450 km²), propiedad dedicada a la explotación de ganadería extensiva; el rancho se localiza entre los meridianos 24° 33' y 24° 50' de latitud norte y los paralelos 103° 34' y 103° 50' de longitud oeste, dentro del municipio de Cuencamé, Dgo., (Figura 1).

El clima semiárido de la región (Nouvelot y Descroix, 1996) se caracteriza por una precipitación media anual de 450 mm, con una estación de lluvias estival -de mayo a septiembre- donde se precipita entre el 80 y 90 por ciento del total de la lluvia. Las lluvias invernales -de noviembre a enero- representan entre el 10 y 15 por ciento de este total (Estrada, 1999). Desde el punto de vista geológico, Carboneras se sitúa en el contacto de los materiales eruptivos y sedimentarios (Loyer y Moriaud, 1996), (Figura 2).

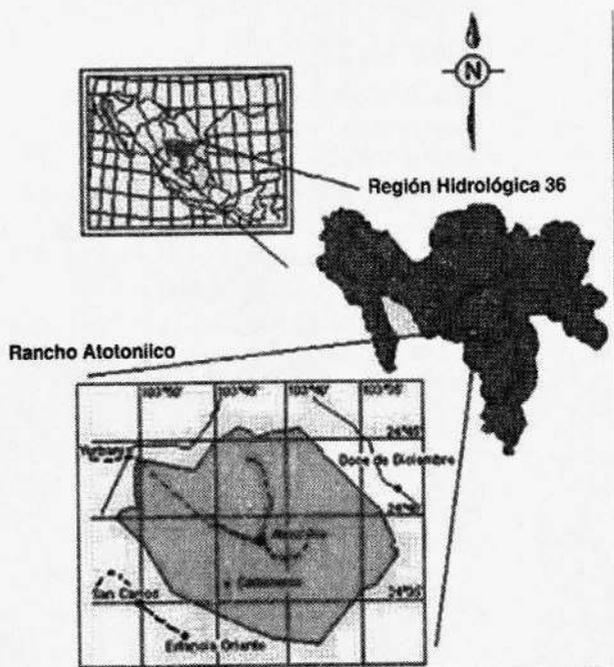


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Estrada, 1999).

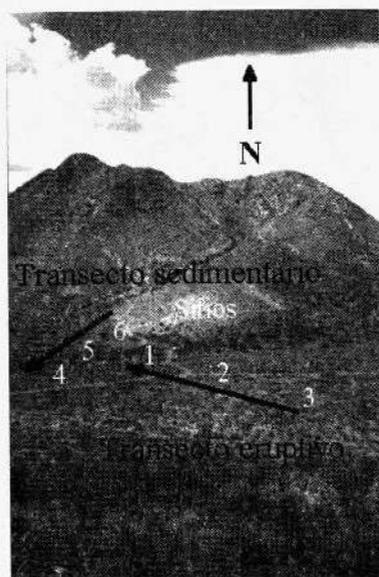


Figura 2. Cuenca vertiente de Carboneras y sitios experimentales (González, 2002).

Selección y ubicación de los sitios experimentales.

Posterior a la descripción edafológica de 112 pozos en la cuenca de Carboneras (González, 2002) permitió seleccionar y ubicar dos transectos (Figura 2) a fin de incluir los diferentes componentes topográficos de una vertiente (parte alta, con pendiente fuerte; parte media con pendiente moderada, y parte baja con pendiente débil) en dos situaciones geológicas (Castillo *et al.*, 1999), una vertiente sobre substrato calcáreo del cretácico (transecto sedimentario), la otra sobre substrato eruptivo del cuaternario (transecto eruptivo); en cada vertiente se seleccionaron tres sitios representativos para su estudio, estos sitios son representativos desde el punto de vista geológico, edafológico, morfológico y de vegetación. De esta forma en el Cuadro 1 se describen los sitios seleccionados.

Dinámica del agua en la superficie de los suelos.

Para el estudio de la relación escurrimiento-infiltración en la superficie se utilizó el simulador electrónico de lluvias (Asseline y Valentin, 1978; Casenave, 1986; Albergel, 1987) (Figura 3) que permite simular lluvias de diferentes intensidades (18 a 145 mm h^{-1}) durante un tiempo definido (Albergel y Thebe, 1986).

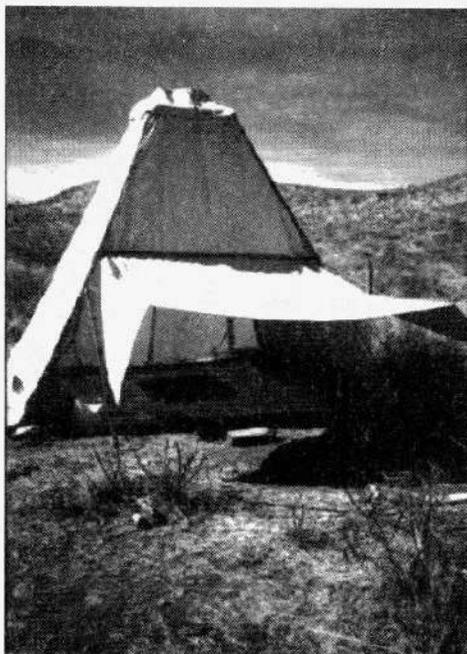


Figura 3: Simulador electrónico de lluvias.

Cuadro 1. Descripción de los sitios representativos y de las parcelas.

Ubicación	Transecto eruptivo (TE)			Transecto sedimentario (TS)		
	Parte alta	Parte media	Parte baja	P. alta	P. media	P. baja
Litología	Riolita	Caliche y riolita	Aluviones	Caliche	Caliche	Coluviones
Sitios	3	2	1	6	5	4
Pendiente (%)	17	18	7	19	9	8
Prof. del suelo (cm)	20	25	>200	15	140	150
Pendiente %	17	18	7	19	9	8

El protocolo de lluvias artificiales se definió a partir de las principales características de la lluvia natural: frecuencia e intensidad de la lluvia diaria y el intervalo entre dos eventos lluviosos (Estrada, 1999). Enseguida se instalaron 18 parcelas de 1 m² a razón de tres parcelas por sitio, sobre las cuales se aplicaron tres lluvias simples (Thiebaut *et al.*, 1999) con el fin de aplicar la misma cantidad de agua (22.5 litros), según el protocolo y cronología descritos en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Protocolo de simulación de lluvia para la cuenca de Carboneras.

	Parcela 3-1		Parcela 3-2		Parcela 3-3	
	Intensidad mm h ⁻¹	Duración mn	Intensidad mm h ⁻¹	Duración mn	Intensidad mm h ⁻¹	Duración mn
Lluvia 1	90	15	30	45	60	22
Lluvia 2	90	15	30	45	60	22
Lluvia 3	90	15	30	45	60	23

Las lluvias 1 y 2 tuvieron un intervalo de 20 minutos. Las lluvias 2 y 3 el intervalo fue de un día.

La lluvia 1 se aplicó sobre un suelo seco (1 a 2 por ciento de humedad ponderal, 1.3 a 2.6 por ciento de humedad volumétrica) sobre los primeros 5 cm de profundidad. La lluvia 2 se inició sobre un suelo húmedo (21 a 22 por ciento de humedad ponderal, 26 a 28 por ciento volumétrica). La lluvia 3 con un contenido de humedad volumétrico del 20 al 22 por ciento.

1. Fase de imbibición. Corresponde al total de la lluvia que se infiltra o se acumula en la superficie de la parcela. En esta fase no se presenta escurrimiento.
2. Fase de transición. Una vez que inicia el escurrimiento, éste aumenta progresivamente, el cual está en correlación con una disminución progresiva de la infiltración.
3. Fase de régimen de movimiento permanente. Corresponde al equilibrio entre el escurrimiento y la infiltración, donde el agua que escurre alcanza un máximo (Rx), mientras que el agua que se infiltra un mínimo (Fn).
4. Fase de vacío. Corresponde a la parte final de la simulación, donde el escurrimiento disminuye hasta desaparecer rápidamente.

RESULTADOS

Primeramente se describieron los estados de superficie de las parcelas (1 m²) al método de puntos cuadrantes utilizando líneas de espacios regulares (Brown, 1954; Daget y Poissonet, 1969 y 1971). Esta descripción permite considerar los obstáculos que las gotas de lluvia pueden encontrar al llegar a la superficie del suelo. La presencia o ausencia de estos obstáculos puede aumentar o disminuir la capacidad de infiltración o escurrimiento.

En el Cuadro 3 se observan los valores promedio de la cobertura total expresados en por ciento. La lectura de este cuadro muestra recubrimientos de la superficie contrastantes; por ejemplo, la cubierta vegetal (pastos) generalmente se reduce en la mayoría de los sitios inferior al 12 por ciento, pero resaltan los sitios dos y seis con una tasa de cobertura superior al 21 por ciento.

La cobertura total de piedras es superior al 21 por ciento para los sitios dos, tres y seis, pero el sitio uno se distingue por la nula presencia de piedras.

Con relación al suelo desnudo, la tasa de cobertura es superior al 70 por ciento para los sitios uno y tres; (70 y 80 %) del transecto eruptivo cuatro y cinco, y (74 y 75 %) del transecto sedimentario.

Cuadro 3. Principales características de la superficie de las parcelas de los dos transectos.

Sitios	Transecto eruptivo			Transecto sedimentario		
	3	2	1	6	5	4
Cobertura total piedras (%)	22	21	0	31	11	12
Cobertura vegetal (%)	8	25	20	22	15	13
Cobertura del Suelo (%)	70	54	80	47	74	75

Caracterización físico-química de la superficie del suelo.

Enseguida se realizó el análisis físico-químico del horizonte superficial (0-5 cm). Los resultados se muestran en el Cuadro 4 y comprende el contenido de arena, limo, arcilla, carbón total, carbonato de calcio y el pH.

La observación en este cuadro permitió organizar y agrupar los suelos. Con base en la textura, en general son suelos arenosos para casi todos los sitios, con un contenido en limo homogéneo (entre 6 y 11 %), excepto el sitio cuatro del transecto sedimentario que presenta un contenido importante de arcillas (31 %).

Así también, la distribución del carbón total generalmente es homogénea, con una ligera superioridad para los suelos del transecto sedimentario.

La distribución espacial del carbonato de calcio (CaCO_3) (González, 2002), donde los suelos de la parte media del transecto eruptivo (sitio 2) presentan un contenido importante de CaCO_3 (3.5 %), al contrario de los suelos de la parte baja del transecto sedimentario (sitio 4), donde no se reporta la presencia de este compuesto químico.

Dada La descripción de los estados de superficie y la distribución superficial del CaCO_3 en la cuenca, permitieron agrupar los suelos para su estudio en suelos con carbonatos (sitios 2, 6 y 5), y sin carbonatos (sitios 3, 1 y 4).

Cuadro 4. Resultados del análisis granulométrico y químico de los suelos.

Sitio	Transecto eruptivo			Transecto sedimentario		
	3	2	1	6	5	4
	Horizonte superficial del suelo (0-5 cm)					
Arena (%)	72	74	75	71	69	58
Limo (%)	7	6	9	6	7	11
Arcilla (%)	21	20	16	23	24	31
Carbón total (%)	2	2,3	1,7	3,6	2,4	2,8
CaCO_3 total (%)	0	3,5	0	2,5	2,3	0
pH	6,8	8,1	5,9	8,2	8,2	7,7

Simulación de lluvia y escurrimiento

Posterior al agrupamiento de los suelos se inició la simulación de lluvia artificial (Casenave, 1982) considerando que los principales factores que influyen en el escurrimiento o infiltración son; la intensidad y duración de la lluvia, tipo de suelo (textura, carbón y carbonatos), estado de la superficie (piedras, vegetación y suelo desnudo) y la pendiente. A continuación se describen las cuatro fases que se presentaron bajo la simulación artificial de lluvia:

1. Fase de imbibición (Pi).

La Figura 4 presenta los valores de la lluvia de imbibición (Pi) en función de intensidad de la lluvia (I) y del contenido de humedad inicial del suelo para todas las parcelas.

Bajo una lluvia de intensidad constante de 30 mm h^{-1} , los suelos sin CaCO_3 (sitios 3, 1 y 4) presentan una Pi que varía de 14 mm en suelo seco, de 3 a 5 mm sobre suelo húmedo y de 4 a 9 mm en suelo drenado. Para estos suelos el agua

total que se infiltra (Cuadro 5) o se acumula en la superficie es del 43 al 60 por ciento en suelo seco, del 14 al 20 por ciento en suelo húmedo y del 41 por ciento en suelo drenado.

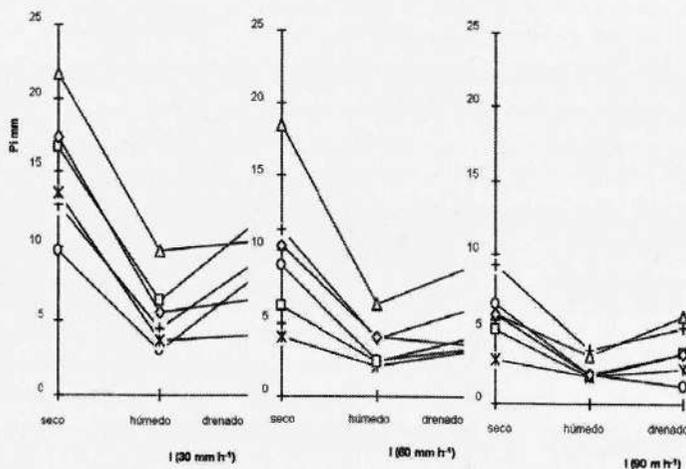


Figura 4. Fase de imbibición (P_i) en función de la intensidad de lluvia (I) para los diferentes estados de humectación inicial del suelo.

Por su parte, los suelos carbonatados (sitios 2, 6 y 5) muestran una variación de la P_i de 17 a 22 mm en suelo seco, de 6 a 10 mm para suelo húmedo y de 7 a 12 mm para suelo drenado, con un total de lluvia infiltrada de 74 a 98 por ciento en suelo seco, de 25 a 43 por ciento para suelo húmedo y de 29 a 52 por ciento para suelo drenado, bajo la misma intensidad de lluvia (30 mm h^{-1}).

Cuadro 5. Representaciones en porcentaje de la fase de imbibición (P_i), en función de la intensidad simulada (I) y de la condición inicial de humedad del suelo.

Suelo	Humedad inicial del suelo	* Lluvia simulada en mm h^{-1}		
		30 P_i en %	60 P_i en %	90 P_i en %
Sin carbonatos	Seco	43 - 60	18 - 50	13 - 42
	Húmedo	14 - 20	9 - 18	8 - 17
	Drenado	18 - 41	14 - 27	5 - 23
Con carbonatos	Seco	74 - 98	27 - 82	22 - 27
	Húmedo	25 - 43	10 - 28	8 - 15
	Drenado	29 - 52	16 - 40	15 - 26

Al incrementar la intensidad de lluvia a 60 mm h^{-1} los suelos de la parte alta del transecto sedimentario (sitio 6) presentan una P_i aún importante de 18 mm en suelo seco; de 7 mm en suelo húmedo, y de 9 mm en suelo drenado, con un total de lluvia infiltrada del 82, 31 y de 40 por ciento respectivamente. El resto de los sitios presentan una P_i relativamente importante de 18 a 50 por ciento en suelo seco y reducida en suelo húmedo (de 9 a 28 %) y drenado (14 a 40 %).

Bajo una intensidad de 90 mm h^{-1} sólo el sitio uno presenta una P_i considerable, 9.5 mm en suelo seco, con una infiltración del 40 por ciento. Para el resto de los sitios el comportamiento de la superficie del suelo es sensiblemente homogénea tanto en suelo húmedo (8 a 17 %) como en suelo drenado (5 a 26 %).

2. Fase de transición.

La suma de la duración de la fase de inhibición (P_i) y la duración de la fase de transición (T_t) corresponde al tiempo necesario (T_{it}) para que se instale el régimen de movimiento permanente. La Figura 5 representa la T_{it} en función de la intensidad de lluvia (I) para todos los sitios bajo las tres condiciones de humedad.

La T_{it} muestra una cierta analogía con las curvas de P_i (Figura 4). La lectura de estas gráficas permite resaltar a los suelos carbonatados (sitios 2, 6 y 5), ya que si la intensidad de lluvia es de 30 mm h^{-1} la T_{it} es casi idéntica de 43 a 45 min en suelo seco; es decir, toda el agua se infiltra y no llega jamás a la instalación del régimen de movimiento permanente, aún sobre suelo húmedo el sitio seis se infiltra toda el agua.

A diferencia de los suelos no carbonatados donde la T_{it} varía de 33 a 38 min, tiempo necesario para que se instale el régimen de movimiento permanente e inicie el escurrimiento. Si el suelo está húmedo la T_{it} varía de 13 a 15 min para que inicie el escurrimiento.

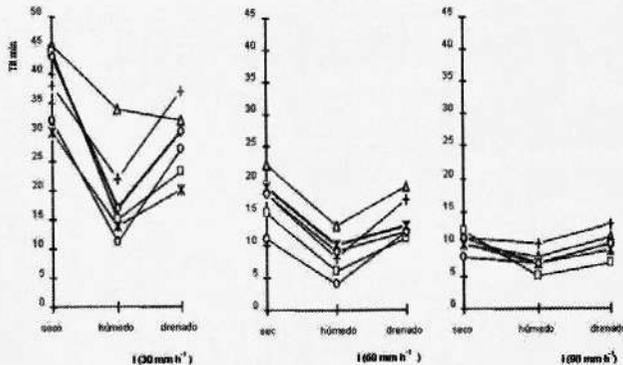


Figura 5. Tiempo necesario de la lluvia (T_{it}) para que inicie el escurrimiento.

3. Régimen de movimiento permanente.

Para un sitio y una intensidad dada, el régimen de movimiento permanente corresponde a la capacidad mínima de absorción (F_n) en agua por el suelo, que corresponde a la infiltración mínima del suelo con una correlación del escurrimiento máximo en superficie (R_x).

La Figura 6 presenta los histogramas del escurrimiento máximo y la infiltración mínima de los suelos de Carboneras. Los suelos no carbonatados presentan una R_x de 2.7 a 8.5 mm h^{-1} , con una I de 30 mm h^{-1} bajo una condición de suelo seco, y de 4 a 12 mm h^{-1} en suelo húmedo, con un escurrimiento máximo del orden de nueve a 28 por ciento en suelo seco, (Cuadro 6) y de 13 a 40 por ciento en suelo húmedo.

Por su parte, los suelos carbonatados (sitios 2, 6 y 5) bajo la misma intensidad de lluvia (30 mm h^{-1}) no presentan escurrimiento en suelo seco. Pero si la condición inicial del suelo es húmeda, el escurrimiento es del orden de 1 a 5.8 mm h^{-1} .

Al incrementar la intensidad de lluvia (60 mm h^{-1}), solamente el sitio seis no presenta escurrimiento.

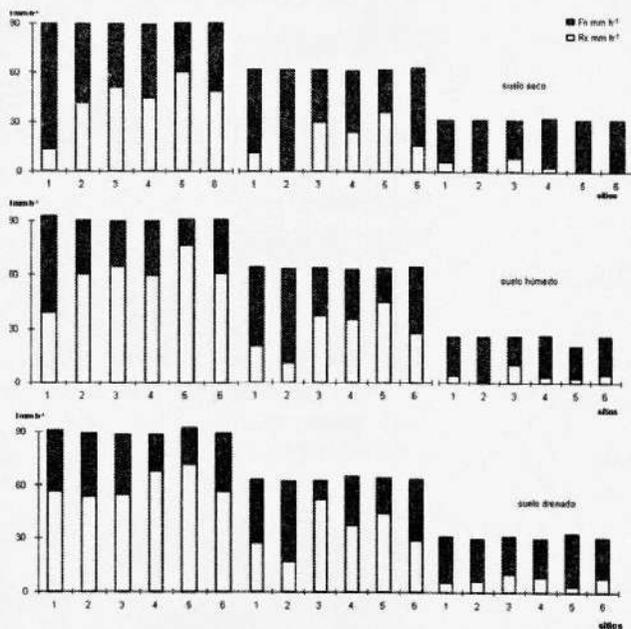


Figura 6. Valores de escurrimiento máximo (R_x) y de infiltración (F_n) en régimen de movimiento permanente para las diferentes intensidades de lluvia (I) y para los diferentes sitios.

Cuadro 6. Representación en porcentaje del escurrimiento máximo (Rx) en función la lluvia simulada y la humectación del suelo.

Grupo	Humedad del Suelo	Lluvia simulada en mm h ⁻¹		
		30 Rx en %	60 Rx en %	90 Rx en %
Sin carbonato	Seco	9 - 28	17 - 48	15 - 57
	Húmedo	13 - 40	64 - 59	44 - 72
	Drenado	18 - 32	45 - 83	61 - 75
Con carbonato	Seco	0	0 - 58	47 - 67
	Húmedo	3 - 19	18 - 71	67 - 85
	Drenado	12. - 26	27 - 71	60 - 80

Bajo una intensidad de 90 mm h⁻¹ y suelo seco, el escurrimiento es casi idéntico (42 a mm h⁻¹); es decir, de 47 a 67 por ciento del escurrimiento máximo para todos los sitios, excepto el sitio uno que presenta una Rx reducida. (13.9 mm h⁻¹).

CONCLUSIONES

El simulador de lluvias es una herramienta útil y fiable que permite describir la relación escurrimiento-infiltración de un suelo *in situ*.

Es evidente que después de estos resultados la relación escurrimiento-infiltración sobre los suelos de los dos transectos de la cuenca vertiente de Carboneras presenta un comportamiento diferente. Aquí se pueden distinguir tres ambientes receptores del agua:

Suelo seco

Los suelos no carbonatados (sitios 3, 1 y 4) presentan un comportamiento favorable al escurrimiento, que corresponde a la parte baja y alta del transecto eruptivo. En estos suelos el almacenamiento hídrico en la superficie del suelo representa una fracción reducida con relación en el aporte de la lluvia. Por ello, este tipo de suelos favorecen al llenado de los pequeños bordos de retención mediante el escurrimiento superficial.

Suelos carbonatados

Los sitios (2, 6 y 5) presentan un comportamiento favorable a la infiltración, que corresponde a los suelos de las partes alta media y baja del transecto

sedimentario y media del transecto eruptivo. En estos suelos la cantidad de agua infiltrada representa una fracción importante del aporte pluviométrico, afectando la disponibilidad de agua para el llenado de los pequeños bordos de retención.

Suelo húmedo y drenado

El comportamiento hídrico superficial es sensiblemente homogéneo para todos los sitios. Si el suelo está húmedo o drenado, la cantidad de agua que escurre hacia el bordo de retención representa una fracción importante del aporte pluviométrico.

Los resultados encontrados en la relación escurrimiento infiltración de la cuenca de Carboneras son dependientes de la presencia o ausencia del carbonato de calcio en el horizonte superficial (0-5 cm), de la humectación inicial del suelo y de la intensidad de lluvia.

LITERATURA CITADA

- Albergel J. y B. Thebe. 1986. Pluie naturelle. Pluie simulée. Quelle différence sur le ruissellement? ORSTOM, Gouttes et splash, Vol. 3, N° 1.
- _____ J. 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au Km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Doct. Université de Paris VI (spécialité : Hydrologie).
- Anaya N., E. 1998. Caracterización y evaluación de la cobertura vegetal en la cuenca del arroyo de Ocuila. Folleto científico N° 10 INIFAP-ORSTOM.
- _____ y H. Barral. 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México.
- AUDRY. 1973. Perméabilité, méthode Müntz. Dynamique actuelle. *Fiche Technique*.
- Asseline, J., and C. Valentin. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cahiers d'Hydrologie ORSTOM. Vol XV, N°4, p 321-349.
- _____ 1997. Le simulateur de pluie en 1997 (type ORSTOM, Asseline-Valentin): adaptations aux zones semi-arides et de montagne. IN: De Noni, Georges; Lamachère, Jean-Marie; Roose, Eric (eds.) Erosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes. Bulletin - Réseau Erosion (FRA), No 17, p. 272-281.
- Barral, H., I. Orona C. y E. Anaya N. 1993. Manejo ganadero en relación con el recurso agua. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Region Hidrológica 36.
- Brown, D. 1954. Methods of surveying and measuring vegetation. Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops. Hurley Berks Bull., No. 42, 1 vol., 223 p.
- Buendía, A. 1998. Análisis hidrológico en parcelas experimentales de la subcuenca Sardinias de la región hidrológica 36. UAAAN-INIFAP-ORSTOM. 59 p.
- Casenave, A. 1982. Le minisimulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrologie, vol. XIX, n 4 : 207-227.
- _____ 1986. L'apport de la simulation de pluie dans l'analyse des phénomènes de ruissellement et d'infiltration : quelques exemples d'application hydrologiques. In Annales du Comité National Français de Géodésie et Géophysique, vol. 5, 205-218.

- Castillo S., G., J. Y. Loyer, C. G. Gonzalez y R. C. Efrén. 1999. Datos edafológicos 1999, de la cuenca vertiente Carboneras, rancho Atotonilco, estado de Durango–Norte de México.
- Collinet, J., C.Valentin. 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n° 4.
- Daget, P. et J. Poissonet J. 1969. Analyse phytologiques des Prairies. Applications agronomiques. Cepe-cnrs, montpellier, doc. N° 48, 1 vol., 67 p.
- _____. 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. Ann. Agron., 22, 1 5-41 p.
- Delhoume, J., 1996. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la Biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. Thèse Doct. Université de Poitiers.
- _____. 1997. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride. Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. TDM. ORSTOM Editions. Paris, France. 295 p.
- Descroix, L., J. L. González Barrios, J. P. Vandervaere, D. Viramontes y A. Bollery. 2002. An experimental análisis of hydrodynamics behaviour on soils and hills-slopes in a subtropical mountainous environment (Western sierra madre, Mexico). Journal of hydrology. 266 1-14.
- _____. J. F. Nouvelot y J. Estrada. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. INIFAP ORSTOM. Gómez Palacio, Dgo.
- Estrada A., J. 1999. Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique. Thèse Doct. Université de Montpellier II.
- González C., G. 2002. Fonctionnement hydrodynamique des sols de versant en amont de petits barrages en region semi-aride du Nord Mexique (Ranch Atotonilco). Thèse de doctorat, Université d'Angers, France.
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Amer. Geophys. Union, 14, 446–460.
- Lafforgue, A. 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Cahiers d'Hydrologie ORSTOM. Vol XIV, n° 4.
- _____. et A. Casenave. 1980. Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. La Houille Blanche.

- Loyer, J. Y., S. Moriaud. 1996. Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. Folleto científico No. 6, INIFAP-ORSTOM.
- Nouvelot, J. F. et L. Descroix. 1996. Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. Trace (Revista del Centro Francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, México), No. 30, pp 9-25.
- Thiebaut J. P., G. Gonzalez C. et J. Y. Loyer. 1999. Informe de investigación de simulación de lluvia 1999 en la cuenca Carboneras, rancho Atotonilco, estado de Durango-Norte de México. IRD CENID-RASPA.
- Viramontes P., D. 2000. Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidental, Mexique) causes et conséquences de son évolution. Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, Francia.

Capítulo VIII

Reconstrucciones Paleoclimáticas con Anillos de Árboles en la Cuenca Nazas-Aguanaval de la Región Hidrológica 36

Dr. José Villanueva Díaz, Ing. Julian Cerano Paredes,
Dr. B.H. Luckman, Dr. D.W. Stahle, Dr. M. D. Therrell,
Dr. Juan Estrada Ávalos, Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	118
MÉTODO DE APROXIMACIÓN	119
Área de estudio	119
Obtención de núcleos de crecimiento y generación de cronologías	120
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	121
Cronologías generadas en la cuenca Nazas-Aguanaval	121
Reconstrucciones de precipitación	124
Comportamiento de eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones de precipitación analizadas	130
Reconstrucciones de flujo	133
CONCLUSIONES	139
LITERATURA CITADA	141

INTRODUCCIÓN

La actividad agropecuaria en la Comarca Lagunera depende del suministro de escurrimiento generado en la parte alta de las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval, que se estima alcanza un volumen medio anual de $1,189 \times 10^6 \text{ m}^3$; de los cuales $1,047 \times 10^6 \text{ m}^3$ (88 %) corresponden al río Nazas y 42×10^6 (12.0 %) al río Aguanaval (Descroix *et al.*, 1993, 1997; CNA, 1999).

Ambos sistemas endorreicos drenan de manera natural de occidente a oriente y de sur a norte hacia las lagunas de Mayrán y Viesca, respectivamente, sitios que se ubican en la parte más baja de la Región Hidrológica 36. La construcción de presas con fines de riego en puntos estratégicos de estos sistemas endorreicos originó la disecación paulatina de estos reservorios naturales. Actualmente, el agua captada en las presas ubicadas en el río Nazas, se libera durante la estación de crecimiento para irrigar una superficie promedio de 67 mil ha año⁻¹ en el Distrito de Riego 017, acción que altera de manera significativa el flujo natural de los escurrimientos durante el año para ajustarse al ciclo de desarrollo de los cultivos que se siembran en la parte baja de la cuenca; esto ha originado serias alteraciones en la composición de las especies del bosque de galería, que han sido paulatinamente sustituidas por algunas con mayor tolerancia a condiciones de sequía, situación que afecta la biodiversidad del ecosistema y su propia estabilidad ecológica.

Para el río Aguanaval, no obstante el escaso volumen de escurrimiento que fluye por su cauce para soportar actividades productivas en la Comarca Lagunera, su importancia radica en la aportación de agua para riego superficial y recarga del acuífero en la región de Viesca y Matamoros, y en el sostenimiento de un ecosistema de galería en cuyos márgenes se genera la recarga del manto freático que alimenta la agricultura en dichos municipios (Cháirez y Palerm, 2004).

El entendimiento histórico de la variabilidad hidroclimática en esta región es de suma importancia para el manejo y planificación de los recursos hídricos a corto, mediano y largo plazo; diseño de estructuras hidrológicas, modelación de posibles escenarios climáticos y disponibilidad de agua para diversas actividades económicas y para consumo humano. De esta manera, el objetivo del presente trabajo es documentar la información hidroclimática histórica generada hasta el momento para la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas aledañas con el uso de anillos de árboles como «proxy» del clima; definir la presencia de eventos de baja frecuencia en el tiempo (sequías y períodos húmedos), posibles causas y probables escenarios climáticos.

MÉTODO DE APROXIMACIÓN

Área de estudio

La cuenca Nazas-Aguanaval abarca una superficie total de 55 mil 377 km² y forma parte de la Región Hidrológica 36 en los estados de Durango, Zacatecas y Coahuila, donde los ríos Nazas y Aguanaval tienen un área de drenaje de 35 mil 577 y 19 mil 800 km², respectivamente (Figura 1). El régimen de flujo del río Nazas es de carácter perenne y se caracteriza por poseer una descarga máxima de 25 a 74 m³ s⁻¹ en la estación de verano (junio–octubre) y una mínima de 1 a 8 m³ s⁻¹ en invierno y primavera (Estrada-Avalos, J. 1995). Por otra parte, el flujo del río Aguanaval es de corta duración, con un máximo de 10 días de flujo continuo, especialmente en la estación de verano y ocasionalmente en el otoño. La descarga máxima medida es del orden de 850 m³ s⁻¹ (Estrada *et al.*, 1993).

La geología de la cuenca Nazas-Aguanaval está dominada por rocas riolíticas, con suelos someros (20 a 60 cm de profundidad) y clasificados morfológicamente como Litosoles y Vertisoles (Loyer y Moriaud, 1996; Descroix *et al.*, 2002).

El clima es subtropical con un régimen de precipitación de verano, donde el 80% de la precipitación se presenta de mediados de junio hasta las primeras semanas de octubre. La precipitación total anual varía de menos de 300 mm año⁻¹ en la parte baja (<1,200 m) a más de 1000 mm en elevaciones superiores (2,800 a 3,300 m) de la cuenca (Estrada *et al.*, 1993; Descroix *et al.*, 2002). La temperatura media varía de 8 a 24 °C en la parte alta, aunque fluctúa de 14 a 20 °C para un gran porcentaje de la cuenca.

Una vegetación de bosque mixto de coníferas domina las altas elevaciones (2,400 a 3,200 m), pero en elevaciones inferiores (<1,200 m) los encinares, chaparrales y vegetación semidesértica son las comunidades vegetales dominantes.

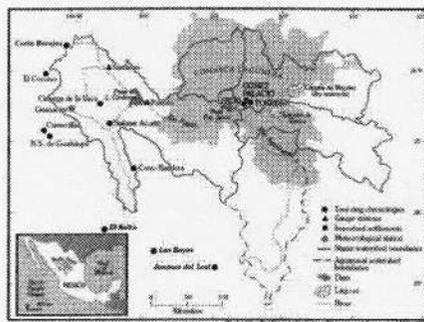


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Nazas-Aguanaval, estaciones climáticas, hidrométricas y cronológicas de anillos de árboles.

Los núcleos de crecimiento incrementos o virutas se obtuvieron con un taladro de Pressler de árboles seleccionados de ayarín (*Pseudotsuga menziesii*), pino triste (*Pinus lumholtzii*), pino piñonero (*Pinus cembroides*) y de sabino o ahuehuete (*Taxodium mucronatum*) en rodales de bosque mixto, bosque de pino-encino y vegetación de galería con poco disturbio. El muestreo de virutas se complementó con la obtención de secciones transversales de material muerto o de tocones de aprovechamientos previos.

Obtención de núcleos de crecimiento y generación de cronologías

Los núcleos de crecimiento se identificaron, montaron y pegaron en secciones acanaladas de madera para facilitar su manejo; posteriormente se pulieron intensamente con diversos grados de lija (grano grueso a fino, grados progresivos 120, 220, 360 y 400). En el Laboratorio de Dendrocronología del INIFAP, y con la ayuda de un estereomicroscopio trinocular de alta resolución, se contaron y fecharon los anillos al año exacto de su formación mediante el uso de técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968). La técnica del fechado cruzado o cofechado utilizada para determinar el año exacto de formación de cada crecimiento consistió en la identificación de patrones comunes de la variación interanual de los anillos de crecimiento que se repiten de una muestra a otra, de tal forma, que a cada anillo de crecimiento se le asignó una fecha al año de su formación. Una vez fechadas las muestras, cada crecimiento individual (anillo total) se midió con un sistema de medición VELMEX con una resolución de 0.01 mm. El cofechado, calidad de la respuesta climática y exactitud de la medición de cada anillo se verificó con el programa COFECHA (Holmes, 1983; Grissino-Mayer, 2001).

Las tendencias biológicas no relacionadas con clima se removieron con el programa ARSTAN al insertar una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición. Esto creó una serie de índices normalizados (cronologías) con media de 1.0 y varianza homogénea (Cook, 1987).

Para determinar la influencia del clima en el crecimiento estacional de las especies consideradas se recopiló de la base climática ERIC y de información climática proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, aquellas estaciones climáticas más cercanas a los sitios de colecta. La respuesta climática entre precipitación y el crecimiento anual se investigó con la subrutina «Análisis de Función de Respuesta (RESPO) incluida en el paquete de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en Inglés). Una vez definido el período de respuesta climática, con la mitad de datos climáticos disponibles se realizó una calibración entre la cronología y los registros estacionales de precipitación y posteriormente con la otra mitad, una verificación (Fritts, 1991). Finalmente se obtuvo una ecuación de transferencia para el período total de datos de precipitación

disponibles, la cual fue utilizada para desarrollar la reconstrucción de precipitación en la longitud total de la cronología. A la serie de alta frecuencia (resolución anual) se le ajustó una curva decenal flexible para resaltar la presencia en la reconstrucción de eventos de baja frecuencia como sequías o períodos húmedos (Cook y Peters, 1981). Los períodos de sequía presentes en la reconstrucción se compararon con períodos similares en otras reconstrucciones de precipitación realizadas para sitios ubicados en las Sierras Madre Occidental.

Para efectos de reconstrucción de flujos, las cronologías de madera temprana y de anillo total se compararon con datos de la sumatoria de gastos de agua de las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca Nazas-Aguanaval. Debido a que el flujo no es una variable independiente y muestra autocorrelación con eventos hidrológicos previos, los gastos se transformaron (x^2 , \sqrt{x} , $\log(x)$, $1/x$) para normalizarlos y compararlos con los índices dendrocronológicos.

El período de flujo acumulado, en el cual el crecimiento anual del arbolado responde significativamente, se determinó mediante un análisis de función de respuesta. Para el proceso de calibración, la cronología se comparó con la mitad de los datos de flujo disponibles, mientras que la otra mitad se utilizó para verificar la ecuación. Si ambos períodos resultaron significativos, entonces se procedió a obtener una ecuación de transferencia para el período total de datos instrumentales y a realizar la reconstrucción de flujos.

A los datos reconstruidos se les ajustó una curva decenal flexible para resaltar eventos de baja frecuencia y posteriormente se compararon con otras reconstrucciones para la región. La presencia en los datos reconstruidos de eventos climáticos extremos se verificó en lo posible con documentos históricos existentes para la región o registros instrumentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cronologías generadas en la cuenca Nazas-Aguanaval

En los últimos cinco años el INIFAP ha generado una red de cronologías de árboles en la Sierra Madre Occidental y específicamente para la cuenca Nazas-Aguanaval (Figura 2). La longitud de las cronologías fluctúa de 300 a más de 600 años y existe potencial para extenderlas en el tiempo (Cuadro 1).

Estas cronologías permitirán analizar con mayor detalle tanto en espacio como en tiempo la variabilidad hidroclimática que caracteriza a esta región, santuario de producción de agua para la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense y la Planicie Costera del Pacífico y para producción maderable.

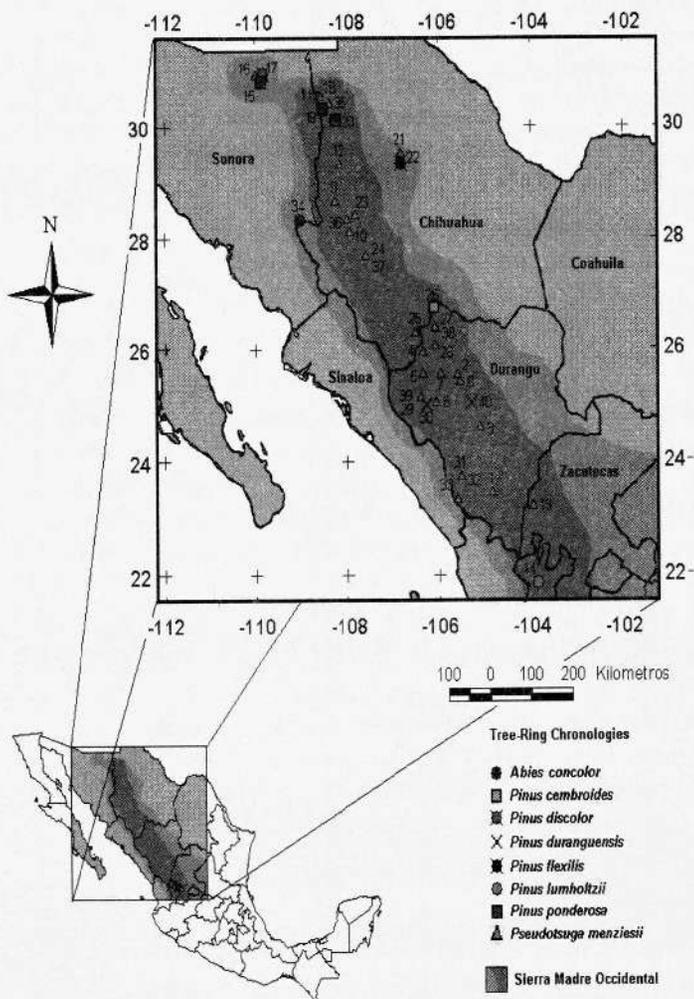


Figura 2. Distribución de cronologías de anillos de árboles en la Sierra Madre Occidental. Un gran número de estas cronologías se ubican en la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas circunvecinas. Estas cronologías constituyen un «proxy» de la disponibilidad de agua tanto para la Planicie Costera del Pacífico como para la Altiplanicie del Desierto Chihuahuense. Nuevas cronologías están en proceso de generación, particularmente en el parteaguas que drena hacia la planicie costera del Océano pacífico.

Cuadro 1. Ubicación geográfica, extensión y tipo de cronologías de anillos de árboles para la Sierra Madre Occidental y específicamente para la cuenca Nazas-Aguanaval.

Estado	Nombre del Sitio	Clave	Coordenadas	Longitud de la Cronología	Tipo de Cronología ¹	Especie ²
Durango	Bayas	BAY	23.453, 104.841; 2980 m	1681 - 2001	RW, EW	PM
	Ciénega de la Vaca	CVC	25.543, 105.592; 2800 m	1763 - 2002	RW, EW, LW	PM
	Cerro Bandera	BAN	24.609, 105.108; 3170 m	1675 - 2001	RW, EW, LW	PM
	El Cócono	COC	25.951, 106.356; 1950 m	1450 - 2002	RW, EW	PM
	Tarahumar	TAR	25.571, 106.341; 2580 m	1724 - 2003	RW, EW, LW	PM
	San Diego Tenzaenz	SDT	25.053, 106.074; 3039 m	1777 - 2004	RW, EW, LW	PM
	Pitorréela	PIT	25.559, 105.954; 2730 m	1693 - 2003	RW, EW, LW	PM
	San Andrés	AND	25.418, 105.538; 2790 m	1700 - 2004	RW, EW, LW	PM
	Nazas	NAZ	25.385, 103.738; 1100 m	1500 - 2004	RW	TM
	Chiqueros	CHI	26.186, 106.343; 2900 m	1418 - 2005	RW, EW, LW	PM
	Cerro Huehuento	CHU	24.076, 105.738; 2970 m	En proceso	RW, EW, LW	PM
	Chihuahua	Bisbalochi	BIS	28.657, 108.288; 2744 m	1472 - 2002	RW, EW
Cebadillas de Ocampo		CDO	28.122, 107.950; 2781 m	1588 - 2002	RW, EW, LW	PM
Mesa las Guacamayas		MDG	30.543, 108.619; 2665 m	1636 - 2002	RW, EW, LW	PM
Madera		MAD	29.308, 108.190; 2820 m	1774 - 2001	RW, EW, LW	PM
Coahuila	Mohinola	MOH	25.933, 107.011; 2950 m	1657 - 2005	RW, EW, LW	PM
	Jimulco	JIM	25.148, 103.224; 2840 m	1644 - 2002	RW	PC
Jalisco	Barrial de Guadalupe	BDG	25.990, 103.241; 1295 m	1834 - 2000	RW	TM
	Bolaños	BOL	21.875, 103.867; 2360 m	1783 - 2003	RW	PLU
Sonora	Sierra los Ajos	SLA	30.900, 109.950; 2400 m	1838 - 1992	RW	PM
	Bacadehuachi	BAC	29.9, 109.07; 2350 m	1739 - 1995	RW	PA
Zacatecas	Jiménez del Teul	JIM	23.210, 103.953; 2758 m	1758 - 2001	RW, EW, LW	PM

¹RW: Ancho de anillo total; EW: Madera temprana; LW: Madera tardía

²TM: *Taxodium mucronatum*; PM: *Pseudotsuga menziesii*; PC: *Pinus cembroides*; PLU: *Pinus lumholtzii*; PA: *Pinus arizonica*

Reconstrucciones de precipitación

En el norte de México el crecimiento de los árboles y en especial de las coníferas está influenciado por la precipitación que ocurre en el período invierno-primavera, es decir la estación fría del año. La lluvia que se presenta en este período generalmente es de baja intensidad, y gran parte de las veces no llega a sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo, por lo que un alto porcentaje de esta lluvia se considera efectiva y queda almacenada en la matriz del suelo para ser aprovechada durante la estación de crecimiento. En sitios más elevados de este sistema montañosa se presentan en el invierno nevadas continuas, a veces de alta intensidad, que de igual manera al derretirse contribuyen a incrementar la humedad disponible para el desarrollo de los árboles, especialmente en aquellas exposiciones norte o sitios con poca luminosidad. Una de las primeras reconstrucciones de precipitación estacional para Durango fue la desarrollada por Cleaveland *et al.*, (2003). Esta reconstrucción de precipitación invernal (noviembre-marzo) se extiende por 608 años (1386-1993). La reconstrucción indica la presencia de sequías severas en los períodos 1540-1579, 1857-1872 y 1950-1965. El período más húmedo en la reconstrucción se presentó de 1831 a 1856, período que también se reporta como el más húmedo en los últimos 500 años para el suroeste de los Estados Unidos de América (Fye *et al.*, 2003).

Algunas de estas sequías, específicamente la del período 1540-1579, conocida como «megasequía» (Stahle *et al.*, 2000), se ha relacionado con brotes epidémicos que diezmaron notablemente la población indígena del Valle de México, posterior a la colonización española (Acuña-Soto *et al.*, 2002; Therrell *et al.*, 2004, 2006). La sequía del período 1950-1965 fue la más intensa del siglo XX, e infligió severos daños socioeconómicos, no sólo a la población de Durango, si no también a diversos asentamientos humanos del norte y centro del país, donde esta sequía se presentó de manera simultánea, según lo hacen constar datos instrumentales, documentos históricos y reconstrucciones paleoclimáticas. Algunos de los períodos secos observados en esta reconstrucción, también fueron detectados en reconstrucciones de precipitación para Guanaceví, Durango (Figura 3) (Villanueva *et al.*, 2005).

La reconstrucción de precipitación invierno-primavera (octubre-mayo) para el noroeste de Chihuahua y este de Sonora, desarrollada con una cronología de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* del sitio Bisalochi, Chihuahua, tiene una extensión de 531 años (1472-2002) e indica la presencia de eventos secos similares a los detectados en Durango (Figura 4); aunque con una intensidad y duración menor, lo cual se atribuye a un período estacional mayor de lluvia reconstruida, ya que mientras para Durango se reconstruyó el período de precipitación acumulada noviembre-marzo, para la región Chihuahua-Sonora se reconstruyó el período octubre-mayo.

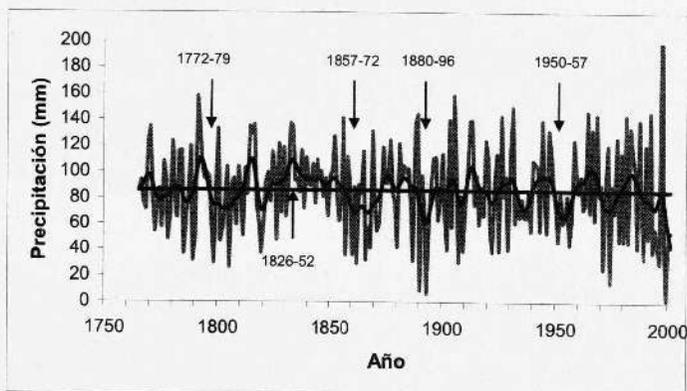


Figura 3. Precipitación reconstruida de las estaciones primavera-verano (noviembre-mayo), período de 1765 a 2001 en Guanaceví, Durango con el uso de nueve cronologías de madera temprana de *Pseudotsuga menziesii* procedentes de la Sierra Madre Occidental en los estados de Durango y Zacatecas. La curva flexible suavizada representa eventos de precipitación de baja frecuencia ocurridos a lo largo de la reconstrucción. Algunas sequías severas se observaron en los períodos 1772–1779, 1818–1822, 1857–1872, 1880–1896, 1950–1957 y 1988–2001; el período más húmedo se presentó de 1826 a 1852 (Villanueva *et al.*, 2005).

La importancia de esta reconstrucción estriba en que es la primera realizada para una región altamente productiva en aspectos agrícolas y pecuarios, cuyo desarrollo económico se sustenta en gran medida en el agua producida en la vertiente oeste de la Sierra Madre Occidental, que drena hacia la planicie costera del Océano Pacífico. Los períodos de sequía de mayor frecuencia e intensidad, que en las últimas décadas se han presentado en esta región, han afectado sobremanera la economía de esta zona, lo que ha obligado a la perforación y rehabilitación de pozos profundos para paliar el déficit de agua, aunque esta acción ha provocado abatimiento del acuífero y suscitado problemas de intrusión de agua salina y en general de deterioro de su calidad.

Para la cuenca baja del Nazas, una de las reconstrucciones más representativas de la variabilidad hidroclimática que caracteriza a esta región semiárida es una reconstrucción de precipitación estacional de verano, período julio-septiembre, con una cronología de anillo total de *Taxodium mucronatum* desarrollada con especímenes del bosque de galería distribuidos en el tramo de la presa «Francisco Zarco» y «Sapioriz» (Figura 5). Esta reconstrucción de más de 500 años de extensión (1500–2003) es de suma importancia para el análisis histórico de la precipitación de la parte baja de la cuenca Nazas-Aguanaval, que se caracteriza por poseer una precipitación anual inferior a 300 mm, donde más del 80 por ciento se presenta en los meses de verano. La

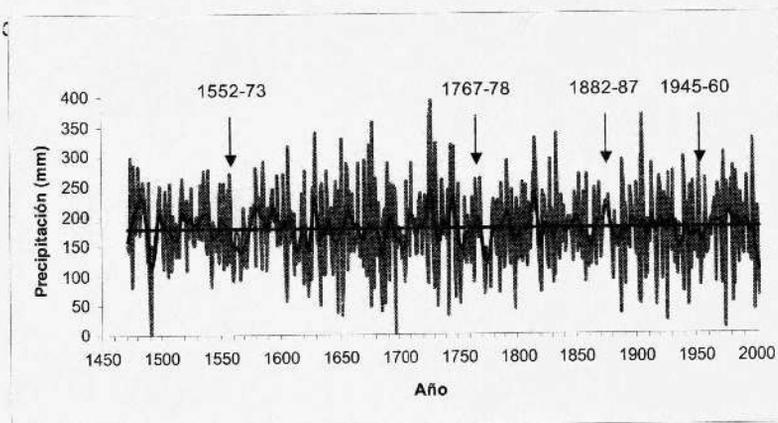


Figura 4. Precipitación estacional reconstruida invierno-primavera (octubre–mayo), período 1472-2002 para el noroeste de Chihuahua y este de Sonora, desarrollada con una cronología EW de *Pseudotsuga menziesii*, procedente del sitio Bisaloachi, Chihuahua, en la Sierra Madre Occidental. El promedio de precipitación para el período reconstruido es de 143.2 mm y una desviación estándar de 52.4 mm. En los 550 años de la reconstrucción se observan sequías recurrentes como las acontecidas en los períodos 1488-496, 1552-1573, 1611-1626, 1767-1778, 1882-1887, 1945-1960 y 1993-2002; así como períodos húmedos presentes en 1477-1486, 1590-1598, 1649-1661, 1736-1750, 1820-1824, 1873-1878, 1940-1944 y 1972-1979. La línea gruesa es una curva decenal flexible, que enfatiza eventos a nivel década (Villanueva et al., en prensa).

precipitación que se presenta en esta área de la cuenca es insignificante; no obstante lo anterior, esta precipitación contribuye en gran medida a mejorar la productividad de los ecosistemas semiáridos como son los pastizales y matorrales semidesérticos, donde se desarrollan actividades pecuarias y de aprovechamiento de algunas plantas como mezquite, orégano, candelilla, lechuguilla, entre otras.

Para la parte media-baja de la cuenca del río Aguanaval se desarrolló una reconstrucción estacional de precipitación (septiembre-abril) para el período 1641-2002 (362 años) con el ancho total de anillos de pino piñonero (*Pinus cembroides*), colectados en la parte alta de la Sierra de Jimulco (Figura 6). En esta región, los árboles de piñonero, no obstante ubicarse en elevaciones cercanas a los 3,000 m, constituyen un «proxy» adecuado de la precipitación que ocurre en altitudes inferiores (<1200 m) como las que caracterizan a la parte media y baja del río Aguanaval, al explicar más del 50 por ciento de la variabilidad en precipitación observada en esta región. Sin embargo, es importante señalar que los árboles de piñonero en las condiciones ecológicas donde se desarrollan registran con mayor fidelidad aquellos años o períodos secos en que la precipitación constituye realmente un factor limitante para su crecimiento. Por otra parte, los árboles modulan con

menor fidelidad aquellos eventos de precipitación extremos, donde gran parte de la precipitación se pierde como escorrentía, ya sea porque la precipitación rebasa la tasa de infiltración básica o bien después de haberse saturado la capacidad de almacenamiento del suelo, así como por presentarse en periodos donde la especie no está fisiológicamente activa (dormancia), donde eventos de alta precipitación que producen grandes escurrimientos pasan desapercibidos para el desarrollo de la especie (Fritts, 1976).

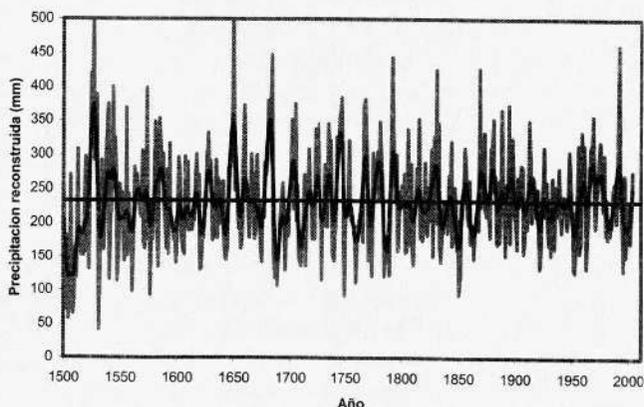


Figura 5. Precipitación estacional reconstruida de verano (julio-septiembre), período 1500-2003 para la parte baja de la cuenca Nazas-Aguanaval, desarrollada con una cronología de anillo total de *Taxodium mucronatum*, procedente del río Nazas en su tramo presa Francisco Zarco-Sapioz, Durango. Sequías recurrentes entre periodos cortos y extensos se presentaron a lo largo de la reconstrucción, es decir, 1509-1520, 1548-1559, 1621-1622, 1684-1691, 1758-1763, 1784-1789, 1809-1811, 1846-1849, 1860-1865, 1922-1923, 1949-1956, 1962-1963, 1981-1985 y 1995-2000. Episodios húmedos se observan para los periodos 1524-1528, 1647-1651, 1679-1685. 1700-1703, 1740-1750, 1871-1880, 1966-1970 y 1988-1992; además, se presentaron años individuales donde la precipitación superó en más del 100 por ciento a la media reconstruida, caso específico los años de 1526, 1649, 1791, 1830 y 1991 (Villanueva *et al.*, en prensa).

La reconstrucción indica periodos de baja frecuencia en los que la precipitación estacional fue inferior a la media (156 mm), caso concreto son los periodos de 1658-1668 (11 años), en el que sólo un año (1667) indicó precipitación superior a la media; 1698-1705 (8 años), 1761-1765 (5 años), 1772-1775 (4 años), 1785-1790 (seis años), 1803-1813 (11 años), 1819-1823 (cinco años), 1860-1863 (cuatro años), 1890-1899 (10 años), 1908-1910 (tres años), 1916-1918 (tres años), 1946-1957 (12 años), donde los años de 1949 y 1952 tuvieron precipitación superior a la media; 1971-1976 (cinco años) y 1998-2002 (cinco años) (Cuadro 2). Los periodos húmedos fueron menos frecuentes y se presentaron en los años 1655-1657 (tres años), 1743-1747 (cinco años), 1756-1760 (cinco años), 1786-1791 (seis años), 1833-1837 (cinco

años), 1844-1848 (5 años), 1958-1961 (cuatro años), 1964-1971 (siete años) y 1981-1987 (siete años).

Muchos de los periodos secos se han detectado simultáneamente en reconstrucciones de precipitación para el norte de México y específicamente para reconstrucciones con anillos de árboles en las Sierras Madre Oriental y Occidental. De esta manera, los periodos secos de las décadas de 1660, 1690, 1790, 1810, 1860, 1890, 1920, 1950, 1970 y 1990, se encuentran presentes en reconstrucciones para Saltillo, Nuevo León y Tamaulipas en el noreste de México (Pohl *et al.*, 2003; Cerano, 2004; Villanueva *et al.*, 2005; Villanueva *et al.* 2007) y episodios muy secos como el de las décadas de 1660, 1760, 1860 y 1950 también se encuentran presentes en reconstrucciones para el norte y noroeste de México (Díaz *et al.*, 2002; Cleaveland *et al.*, 2003; González-Elizondo *et al.*, 2005; Villanueva *et al.*, 2005).

La intensidad de estas sequías comunes ha variado de región en región acorde a las características fisiográficas de cada localidad, distanciamiento al océano, patrones circulatorios dominantes, etc. Sin embargo, es evidente que estas sequías de impacto generalizado han estado influenciadas de manera común por patrones circulatorios de gran magnitud, caso específico El Niño Oscilación del Sur (ENSO, siglas en Inglés), Monzón de Norteamérica o Monzón Mexicano (NAMS, siglas en Inglés), entre otros (Stahle *et al.*, 1998; Magaña *et al.*, 1999; Cleaveland *et al.*, 2003). Es importante sin embargo, analizar a detalle la extensión de estas sequías y los probables mecanismos circulatorios que les dieron origen; de esta manera, será posible explicar los eventos de baja frecuencia que se han presentado de manera rutinaria cada 50 ó 100 años en el norte-centro de México y contar con los elementos técnicos para modelar posibles escenarios futuros del clima en esta región (Endfield, 2006), lo que es de gran valía para la planeación del aprovechamiento adecuado de los limitados recursos hídricos con que cuenta esta región.

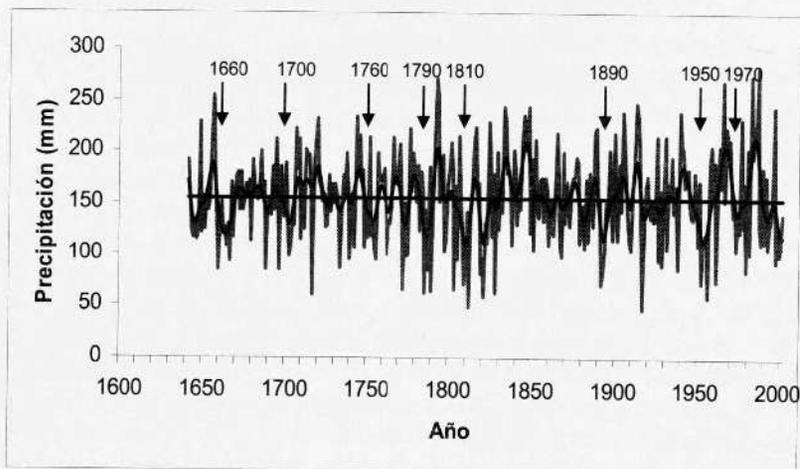


Figura 6. Precipitación estacional reconstruida (septiembre–abril) del período 1641–2002 para la sección media-baja del río Aguanaval. La reconstrucción indica alta variabilidad climática a lo largo de 362 años de la serie de tiempo reconstruida. Una curva flexible (línea sólida oscura) se ha insertado a la reconstrucción estacional (línea sólida tenue) para resaltar eventos de baja frecuencia. La reconstrucción indica sequías severas en los periodos de 1658-1668, 1698-1705, 1761-1765, 1772-1775, 1785-1790, 1803-1813, 1819-1823, 1860-1863, 1890-1899, 1908-1910, 1916-1918, 1946-1957, 1971-1976 y 1998-2002. Un período húmedo se presentó de 1833 a 1837, aunque continuó prácticamente hasta 1850 (Villanueva et al., en prensa).

Cuadro 2. Períodos mayores de tres años en los que la precipitación reconstruida para la sección media-baja del río Aguanaval fue inferior a la media (156 mm) de la reconstrucción estacional.

Período	Período seco		Número de años
	Promedio (mm)	Desviación Estándar (mm)	
1658-1668	124	25	11
1698-1705	135	27	8
1761-1765	132	21	5
1772-1775	103	34	4
1785-1790	113	51	6
1803-1813	118	52	11
1819-1823	96	27	5
1860-1863	127	20	4
1890-1899	131	40	10
1908-1910	117	16	3
1916-1918	100	45	3
1946-1957	127	36	12
1972-1976	132	20	5
1998-2002	113	19	5

Comportamiento de eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones de precipitación analizadas

Al comparar para un mismo período las tendencias de baja frecuencia (10 años) para las diversas reconstrucciones desarrolladas, se observa la presencia de eventos comunes, lo cual es indicativo de que patrones circulatorios de gran magnitud han impactado históricamente y de manera similar una amplia zona del país (Figura 7). De esta manera, se observan sequías comunes para estas reconstrucciones en las décadas de 1780, 1810, 1860, 1950 y al final de 1990. En el siglo XX, la sequía de mayor intensidad se presentó en la década de 1950, lo cual se ha verificado tanto con datos instrumentales como con documentos históricos y reconstrucciones paleoclimáticas. Los diversos períodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones existentes con cronologías de anillos de árboles en la Sierra Madre Occidental, muestran períodos semejantes para un alto porcentaje de ellas, particularmente aquellas de alta intensidad; las discrepancias entre reconstrucciones para una región específica son producto de condiciones microclimáticas locales, influenciadas por aspectos fisiográficos, continentalidad y aspectos topográficos (Cuadro 3).

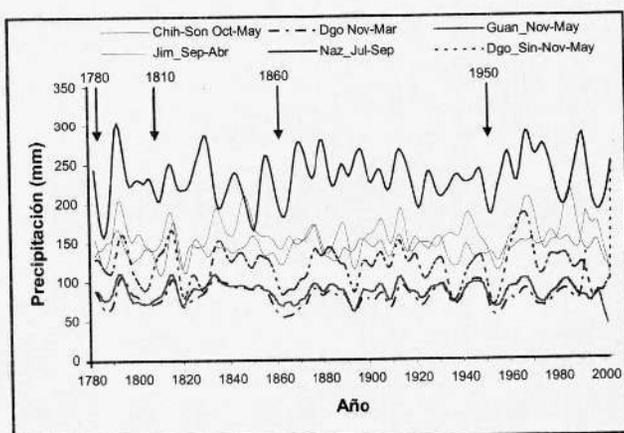


Figura 7. Comportamiento de las líneas flexibles decenales que resaltan eventos de baja frecuencia para las reconstrucciones estacionales de precipitación en la Sierra Madre Occidental. Se observa que las reconstrucciones más relacionadas fueron las que se desarrollaron para Durango (Dgo Nov-Mar), Guanaceví (Guan_Nov-May) y región de Durango y Sinaloa (Dgo_Sin-Nov-May) con correlaciones de 0.81, 0.77 y 0.61, $p < 0.01$, respectivamente). La correlación entre las reconstrucciones de Guanaceví (Guan_Nov-May) y de la parte media-baja del río Aguanaval (Jim_Sep_Abr) tuvieron una correlación de 0.65, no obstante que el período reconstruido fue diferente; lo cual indica que la lluvia en esta región esta influenciada por patrones circulatorios comunes. Diversos períodos de sequía fueron similares para las reconstrucciones realizadas caso concreto las sequías de las décadas de 1780, 1810, 1860, 1890, 1910, 1920, 1950, 1970 y últimos años del siglo XX.

Cuadro 3. Periodos secos y húmedos detectados en las reconstrucciones estacionales de precipitación para la Región Hidrológica 36 en la Sierra Madre Occidental.

Sitio Reconstruido	Periodo	Estación reconstruida	Periodos secos	Periodos húmedos	Fuente
Durango	1386-1993	noviembre-marzo	1540-79, 1857-72, 1950-65	1831-56	Cleaveland et al., 2003
Guanaceví, Dgo.	1765-2001	noviembre-mayo	1772-79, 1818-27, 1857-72, 1880-96, 1950-57, 1988-2001	1826-52	Villanueva et al., 2005
NE Chihuahua-Sonora	1472-2002	octubre-mayo	1488-96, 1552-73, 1611-26, 1767-78, 1882-87, 1945-60, 1993-2002	1477-86, 1590-98, 1649-61, 1736-50, 1820-24, 1873-78, 1940-44, 1972-79	Villanueva et al., en publicación
NW México (Dgo., Chih., Sin.)	1449-2002	Noviembre-mayo	1493-1528, 1560-75, 1542-57, 1620-30, 1645-61, 1698-1725, 1727-49, 1750-68, 1798-1807, 1818-30, 1859-73, 1947-57, 1993-2002	1542-57, 1645-61, 1727-49, 1833-45, 1958-69	Villanueva et al., datos no publicados

Continúa...

...Continúa

Nazas, Dgo.	1500-2003	julio-septiembre	1509-20, 1548-59, 1524-28, 1647-51, 1679-85, 1740-50, 1871-80, 1966-70, 1988-92	Villanueva <i>et al.</i> , en publicación
			1684-91, 1758-63, 1784-89, 1809-11, 1860-65, 1949-56, 1981-85, 1995-2000	
Aguanaval, Dgo	1641-2002	septiembre-abril	1658-68, 1698-705, 1761-65, 1772-75, 1785-90, 1803-13, 1819-23, 1860-63, 1890-99, 1908-10, 1946-57, 1971-76, 1998-2002	Villanueva <i>et al.</i> , en publicación
			1833-37	
			1751-65, 1798-1810, 1952-57	
			1696-1709, 1739-43, 1749-55, 1772-79, 1797-1805, 1857-76, 1907-10, 1916-22, 1932-39, 1969-2001	
			1790s, 1830s, 1905-32	
Chihuahua	1647-1992	noviembre-abril		Diaz <i>et al.</i> , 2002
Sur de Dgo.	1681-2001	noviembre-mayo	1831-47, 1953-68, 1983-85	González-Elizondo <i>et al.</i> , 2005

Reconstrucciones de flujo

La información disponible relacionada con el comportamiento histórico de gastos de agua es muy limitada en México. Muchos de los datos hidrométricos instrumentales son de corta duración, con datos faltantes y algunas veces de calidad dudosa. En la cuenca Nazas-Aguanaval, las series de tiempo hidrométricas generalmente no se extienden más allá de 50 años; no obstante lo anterior, el diseño de estructuras hidráulicas y la planeación y manejo de los recursos hídricos se fundamenta en estas series cortas de información, lo cual conlleva en la mayoría de los casos a un inadecuado uso de los recursos hídricos.

Para la cuenca Nazas-Aguanaval el INIFAP CENID-RASPA ha generado tres reconstrucciones de flujo que amalgaman la variabilidad hidroclimática que caracteriza a superficies específicas de la cuenca; así por ejemplo, la reconstrucción de flujo para la parte alta del Nazas con una vegetación de bosque mixto describe el comportamiento estacional histórico del flujo en la estación hidrométrica «Sardinas» para el período 1765–2002 (Figura 8), la cual es representativa del gasto producido en casi 4,700 km² de superficie de esta cuenca, área que se caracteriza por poseer la producción de escurrimiento más alta (2.45 L s⁻¹ m⁻²) de la cuenca Nazas-Aguanaval, lo que justifica la importancia de esta reconstrucción.

Los períodos secos se definieron cuando el flujo reconstruido fue inferior al promedio (271.05 x 10⁶ m³). En el siglo XX estas sequías se presentaron en las décadas de 1900, 1930, 1950 y 1990; sin embargo, en un período de sequía prolongado no todos los años se presentan con gasto escaso, así, en la sequía de 1918 a 1937, se reconstruyeron siete años con flujo elevado, y se indica que para estos años en la Comarca Lagunera se cultivó una superficie promedio anual de 135 mil ha (Chaírez y Palerm, 2004). La sequía más prolongada en el período reconstruido se presentó de 1850 a 1870, cuando 18 años promediaron 215.6 x 10⁶ m³, gasto que es 21.5% inferior al gasto medio reconstruido. Se presentaron gastos bajos también en la décadas de 1770, 1780 y al final de 1790 a 1800. Períodos de flujo alto se presentaron en las décadas de 1920, 1940 y 1980, pero el período más húmedo fue de 1831 a 1846, en el que 13 de 16 años mostraron un gasto de 28.5 por ciento superior al promedio (Cuadro 4).

El análisis de poder espectral indica que el flujo reconstruido captura la señal del Niño Oscilación del Sur en frecuencias de 3.2 y 3.7 años; asimismo se observan diferencias para eventos «El Niño», «La Niña» y años «normales». Periodicidades similares se han reportado para el norte y noroeste de México (Stahle *et al.*, 1998; Brito-Castillo *et al.*, 2003; Villanueva *et al.*, 2005).

Para fines de toma de decisiones en el manejo de los gastos de agua en la Comarca Lagunera y en otras áreas agrícolas de la planicie costera del pacífico, ésta debería fundamentarse en los flujos observados en años considerados como

«normales» y descartar aquellos con influencia del efecto del Niño, ya que este fenómeno circulatorio distorsiona el flujo promedio al incrementar o disminuir la precipitación para un año o para un período de dos o más años. De esta manera el flujo observado en el período 1950–1993, fue casi el doble del observado en los años «normales» y triplicó aquel de los años con la influencia de la «Niña» (Cuadro 5).

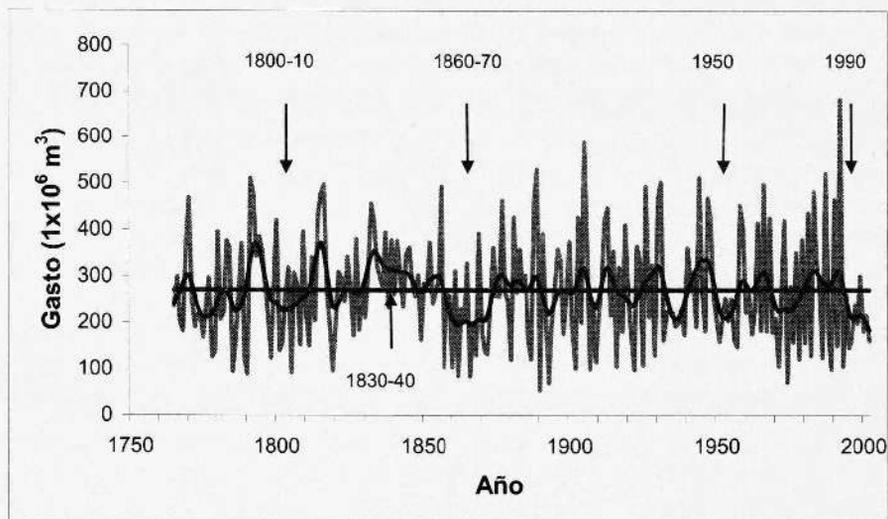


Figura 8. Flujo estacional reconstruido de septiembre del año previo a junio del año actual para el período 1765 a 2002 para la estación hidrométrica Sardinias. La línea decenal flexible enfatiza eventos de baja frecuencia como las sequías detectadas en los períodos de 1800-1810, 1860-1870, 1950 y 1990; un período húmedo se presentó en las décadas de 1830 y 1840, este último también presente en el norte de México y centro y sur de los Estados Unidos de América.

**Cuadro 4. Periodos con flujo inferior y superior al promedio de flujo reconstruido
($271.05 \times 10^6 \text{ m}^3$) para la estación hidrométrica Sardinias.**

Periodo	Promedio anual ¹ ($\text{m}^3 \times 10^6$)	Número de años	Periodo	Promedio anual ¹ ($\text{m}^3 \times 10^6$)	Número de años
Abajo del promedio					
1857-1874	208.4	18	Arriba del promedio		
1797-1811	233.8	15	1831-1846	328.5	16
1970-1978	220.0	9	1981-1987	328.0	7
1994-2002	207.4	9	1791-1796	392.7	6
1772-1779	200.1	8	1812-1816	391.2	5
1950-1957	199.9	8	1944-1948	373.6	5
1933-1939	208.9	7	1903-1906	393.2	4
1785-1789	200.8	5	1912-1915	359.9	4
1892-1895	187.4	4	1928-1931	355.8	4
1907-1910	168.0	4			

¹Promedio de años individuales

Cuadro 5. Estadísticas descriptivas del efecto del Niño en la precipitación y flujo para el periodo de registros climáticos instrumentales y reconstruidos de 1950 a 1993. Existe una similitud significativa entre los registros instrumentales y los datos reconstruidos.

Evento climático 1950-1993	Años	Estadísticas Descriptivas			
		Media	Mediana	Máximo	Mínimo
Precipitación medida (instrumental)					
Años con Fase Cálida "El Niño"	7	139	118	307	72
Años con Fase Fría "La Niña"	7	50	34	108	13
Años "Normales"	30	77	73	166	26
Precipitación reconstruida					
Años con Fase Cálida "El Niño"	7	126	124	146	82
Años con Fase Fría "La Niña"	7	51	44	82	15
Años "Normales"	30	78	76	146	34
Flujo reconstruido					
Años con Fase Cálida "El Niño"	7	462	482	684	178
Años con Fase Fría "La Niña"	7	159	158	250	71
Años "Normales"	30	244	208	465	99

En la cuenca Nazas-Aguanaval una de las reconstrucciones importantes de flujo es la desarrollada para la sección media-baja del río Aguanaval. Esta reconstrucción, realmente representa el flujo base de la subcuenca La Flor y no el flujo total registrado en la estación hidrométrica del mismo nombre (sin considerar el volumen derivado al Canal Sombrerete), que supera en promedio los $120 \times 10^6 \text{ m}^3$ anuales y que está constituido en gran parte por el escurrimiento superficial (aguas brancas) de eventos de alta intensidad que se presentan en los meses de verano (junio–octubre), y a los cuales las especies arbóreas utilizadas en esta reconstrucción no fueron climáticamente sensitivas. La reconstrucción de flujo indica variabilidad de alta y baja frecuencia en el tiempo, es decir, la presencia frecuente de años húmedos y secos y períodos continuos de sequía que se extienden hasta por más de 10 años (Figura 9). En esta región de la parte baja del río Aguanaval, eventos secos de tres o más años consecutivos de extensión, con flujo inferior al histórico promedio reconstruido ($23.4 \times 10^6 \text{ m}^3$) se presentaron en los períodos 1840-1843 (tres años), 1853-1855 (tres años), 1873-1884 (12 años), 1904-1911 (ocho años), 1921-1923 (tres años), 1953-1958 (seis años), aunque en este período los años de 1955, 1956 y 1958, mostraron flujo ligeramente superior al promedio y el último período seco se presentó de 1993 al 2000 (ocho años).

En la cuenca del río Aguanaval existe poca información histórica documentada de las sequías o de grandes avenidas que afectaron esta región. Los registros instrumentales indican que períodos de sequía se presentaron de 1948 a 1954 y de 1960 a 1964, con fuertes crecientes en los años de 1953, 1970, 1973, 1976, 1996 y 1998 (CONAGUA, 1999). Los períodos secos reportados coinciden en gran parte con los datos reconstruidos, no así los años con fuertes crecientes, lo cual es indicativo de que dicho flujo pudo haber estado compuesto en alto porcentaje por escurrimiento superficial y ocurrido en un corto período de tiempo.

La variabilidad histórica de flujos de agua reconstruidos en el norte de México es difícil de comparar, ya que actualmente esta información es prácticamente inexistente y sólo se tiene conocimiento de dos reconstrucciones de este tipo, una para la cuenca continental del Golfo de California (Brito-Castillo *et al.*, 2003) y otra más para la parte forestada de la cuenca del Nazas (Villanueva *et al.*, 2005). No obstante lo anterior, es interesante observar en estas reconstrucciones la presencia común de flujos inferiores al promedio para períodos específicos de tiempo, caso concreto las décadas de 1860, 1900, 1920 y 1950. La década de 1990 sólo se encuentra presente en la actual reconstrucción, pero los datos hidrométricos instrumentales utilizados para realizar las otras reconstrucciones corroboran la presencia de gastos inferiores al promedio (Figura 10). La información anterior, es una prueba fehaciente de la sensibilidad y potencial que tienen algunas series dendrocronológicas para captar la variabilidad climática mediante un elemento integrador que es el flujo de agua, elemento que realmente constituye la variable

más importante para la planeación y manejo de este recurso con fines agropecuarios en una cuenca hidrológica específica como es la que alimenta al río Aguanaval.

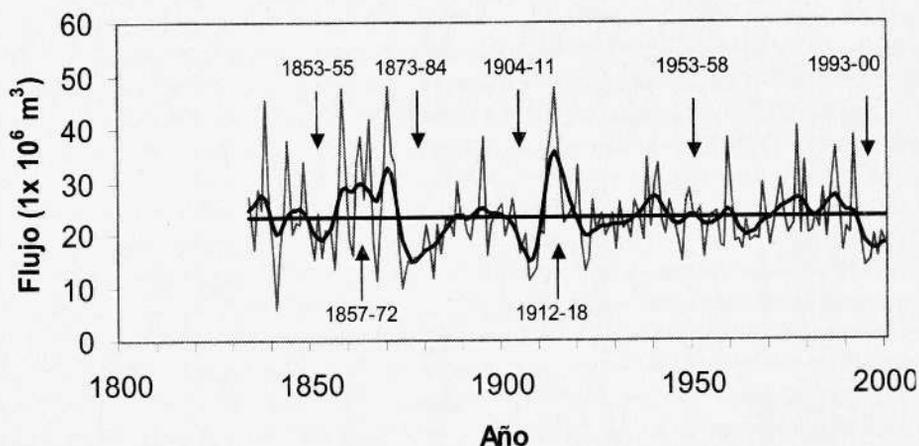


Figura 9. Flujo anual reconstruido (julio-junio) del período 1834–2000 para la sección media-baja del río Aguanaval. La reconstrucción indica alta variabilidad climática en 167 años de la serie de tiempo reconstruida. Una curva flexible (línea sólida oscura) se ha insertado a la reconstrucción (línea sólida tenue) para resaltar eventos de baja frecuencia. En esta región se presentaron eventos secos de tres o más años consecutivos en los períodos 1840-1843, 1853-1855, 1873-1884, 1904-1911, 1921-1923, 1953-1958 y 1993-2000. Se detectaron períodos húmedos de 1857 a 1872 y de 1912 a 1918. El flujo reconstruido es básicamente el flujo base de la subcuenca La Flor, ya que los árboles no captan eventos extremos de alto escurrimiento producidos en los meses de verano.

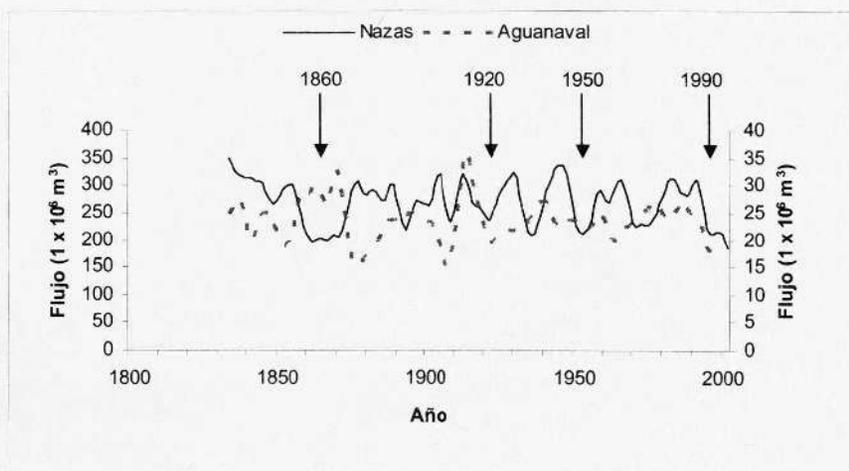


Figura 10. Comparación del flujo estacional reconstruido para los ríos Nazas y Aguanaval. La correlación observada entre ambas reconstrucciones no es significativa ($r = 0.17$, $p = 0.03$) debido a que uno constituye el flujo estacional reconstruido para la estación hidrométrica Sardinias en la cuenca alta del río Nazas y el otro representa el flujo base para la sección media-baja del río Aguanaval. No obstante lo anterior, ambas reconstrucciones muestran gastos mínimos en períodos donde se han detectado sequías regionales como en las décadas de 1860, 1900, 1920 y 1950.

CONCLUSIONES

El entendimiento de la variabilidad hidroclimática es fundamental para el manejo del agua, especialmente en una región sujeta a extrema presión social por los recursos hídricos disponibles. Las cronologías de anillos de árboles son los «proxys» de resolución anual más confiables para extender en el tiempo la información climatológica, ya que los registros instrumentales (precipitación y datos hidrométricos), como es en el caso de la Comarca Lagunera no se extienden más allá de los últimos 60 años. La integración de una red de cronologías de árboles en la cuenca Nazas-Aguanaval y cuencas circunvecinas es un proceso dinámico, y es básico para generar una perspectiva histórica del clima, entender el presente y tener herramientas técnicas para analizar escenarios climáticos venideros y su impacto potencial en la disponibilidad de los recursos hídricos para diversos fines. Actualmente el INIFAP ha desarrollado 20 cronologías de anillos de árboles en esta región y algunas otras que se encuentran en proceso de desarrollo; no obstante lo anterior, esta tarea apenas inicia, ya que para un entendimiento detallado del impacto histórico del clima y de los patrones circulatorios que lo afectan es imperante ampliar esta red de cronologías y analizar el potencial de nuevas especies que detecten

la influencia de la precipitación tanto de invierno como de verano, y con ello cuantificar el impacto de patrones circulatorios como el Niño Oscilación del Sur, Sistema del Monzón de Norteamérica, tormentas tropicales, lluvias convectivas, etc.

La reconstrucción dendroclimática de la cuenca Nazas-Aguanaval constituye una primera aproximación para el entendimiento histórico de la variabilidad hidroclimática que ha caracterizado a esta región en los últimos 600 años. Las sequías son un fenómeno recurrente que afectan de manera frecuente no sólo la cuenca Nazas-Aguanaval, si no también de manera simultánea otras cuencas del norte de México; esto se corrobora con la presencia de sequías comunes de alta intensidad y duración que afectaron igualmente desde el centro hasta el norte de México e inclusive centro y sur de los Estados Unidos de América. Así, en los últimos seis siglos estas sequías se han presentado hasta por periodos consecutivos de más de 40 años.

El volumen de flujo que drena hacia los tributarios que alimentan los ríos Nazas y Aguanaval está relacionado significativamente con la precipitación; las reconstrucciones sin embargo, indican que en los últimos años esta relación ha decrecido, lo cual puede atribuirse a cambios en el uso del suelo, situación que probablemente ha incrementado el flujo superficial en detrimento del flujo base; este último de mayor importancia en el sostenimiento de una vegetación de galería del cauce de estos ríos, donde se produce la recarga del manto freático. La construcción de más obras hidráulicas en áreas rivereñas pueden ser detrimental en términos de alterar la recarga del manto freático, impactar la biodiversidad y afectar sistemas productivos aguas abajo que dependen del agua producida en partes superiores de la cuenca.

El análisis histórico hidroclimático no debe fundamentarse en el aspecto puramente técnico, si no que debe involucrar aspectos sociales y económicos. El entendimiento de la variabilidad hidroclimática a nivel de resolución anual y multianual es importante para planear un manejo sustentable a corto y mediano plazo de los recursos hídricos con que cuenta la Comarca Lagunera y otras áreas consumidoras del agua que dependen de los recursos hídricos producidos en regiones hidrológicas enclavadas en la Sierra Madre Occidental.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado con recursos de los proyectos «Documentación, entendimiento y proyección de los cambios en el ciclo hidrológico en la cordillera Americana» proyecto No. CRNII-047 con fondos del Instituto Interamericano para el Cambio Climático (IAI, siglas en inglés) y proyecto «Bosques centenarios del centro-norte de México y su potencial para estudios dendroclimáticos y ecológicos», proyecto No.2002/5037 de los fondos sectoriales CONACYT-CONAFOR.

LITERATURA CITADA

- Acuña-Soto, R., D. W. Stahle, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell. 2002. Megadrought and megadeath in 16th century Mexico. *Emerging Infectious Diseases* 8(4): 360 – 362.
- Brito-Castillo, L., S. Diaz-Castro, C. A. Salinas-Zavala, A. V. Douglas. 2003. Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Journal of hydrology* 278: 39-50.
- Cerano, P. J. 2004. Reconstrucción de 350 años de precipitación invierno-primavera para Saltillo, Coahuila. Tesis Profesional. Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. 152 pp.
- Cleaveland, M. K., D. W. Stahle, M. D. Therrell, J. Villanueva-Diaz, J., B. T. Burns. 2003. Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, Mexico, *Climatic change* 59: 369-388.
- Cháirez A. C. y C. J. Palerm Veira. 2004. El entarquinamiento: el caso de la Comarca Lagunera. *Boletín del archivo histórico del agua* 9: 85- 97.
- _____. 2005. Importancia del río Aguanaval en la recarga del acuífero principal de la región lagunera de Coahuila y Durango. *Boletín del archivo histórico del agua* 10 (29): 5-20.
- Comisión Nacional del Agua. 1999. Acciones para la consolidación del consejo de cuenca Nazas-Aguanaval: Síntesis de la problemática, escenarios y lineamientos para el desarrollo hidráulico de la Región Hidrológica 36 Nazas-Aguanaval, Torreón, Coahuila. 121 pp.
- Cook, E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-ring bulletin* 47: 37-59.
- _____. K. Peters. 1981. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring bulletin* 41: 45-53.
- Descroix, L., J. Estrada A., C. Bouvier. 1993. Hidrometría. En: Loyer J. Y., Estrada A. J., Jasso I., R. y Moreno D., L. (editores). Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID-RASPA; ORSTOM, DEC. Gómez Palacio, Durango, México. Pp. 63-117.
- Descroix, L., J. F. Nouvelot, J. Estrada A. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: regionalización de las precipitaciones en la

región hidrológica 36. Folleto Científico No. 8. INIFAP CENID-RASPA; ORSTOM. Gómez Palacio, Durango, México. 52 pp.

_____. 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: 114-130.

Díaz, S., M. D. Therrell, D. W. Stahle, M. K. Cleaveland. 2002. Chihuahua winter-spring precipitation reconstructed from tree-rings, 1647-1992. *Climate research* 22 (3): 237-244.

Estrada A., J., C. Bouvier, L. Descroix. 1993. Régimen pluviométrico. En: Loyer JY, Estrada-Avalos J, Jasso-Ibarra R, Moreno-Díaz L, editores. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID-RASPA; ORSTOM, DEC. Gómez Palacio, Durango, México. Pp. 25-61.

Endfield, G. H., I. Fernández Tejedo. 2006. Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change* 75: 391-419.

Estrada-Avalos J. 1995. Modelisation conceptuelle appliquee aux bassins versants du nord Mexique (RH 36). DEA National D'Hydrologie. Universite de Montpellier II. Montpellier, France.

Fritts, H.C. 1976. Tree-rings and climate, Academic Press, New York. 567 pp.

_____. 1991. Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data, University of Arizona Press, Tucson, AZ. 286 pp.

Fye F. K., D. W. Stahle, E. R. Cook. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 84(7): 901-909.

González-Elizondo, M., E. Jurado, J. Navar, M. S. González-Elizondo, J. Villanueva, O. Aguirre, J. Jiménez. 2005. Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681-2001 rain reconstruction, *Forest ecology and management* 213: 39-53.

Grissino-Mayer, H. D. 2001. Evaluating crossdating, accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research* 57 (2): 205-221.

Holmes, R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin* 43: 69-78.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1997. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Período 1921–1994. Software. Jiutepec, Morelos, México.
- Loyer, J. Y., S. Moriaud. 1996. Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID–RASPA; ORSTON, DEC. Folleto Científico No. 6. Gómez Palacio, Durango. 117 pp.
- Magaña, V., J. L. Pérez, J. L. Vázquez, E. Carrizosa, J. Pérez. 1999. El Niño y el clima. En Magaña, V. (editor), Los impactos de El Niño en México. SEP-CONACYT. Mexico. Pp. 23-68.
- Pohl, K., M. D. Therrell, J. S. Blay, N. Ayotte, J. G. Cabrera-Hernandez, S. Diaz-Castro, S., E. Comejo-Oviedo, J. A. Elvir, M. Gonzalez-Elizondo, D. Opland, J. Park, G. Pederson, S. Bernal-Salazar, L. Vasquez-Selem, J. Villanueva-Diaz, D. W. Stahle. 2003. A cool season precipitation reconstruction for Saltillo, Mexico, *Tree-ring research* 59 (1): 11-19.
- Stahle, D. W., R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, M. K. Cleaveland, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Therrell, D. A. Guy, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, B. T., J. Villanueva-Diaz, L. G. Thompson. 1998. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American meteorological society* 70 (10): 2137-2152.
- _____. E. R. Cook, M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, D. M. Meko, H. D. Grissino-Mayer, E. Watson, B. H. Luckman. 2000. Tree-ring data document 16th century megadrought over North América. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 81(12): 121–125.
- Stokes, M. A., T. L. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating, The University of Chicago. 73 pp.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle, R. Acuña-Soto. 2004. Aztec drought and the curse of one rabbit. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85 (9): 1263–1272.
- _____. J. Villanueva D., E. Comejo O., M. K. Cleaveland. 2006. Tree-ring reconstructed maize yield in central Mexico: 1474-2001. *Climatic Change* 74: 493-504.
- Villanueva, D. J., B. H. Luckman, D. W. Stahle, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland, J. Cerano-Paredes, G. Gutierrez-García, J. Estrada-Avalos, R. Jasso-Ibarra. 2005. Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera. *Dendrocronología* 22 (3): 215-223.

____ D.W. Stahle, B. H. Luckman, J. Cerano-Paredes, M. D. Therrell, M. K. Cleaveland. 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change* 83: 117–131.

Capítulo IX

Análisis de la interacción Biósfera-Atmósfera en las zonas áridas y semiáridas: teledetección espacial y problemática de escala

Dr. Ghani Chehbouni A.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	146
Síntesis	148
Flujos de la interface suelo-vegetación-atmósfera a escala local.	148
Esquemas de superficie y distribución de la vegetación en el seno de la superficie	149
Infrarrojo térmico y flujos conectivos	151
Acoplamiento SVAT-funcionamiento de la vegetación	154
Acoplamiento entre las dimensiones horizontal y vertical del ciclo del agua	157
Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala regional y problema de heterogeneidad espacial: agregación y desagregación	159
Uso de la teledetección espacial: inversión, asimilación	163
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	165
LITERATURA CITADA	168

INTRODUCCIÓN

La amenaza de una modificación del medio terrestre, potencialmente vinculada con las actividades humanas, preocupa cada día más a las comunidades científicas internacionales. Los retos son evidentemente mayores; rebasan ampliamente el marco estrictamente ecológico y se refieren tanto a las actividades económicas como a las consecuencias sociales a corto, mediano y largo plazo. Los estudios relacionados con el comportamiento de los ecosistemas terrestres, sus posibles modificaciones y sus adecuaciones a los cambios climáticos, así como los efectos de estas modificaciones en las condiciones climáticas ocupan un lugar central en las preocupaciones de los científicos y de los dirigentes.

La dinámica del clima y la de la biósfera continental evolucionan de manera conjunta, a través de procesos físicos que rigen los flujos de energía, agua y carbono. La vegetación juega un papel importante en la regulación de los intercambios de agua entre la superficie y la atmósfera. Por consiguiente, una modificación de la ocupación del suelo afecta al clima, por lo menos a escala regional. Además, una modificación del clima (características espaciotemporales de las temperaturas, precipitaciones y eventos climáticos extremos) es capaz de afectar la estructura y la distribución de la vegetación en la superficie del globo, al cambiar el equilibrio biogeoquímico actual. Cabe esperar entonces una retroacción de una modificación de la vegetación en el clima (ciclos del agua y del carbono) que puede ocasionar una modificación del funcionamiento y de la estructura de la vegetación. De lo anterior se desprenden dos problemáticas: se trata por una parte, de ser capaces de entender y reproducir los diferentes mecanismos inherentes al funcionamiento de la vegetación y a su evolución durante un ciclo estacional, y por otra, de cuantificar los flujos de masa y de energía en el seno del sistema suelo-vegetación-atmósfera, en un lapso de al menos una hora.

Los países en desarrollo, en donde las situaciones económicas y sociales son a menudo frágiles, son los más vulnerables a estos cambios. Un gran número de estos países están situados en las zonas áridas y semiáridas del globo (África del Norte y Saheliana, Medio Oriente, América del Sur, India), en donde los ecosistemas son muy frágiles, los recursos escasos y la biodiversidad está amenazada. Estos países, que son sin embargo los primeros afectados por la desertificación, no cuentan ni con los medios financieros ni a menudo con las capacidades técnicas para desarrollar investigaciones de este tipo. Resulta por lo tanto indispensable una asociación entre países desarrollados y países en desarrollo. Esta investigación, que debe ser necesariamente multidisciplinaria, compleja y excesivamente onerosa, requiere asimismo de una asociación entre países desarrollados.

Actualmente, es ampliamente admitido el hecho de que el «sistema tierra» funciona de manera interactiva. Los cambios de las características de la vegetación

(tipo, cobertura y organización espacial) influyen en los intercambios de masa y de calor en la biósfera y juegan un papel importante en el balance hidrológico. De manera recíproca, los cambios climáticos tienen un impacto real en la producción vegetal, y por lo tanto, en la actividad humana. Las principales interacciones directas entre el clima y el medio se traducen en modificaciones de la distribución espaciotemporal de las precipitaciones, la fragmentación escurrimiento/infiltración, la intercepción, el almacenamiento en superficie (suelo/nieve/hielo/charca) o, en profundidad, la exportación (ríos) o incluso la reemisión (evapotranspiración) con un impacto en el manejo de los recursos agua, erosión, sedimentación, contaminación del agua superficial y subterránea, así como salinización de tierras.

La problemática del impacto de los cambios ambientales, ya sean de origen humano o natural, en los recursos hídricos y vegetales. Debido a que los procesos involucrados en estos procesos son interactivos; un enfoque integrado. Esto se traduce en la necesidad de instrumentar un modelo/herramienta integrador, en el cual el conjunto de los procesos que intervienen (hidrológicos, atmosféricos, ecológicos, socioeconómicos), así como sus interacciones en el espacio y en el tiempo, sean descritos correctamente y en el cual se explote el potencial de la teledetección espacial.

Es un hecho que no se cuenta ni con los medios ni con la voluntad de asumir la construcción de un modelo de este tipo. Sin embargo, existe la disposición de contribuir para lograrlo, en colaboración con las instituciones nacionales e internacionales, respondiendo—en una primera etapa— a los cuestionamientos científicos siguientes:

1. ¿Cuál es el grado de complejidad requerido para describir correctamente cada uno de los procesos clave que controlan el funcionamiento de las superficies continentales?
2. ¿Cómo varía el grado de complejidad en función de la escala de tiempo y de espacio considerado?
3. ¿De qué manera se puede lograr un equilibrio de complejidad asociado con diferentes procesos de superficie para una escala espaciotemporal determinada?
4. ¿A qué tipo de estrategia recurrir si se desean utilizar los datos espaciales multiespectrales, multisensores y multitemporales para proporcionar información y restringir los modelos de superficie?

Síntesis

Sin pretender aportar una respuesta inmediata al conjunto de cuestionamientos científicos planteados por este tema complejo, las actividades de investigación desarrollada en la tesis doctoral del autor, y posteriormente en el seno del equipo de Bioclimatología del IRD, se inscriben en el marco de una iniciativa general, cuyo objetivo consiste en entender, cuantificar y modelar de manera integrada los procesos de intercambio de masa y de energía en la interfase suelo-vegetación-atmósfera en las zonas áridas y semiáridas, utilizando los datos de teledetección espacial, concediendo especial atención a los problemas de cambio de escala: agregación, desagregación y espacialización.

Las investigaciones se enmarcaron dentro de diversos programas nacionales e internacionales (PNTS, PNRH, ACI, MONSOON'90, HAPEX-SAHEL, NASA-EOS, SALSA, WATERMED (U.E.), IRRIMED (U.E.) y SUDMED).

Con el fin de lograr este objetivo general, el estudio se orientó en cinco ejes:

- a. Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala local.
- b. Acoplamiento entre SVAT y modelo de funcionamiento de la vegetación.
- c. Acoplamiento entre las dimensiones horizontal y vertical del ciclo del agua.
- d. Problemática de cambio de escala: heterogeneidad espacial, agregación y desagregación.
- e. Uso de la teledetección espacial: inversión, asimilación.

Cabe señalar que esta división, concebida para facilitar la investigación, no debe ser interpretada como un corte entre los diferentes ejes o componentes establecidos: las interacciones siguen siendo muy importantes debido a que los procesos estudiados guardan una estrecha vinculación.

Más adelante se presentarán los diferentes estudios realizados, así como los resultados obtenidos. Cabe señalar sin embargo, que algunos de los trabajos se efectuaron en colaboración con colegas o estudiantes asesorados.

Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala local

Actualmente se admite que los modelos de intercambio de masa y de energía en la interfase suelo-vegetación-atmósfera, desarrollados para regiones templadas con superficies totalmente cubiertas por vegetación, no son transferibles a las zonas áridas y semiáridas. Esto se traduce en términos de modelación debido a que en estas zonas, la contribución del suelo a los intercambios de masa y de energía no puede ser ignorada y debe considerarse de manera explícita.

Esquemas de superficie y distribución de la vegetación en el seno de la superficie

El análisis de los datos recopilados en diferentes sitios (Nigeria, Marruecos, Estados Unidos (Arizona, Nevada), México, Australia) reveló que los mecanismos de intercambio entre una superficie de cobertura dispersa y la atmósfera dependen asimismo de la distribución de la vegetación en la superficie. Cuando la distribución de la vegetación es homogénea, los intercambios de agua y de energía entre el suelo y la atmósfera pasan necesariamente por la vegetación. Cuando la distribución de la vegetación es heterogénea, una porción del suelo puede interactuar con la atmósfera independientemente de la vegetación (Chehbouni *et al.*, 1993, 1994, 1995). En el marco de dos propuestas apoyadas por el PNTS (Chehbouni *et al.*, 1992; Lhomme *et al.*, 1994a), se desarrollaron dos modelos con el fin de medir los flujos de agua y de energía, en ambos casos. Un primer modelo, basado en la formulación de dos capas, se realizó y validó utilizando datos Hapex-Sahel recolectados en una sabana de vegetación dispersa, pero distribuida de manera homogénea en la superficie (Lhomme *et al.*, 1994b). Para el caso en el que la vegetación esté distribuida de manera heterogénea, fue desarrollado un modelo en que la superficie se representa por dos compartimientos adyacentes; un primer compartimiento que contiene el suelo desnudo e insolado y un segundo compartimiento que contiene una capa de vegetación y una segunda capa del suelo que se encuentra debajo de la vegetación (Chehbouni *et al.*, 1997). La dificultad a este nivel reside en la posibilidad de discriminar estos dos tipos de superficie por teledetección.

Estos estudios, que iniciaron en el marco del programa HAPEX, prosiguieron con el programa SALSA, en donde se adaptó un modelo de transferencias acopladas de masa y energía en la interfase suelo-planta-atmósfera (SISPAT) en las condiciones particulares de la cuenca de San Pedro (México). Dicho modelo fue validado con éxito utilizando los datos climáticos, fisiológicos y micrometeorológicos en estos sitios (Boulet *et al.*, 1998, 1999). Sin embargo, existe un problema: este modelo requiere de un gran número de parámetros a los que no siempre es posible acceder, lo que dificulta su especialización, pese a ello, este modelo sigue constituyendo una herramienta de análisis adecuada, que permite poner a prueba el realismo de los modelos simplificados. Dentro de esta óptica se desarrolló un modelo simplificado en el cual el número de parámetros requeridos fue ampliamente reducido, lo que hace factible su espacialización mediante el uso de los datos de teledetección (Boulet *et al.*, 2000).

Se desarrolló un segundo modelo SVAT de complejidad intermedia, en el marco de HAPEX-Sahel, que se validó utilizando los datos recolectados durante varias estaciones en un sitio herbáceo en México (Figura 1).

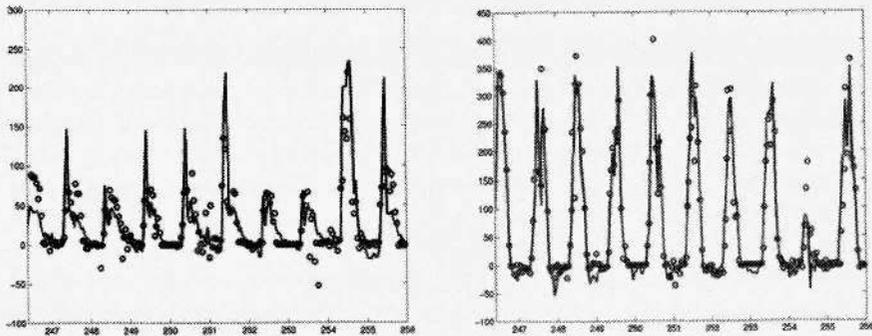


Figura 1. Validación de un modelo de complejidad intermedia en un sitio herbáceo en México (comparación entre los flujos de calor sensible y latente simulados y medidos durante 10 días).

Finalmente, la síntesis de los estudios realizados en este campo, durante el programa SALSA (Chehbouni *et al.*, 2000c), así como los resultados preliminares del programa SUDMED (Chehbouni *et al.*, 2007a), parecen indicar que un simple SVAT puede reproducir correctamente el comportamiento estacional de los flujos de superficie en las regiones áridas y semiáridas, siempre y cuando el modelo utilizado calcule correctamente la resistencia a las transferencias de agua y la diferencia entre las temperaturas radiativa y aerodinámica Figura 2.

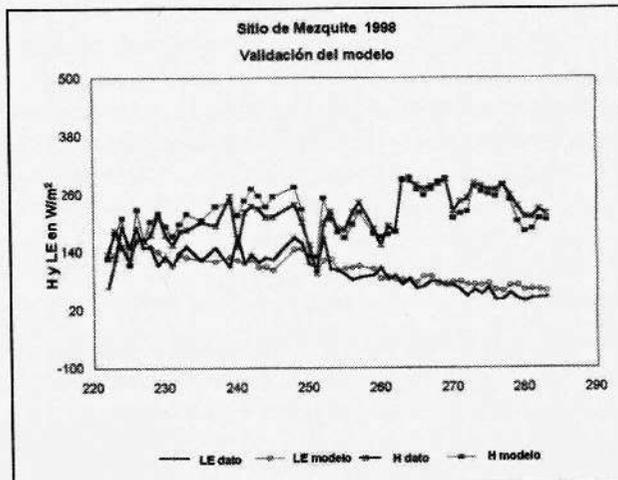


Figura 2. Validación de un simple SVAT en un sitio de Mezquite.

En resumen, se consideró que la selección de un modelo SVAT y, principalmente, el grado de complejidad requerido para evaluar los diferentes procesos que intervienen, debe responder a los siguientes criterios:

- ¿Qué escala de tiempo y de espacio se requiere?
- ¿Qué grado de precisión se requiere?
- Disponibilidad y calidad de los datos de forzamiento y de validación.

Infrarrojo térmico y flujos convectivos

Se optó por la utilización del infrarrojo térmico para estimar los componentes del balance de energía. El procedimiento generalmente utilizado consiste en estimar los flujos de calor sensible, a partir de la temperatura de superficie medida radiométricamente (T_r), y en calcular el flujo de calor latente como término residual de la ecuación del balance de energía, la radiación neta y el flujo de calor en el suelo (la energía disponible) siendo fácilmente cuantificables, mediante la combinación de datos de teledetección y datos de calor sensible (H). Hasta mediados de los años 80, el método clásico utilizado para estimar H sobre cobertura vegetal consistía en asimilar la temperatura radiométrica (T_r), observable vía satélite, a la temperatura de superficie, llamada aerodinámica, requerida por la física de las transferencias. Esta temperatura se define como la extrapolación del perfil de temperatura del aire, a nivel de la fuente aparente de calor en el interior de la cobertura y, por lo tanto, difícilmente medible. Los resultados experimentales demostraron que la diferencia entre estas dos temperaturas puede alcanzar 10°C en coberturas dispersas en zonas áridas y semiáridas.

En este marco, se propusieron dos enfoques:

- o El primero consiste en añadir una resistencia suplementaria a la resistencia aerodinámica (enfoque «excess resistance», llamada incorrectamente « kB^{-1} »), con el fin de obtener el flujo de calor sensible formulado en términos de temperatura radiativa y temperatura de superficie (enfoque «beta») mediante una relación empírica del LAI (Lhomme *et al.*, 1994 y 2000).
- o El segundo consiste en calcular la relación de la diferencia entre temperatura aerodinámica y temperatura del aire y la diferencia entre temperatura radiativa y temperatura de superficie (enfoque «beta») mediante una relación empírica del LAI (Chehbouni *et al.*, 1996 y 1997).

Estos métodos fueron validados a escala local utilizando series de datos recolectados en coberturas dispersas (en Nigeria y en México) (Chehbouni *et al.*, 1997b, Lhomme *et al.*, 2000). El objetivo, en el marco del programa SALSA (Goodrich *et al.*, 2000; Chehbouni *et al.*, 2000c), consistió en verificar la solidez de estos enfoques a escalas mayores y utilizando datos espaciales. Para lograrlo fue concebido un método

experimental adaptado al objetivo. El método fue validado con éxito utilizando datos AVHRR (Figura 3. Watts *et al.*, 1998 y 2000).

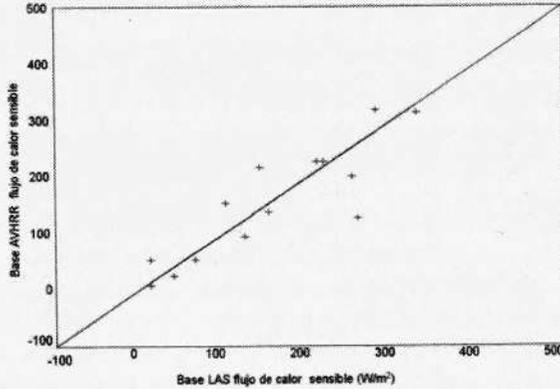


Figura 3. Validación del método de estimación del flujo de calor sensible de Chehbouni aplicado al AVHRR, utilizando las mediciones de cintillometría.

En el marco de una propuesta en el PNTS se examinó la eficiencia de cuatro métodos diferentes propuestos en la literatura, utilizando a la vez un modelo SVAT (de referencia) y una serie de datos recolectados en una decena de sitios en diferentes zonas áridas y semiáridas en distintas partes del mundo: Niteria, México, Australia, Estados Unidos de Norteamérica. Los resultados revelaron que ninguno de los modelos sometidos a prueba funciona adecuadamente en el conjunto de las series de datos (de campo y numéricos), Figura 4.

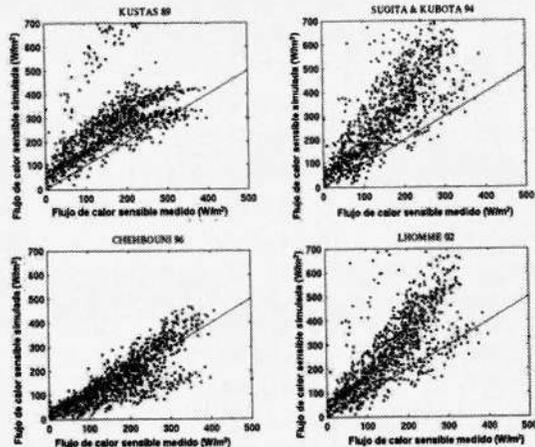


Figura 4. Comparación de cuatro modelos de estimación de flujos de calor sensible.

Por otra parte, estos enfoques –incluso después de la calibración– resultan menos eficientes, en el caso en que los ángulos de vista del satélite son importantes. Lo anterior revela el impacto de las condiciones de vista en el valor de la temperatura de superficie (efectos direccionales). El dispositivo que fue implementado durante SALSA (dos radiómetros dirigidos simultáneamente hacia la misma superficie bajo dos ángulos diferentes 0° y 45°) demostró que podía existir hasta 6°C de diferencia entre la medición de temperatura tomada en el nadir y la medición a 45° (Chehbouni *et al.*, 2001b). Esos datos descubrieron asimismo la existencia de una correlación entre las diferencias de temperatura (nadir-oblicua) y la humedad de superficie (ver Figura 5).

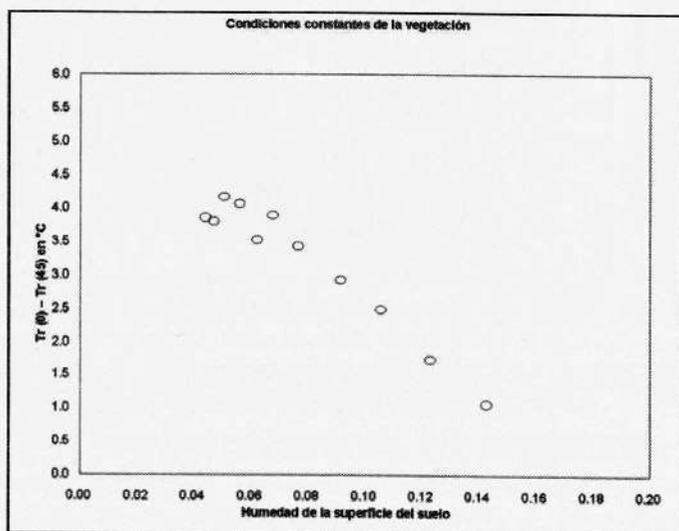


Figura 5. Relación entre la diferencia de temperatura (nadir-oblicua) y la humedad de superficie.

Para sortear las dificultades inherentes a las formulaciones semiempíricas se explotó la información contenida en la firma multiangular en el infrarrojo térmico para invertir analíticamente las temperaturas del suelo y de la vegetación (Chehbouni *et al.*, 2001a), a partir de las cuales se habían estimado los flujos convectivos (Chehbouni *et al.*, 2001b, Merlin y Chehbouni, 2004). Ese método fue validado con éxito durante el programa SALSA. En la Figura 6 se presenta una comparación entre el flujo de calor sensible estimado con una observación de la temperatura de superficie bajo dos ángulos (0° y 45°) y el flujo medido en un estrato herbáceo mediante un sistema de correlación Eddy.

Con fines de operatividad y con el objetivo de evitar recurrir sistemáticamente a un procedimiento de inversión de las temperaturas del suelo y de la vegetación, a partir de temperaturas biangulares se desarrolló una medición que expresa directamente el flujo de calor sensible en función del gradiente clásico de temperatura superficie-aire y un término correctivo que depende de la diferencia de temperatura nadir y oblicua.

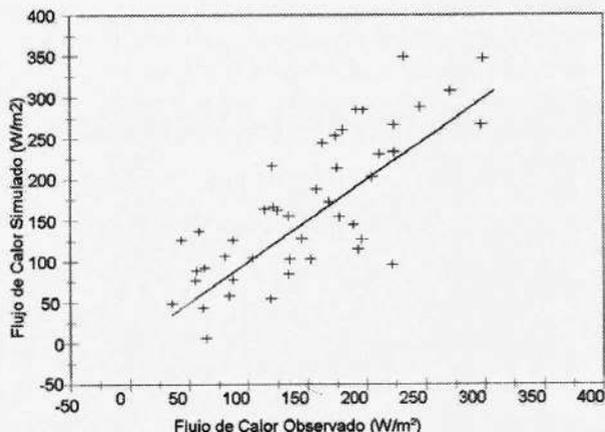


Figura 6. Comparación entre los valores de flujo de calor sensible observados y simulados utilizando datos de temperatura de superficie a 0 y 45°.

Acoplamiento SVAT-Funcionamiento de la vegetación

Partiendo de la doble observación de que los modelos de tipo SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) no integran la dinámica de la cobertura vegetal en la medición de los intercambios y que los modelos de funcionamiento de la vegetación procesan el intercambio de agua y de energía de una manera simplista, se acopló un modelo SVAT con un modelo de funcionamiento de la vegetación. El término «funcionamiento de la vegetación» corresponde a su desarrollo temporal caracterizado por la fijación de carbono, fenología, reservorios de carbono, biomasa y su distribución en los diversos órganos de las plantas. La línea rectora de este acoplamiento está basada en el siguiente principio: el SVAT proporciona al modelo de funcionamiento el conjunto de los parámetros termo-hídricos (temperatura, humedad, etc.) utilizados. Este último proporciona posteriormente al SVAT las características de la cobertura (LAI, h, % C) necesarias para la parametrización de los intercambios acelerados. El trabajo de acoplamiento se inició durante una estancia en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA. El modelo acoplado fue validado durante una estación completa, utilizando los datos recolectados en una cubierta herbácea en Nigeria (Chehbouni *et al.*, 1996; Lo Seen *et al.*, 1997).

Los resultados revelaron que este acoplamiento permitió optimizar la eficacia tanto del SVAT como del modelo de funcionamiento.

El estudio se prolongó en el marco del programa SALSA y de dos trabajos de tesis. Éstas enfatizaban, por una parte, la espacialización de las salidas del modelo acoplado y, por otra parte, la utilización de datos espaciales, con el fin de limitar su trayectoria a través de la búsqueda de las condiciones iniciales del modelo (Figura 7a).

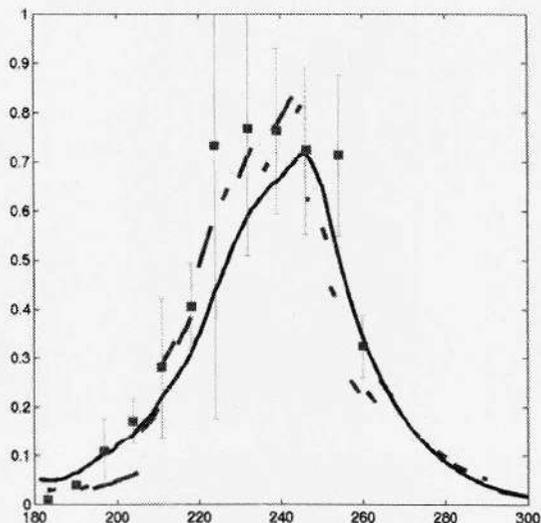


Figura 7a. Comparación entre el LAI observado y simulado durante una estación completa (Cayrol *et al.*, 2000b).

En la Figura 7b se presentan los resultados de la aplicación de un modelo acoplado en una subcuenca vertiente en las zonas áridas (Walnut Gulch, cuenca de San Pedro). Se trata de salidas espacializadas de la biomasa, del índice foliar, de la humedad del suelo en dos capas, durante dos estaciones (1996 y 1997).

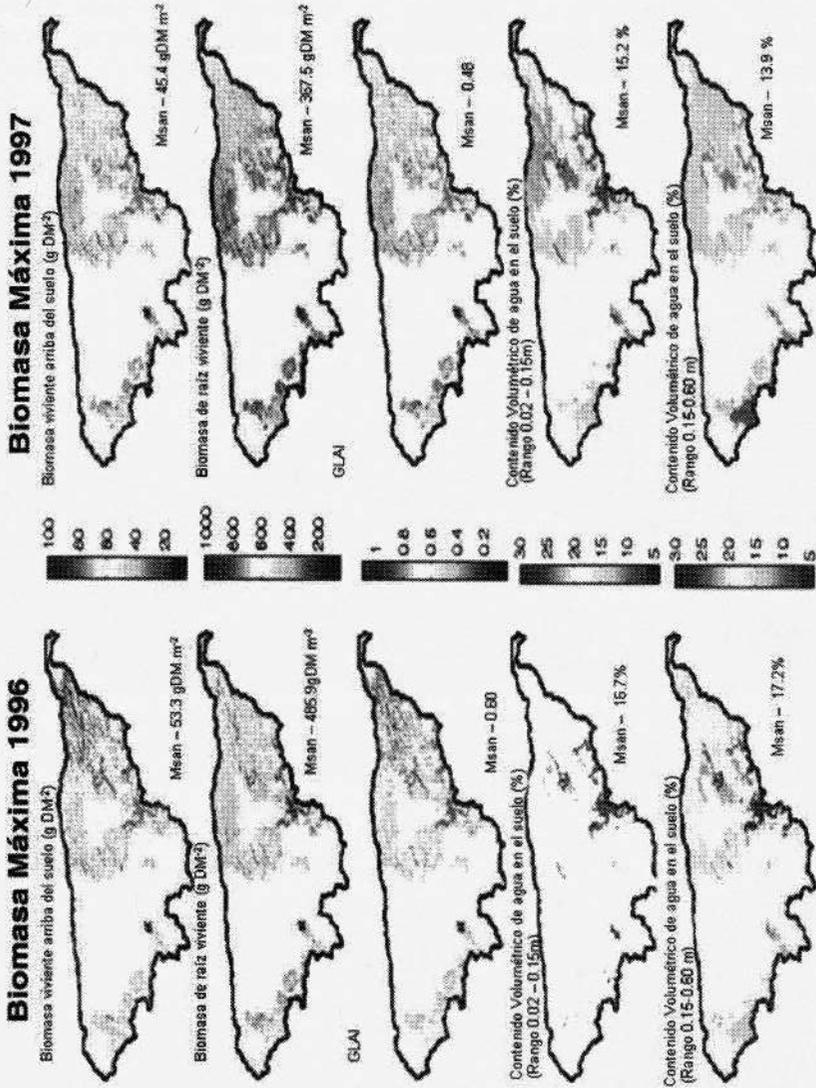


Figura 7b. Ejemplo de salidas espacializadas de un modelo acoplado: Biomasa, LAI, Humedad del suelo (Nouvellon et al., 2001).

Acoplamiento entre las dimensiones horizontal y vertical del ciclo del agua

Históricamente los modelos hidrológicos de crecida (TOPMODEL, KINEROS, etc.) son modelos por evento, es decir, que son aplicados a cada evento pluvial, y en ese caso las transferencias verticales no son descritas de manera somera. El estado hídrico inicial de la cuenca es entonces, ya sea considerado como un parámetro que debe ajustarse a cada evento pluvial, o evaluado de manera poco precisa por medio de una relación simple, utilizando la evaporación potencial. Por otra parte, los modelos de Transferencias Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVAT), de reciente elaboración, simulan con precisión y en forma continua los intercambios verticales de agua y de energía en la interfase del suelo, de la vegetación y de la primera capa atmosférica. Por el contrario, estos modelos ignoran, en la mayoría de los casos, las redistribuciones laterales.

Partiendo de la simple observación de que estos dos tipos de modelos, por separado, son incapaces de describir el ciclo hidrológico en su conjunto, las comunidades nacional e internacional llevaron recientemente a cabo un esfuerzo sustancial de acoplamiento. En función de la complejidad/precisión buscada, fueron constituidas las siguientes combinaciones:

- Modelos complejos integrados, que resuelven las ecuaciones de Richards en las tres dimensiones (ver TOPOG, SHE); se sabe sin embargo que la difusión no es el modo de flujo efectivo en un gran número de casos (macroporos, caminos preferenciales), lo que limita el realismo de estos modelos con base física.
- Modelos SVAT simples acoplados a modelos hidrológicos de tipo VIC o cascada de reservorios. Estos modelos, más sólidos y fáciles de instrumentar, presentan sin embargo la desventaja de no poder proporcionar salidas en lapsos que representen el acoplamiento del balance de masa y del balance de energía.
- Modelos SVAT complejos acoplados a modelos hidrológicos simples. Estos modelos tienen la desventaja, ya sea de no representar la variabilidad espacial de la humedad en el interior de la cuenca, o de explicar esta variabilidad en términos de profundidad variable de reservorio (impropiamente llamada «Variable Infiltration Capacity»). Dan prioridad a una interpretación estrictamente pedológica de la variabilidad espacial de la humedad. Los tiempos de transferencia de un punto de la cuenca al río son inferiores (hasta varios ordenes de tamaño) a los tiempos de transferencia de la matriz no saturada, lo que implica que las conductividades máximas (saturación) laterales y verticales son, muy diferentes: lo anterior justifica la utilización de dos cinéticas diferentes para las transferencias laterales y verticales.

Se inició, en el marco de las actividades del equipo «agua» en CESBIO, un estudio metodológico relacionado con el acoplamiento entre un SVAT (ISBA y SVAT simple) y un modelo hidrológico distribuido TOPMODEL. Este último simula los flujos

laterales en superficie y en la capa superficial del suelo, en función de la topografía. La interpretación de la variable de estado del modelo hidrológico TOPMODEL (el déficit de saturación) es fuente de ambigüedad. En particular, para suelos poco profundos, no se sabe si los flujos laterales de subsuperficie están vinculados con el desarrollo de un manto elevado (zona saturada) o de una activación de los caminos preferenciales del agua, resultado de anisotropías o de heterogeneidades pedológicas (macroporos, discontinuidades, etc.). Diversas interpretaciones de esta variable abundan en la literatura sobre este tema. En este contexto se desarrollaron dos versiones del acoplamiento. Ambas representan de manera óptima los dos tipos de flujos laterales antes mencionados. En la primera, el déficit es interpretado como un nivel global de humedad; en la segunda, es interpretado como profundidad de una zona saturada. Ambas versiones fueron comparadas en el marco de la tesis de Jennifer Pellenq. Los resultados para la cuenca vertiente de Auradé, Francia (328 ha) y en Australia demostraron que ambas versiones arrojan resultados comparables y bastante satisfactorios (Pellenq *et al.*, 2001 y 2003).

Dentro de este mismo sentido y en el marco de la tesis de Anne Chaponnière (Chaponnière *et al.* 2007), se efectuó un trabajo de modelación integrada del ciclo del agua en una cuenca semiárida (Cuenca de Tensift, Marrakech, Marruecos: Proyecto SUDMED), utilizando el modelo SWAT. El modelo SWAT es determinista, con base física, distribuido y continuo; es diario y permite considerar un gran número de procesos (entre otros, las infiltraciones en el lecho del río, los flujos profundos, el crecimiento dinámico de la vegetación, el deshielo). La mayoría de los módulos adoptan un formalismo de modelación simple (modelo reservorio para el suelo, modelo de tipo grado día para el crecimiento de la vegetación y el módulo nieve) y ciertos módulos proponen diferentes formalismos (evapotranspiración según Penman-Monteith, Priestley-Taylor o Hargreaves; escurrimiento según el método de curve number o según Green y Ampt. Por último, la discretización altitudinal de la cuenca puede ser determinada, lo que permite aplicar gradientes altitudinales de precipitación y de temperatura a los datos de forzamiento.

En ese estudio, el objetivo no era únicamente reproducir de manera óptima un hidrograma, sino también, y ante todo, reproducir de manera más realista posible los diferentes componentes del ciclo del agua (régimen, componente de superficie y componente profundo y nival). Lo anterior justifica la opción de elegir un modelo determinista y distribuido en vez de un modelo estocástico y/o global. Por último, el objetivo a un plazo mayor (que rebasa el marco de la tesis de Anne Chaponnière) de análisis de la respuesta hidrológica a escenarios de modificación del régimen climático requiere un modelo continuo capaz de simular períodos largos. La pertinencia del modelo SWAT fue evaluada incluso con los escasos datos disponibles. El modelo SWAT presenta un gran número de parámetros; sin embargo, un análisis de sensibilidad relativamente exhaustivo permitió detectar los fenómenos de compensación entre parámetros, lo que

es relativamente clásico en el caso de un modelo hidrológico de su tipo. El estudio reveló que es perfectamente posible restituir de manera correcta el caudal de salida (previa calibración), sin restituir correctamente los demás componentes del balance hidrológico. Tratándose de un compartimiento nieve, por ejemplo, la dinámica simulada por el modelo presenta variaciones claramente más importantes que la dinámica espacio temporal observada por satélite. De igual manera, y como fue demostrado al confrontar las simulaciones del modelo y los resultados de los análisis geoquímicos e isotópicos, el modelo era incapaz de restituir las contribuciones relativas de los compartimientos de superficie y profundos a los flujos (Chaponnière et al., 2007).

Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala regional y problema de heterogeneidad espacial: agregación y desagregación

Estudios recientes han demostrado que la variabilidad espacial de ciertas características de la superficie puede inducir circulaciones a mesoescalas que pueden tener un gran impacto en los procesos a gran escala. La heterogeneidad de superficie puede deberse a la variabilidad de las características del suelo, topografía y, consecuentemente, de la variabilidad de humedad del suelo, la naturaleza de la vegetación, el albedo y la temperatura de superficie. Resulta por lo tanto indispensable, para el realismo y credibilidad de las simulaciones de los modelos, que la heterogeneidad de superficie se considere correctamente. Debido a la ausencia de avance teórico significativo en la formulación de las ecuaciones de flujos a gran escala, el modelo generalmente utilizado es el modelo conceptual. Éste consiste en formular los flujos de superficie a gran escala utilizando las mismas ecuaciones que para las pequeñas escalas (caso homogéneo), pero con argumentos que son expresiones efectivas de los parámetros locales (temperatura, albedo, emisividad, conductancia de superficie y conductancia aerodinámica). El problema que surge a ese nivel reside en la estimación de estos parámetros efectivos: problema de agregación espacial. Una primera solución consiste en considerar que el valor efectivo de un parámetro determinado es el promedio ponderado por las superficies de los parámetros locales. Sin embargo, la ausencia de linealidad entre los flujos de superficie y los parámetros de superficie (radiación y temperatura, por ejemplo) contradice esta hipótesis. Otros procedimientos de agregación más rigurosos, basados en la preservación de una cantidad determinada durante su paso de la escala local a la escala regional, fueron desarrollados recientemente (preservación de la temperatura de superficie: preservación de la emisividad de superficie: Chehbouni *et al.*, 1994; preservación del flujo de calor sensible y del flujo de calor latente, Lhomme *et al.*, 1994; Chehbouni *et al.*, 1997; preservación de la ecuación del balance energético: Chehbouni *et al.*, 1995). Sin embargo, en el pasado estos modelos no podían ser realmente validados, ya que no existían mediciones integradas de los flujos de superficie fuera de los flujos aerotransportados que resultaron problemáticos

durante la campaña Hapex (debido a razones hasta ahora inexplicables). Es por lo tanto preciso resolver ahora los problemas de validación.

Con el fin de avanzar en este campo se estudiaron las posibilidades de utilización de la cintillometría como herramienta para medir el flujo de calor sensible en distancias largas (compatibles con las resoluciones espaciales de los satélites de campo amplio y con el tamaño de las mallas de los modelos a mesoescalas). Los resultados de la campaña SALSA revelaron que el grado de eficiencia de esta herramienta es bastante satisfactorio (Chehbouni *et al.*, 1999). Se demostró por vez primera que la medición del flujo de calor sensible efectuada con un cintillómetro sobre una gran superficie heterogénea representa realmente un valor integrado de las contribuciones de cada elemento de la superficie, Figura 8. Lo anterior permitió validar un esquema de agregación analítica para el flujo de calor sensible, que considera a la vez la heterogeneidad que se encuentra a escala del patch y a escala regional (producto del tipo de cobertura vegetal, transición hierba-mezquite). Sin embargo, los resultados obtenidos revelaron que los esquemas analíticos son los más sólidos, pero requieren del conocimiento de parámetros locales, a los cuales no es siempre posible acceder por teledetección. La eficiencia de los esquemas empíricos que utilizan los datos espaciales en su totalidad, depende del grado de contraste entre los diferentes «patches» (o superficies homogéneas unitarias) del mosaico (Chehbouni *et al.*, 2000a, 2007b).

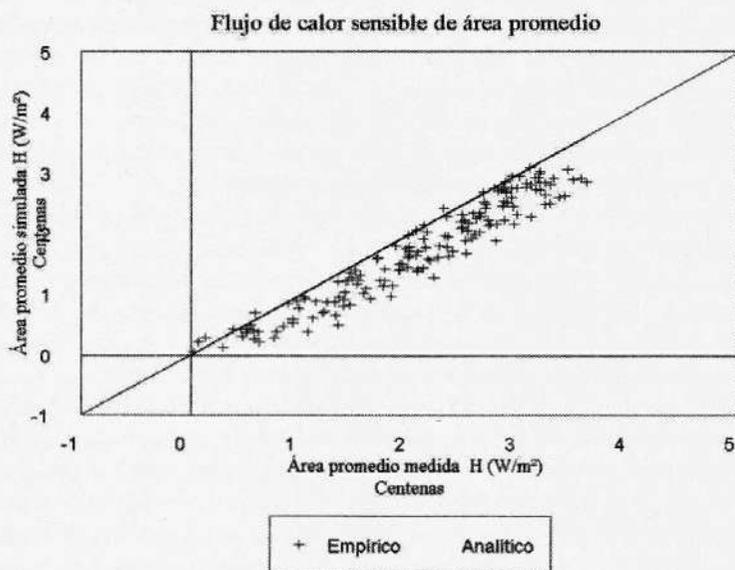


Figura 8. Comparación de los grados de eficiencia de un esquema de agregación empírica y analítica con el objetivo de estimar el flujo de calor integrado en una superficie heterogénea.

En este contexto resulta importante desarrollar esquemas de agregación que utilicen al máximo el potencial de los datos de teledetección espacial. En el marco de una de formación en curso se someterá a prueba un nuevo método de representación de la variabilidad espacial de los parámetros/variables de superficie, que combina el método determinista, método estocástico y datos de teledetección. La idea básica consiste en que las variaciones espaciales y temporales de los parámetros y de las variables de superficie no pueden ser totalmente independientes. Por ejemplo, el índice foliar, las resistencias y el albedo dependen de la cobertura y de la actividad vegetales.

Sin pretender entrar en detalles, se ilustrará el método utilizando el caso de dos parámetros de superficie, por ejemplo el albedo de superficie y la resistencia mínima al transporte de agua. En este caso particular, la metodología constará de tres etapas:

1. Utilización de los datos de teledetección espacial de los efectos atmosféricos y direccionales previamente corregidos, con el fin de generar mapas de albedo en el conjunto de la región.
2. Deducción de la función de densidad de probabilidad (FDP) del albedo de superficie efectuando una clasificación sobre la imagen.
3. Uso de esta FDP, en conjunción con la relación que vincula localmente el albedo de superficie y la resistencia mínima, a través de la ecuación del balance de energía para deducir la FDP de la resistencia mínima.

Se pretende construir un cierto número de binomios/parejas de parámetros/variables de superficie utilizando datos de teledetección en varias longitudes de onda. Este método, previamente probado y validado, presenta diversas ventajas. Permite obviar el método monovariante (que ha estado siempre asociado con el método estocástico), capitalizar los conocimientos que se tienen de los procesos a escala local, así como maximizar el valor de los datos de teledetección espacial.

En el contexto del Instrumento SMOS y en el marco de la tesis de Merlin (2005, 2006a), se estudió la problemática de desagregación. La aplicación de la misión SMOS a la hidrología plantea el cuestionamiento siguiente: ¿qué informaciones locales resultan suficientes para espacializar la humedad del suelo, obtenida/extraída por SMOS, a una escala más fina que la resolución SMOS?. Considerando que los procesos hidrológicos se desarrollan a una escala del orden de un kilómetro y que la resolución de SMOS es, en promedio, de cerca de 40 km², es necesario un procedimiento de desagregación para utilizar los datos SMOS en el campo de la hidrología. En lo que se refiere al tema de la distribución de los datos SMOS, Pellenq *et al.* (2002) acoplaron la modelación hidrológica con la modelación de las transferencias suelo-vegetación-atmósfera. Se trata de un modelo esencialmente basado en la modelación.

Un modelo alternativo consiste en acoplar no sólo modelos sino más bien datos satelitales multiespectrales. Este tipo de modelo fue implementado utilizando una serie

de datos sintéticos y los resultados obtenidos son muy promisorios. Se logró distribuir la humedad del suelo sobre 1 km, combinando la temperatura de brillancia SMOS a 40 km², datos de temperatura y de reflectancia a 1 km, modelos de transferencia radiativa y un modelo SVAT.

Los datos de entrada del método de Merlin, (Merlin *et al.* 2005, 2006a), son similares a los del método llamado triangular, que utiliza –por construcción empírica– un vínculo entre la humedad microonda, la temperatura de superficie y el NDVI. Existen sin embargo tres diferencias esenciales con el método triangular. Por una parte, este método está basado en modelos físicos y no en una relación empírica entre variables de superficie. Por otra parte, utiliza el conjunto de datos de resolución óptica disponibles (textura del suelo, parámetros del suelo y de la vegetación, condiciones atmosféricas) y no únicamente la temperatura de superficie y el NDVI, como el método triangular. Por último, nuestro método es específico de la misión SMOS, debido a que utiliza las capacidades multiangulares del instrumento SMOS.

La desagregación de la humedad SMOS se realiza en dos etapas sucesivas e independientes. En una primera etapa se obtiene una distribución relativa de la humedad del suelo en el seno del píxel SMOS con informaciones de resolución media proporcionadas por los datos ópticos y la modelación de los procesos de superficie a la misma escala. Esta distribución de la humedad del suelo es relativa en la medida que es resultado de dos parámetros libres, definidos a escala del píxel SMOS: la humedad del suelo de baja resolución WSMOS y un parámetro f_l que determina los valores mínimos y máximos de las humedades locales. En una segunda etapa, los dos parámetros WSMOS y f_l son invertidos simultáneamente a partir de los datos SMOS multiangulares.

A modo de ilustración se aplica el método a los datos del experimento Southern Great Plains 1997 (SGP'97), efectuado en Oklahoma entre el 18 de junio y el 16 de julio. Durante SGP'97, se obtuvieron observaciones aerotransportadas en banda L con el instrumento Electronically Scanned Thinned Array Radiometer (ESTAR). La humedad del suelo en superficie fue posteriormente invertida y cartografiada sobre una superficie de cerca de 50 x 200 km², a una resolución de 800 m. Para la aplicación del método de desagregación se utilizaron datos ópticos NOAA14/AVHRR del 12 de julio. Un píxel microonda de tipo SMOS se genera al agregar los datos ESTAR recabados el 12 de julio en la superficie de recolección de los datos ESTAR y AVHRR. Esta superficie de 2.400 km² representa el «píxel SMOS» baja resolución del estudio. La desagregación utiliza sucesivamente los datos AVHRR a 1.1 km de resolución para describir la variabilidad espacial de la humedad en el seno del píxel SMOS (etapa 1) y la observación SMOS generada para limitar esta variabilidad a la escala del píxel SMOS (etapa 2 del algoritmo).

Uso de la teledetección espacial: inversión, asimilación

Los satélites de observación de la tierra permiten acceder a un cierto número de parámetros que caracterizan el estado de la superficie. Por ende, los satélites, con su visión global y repetida, constituyen un excelente medio para mejorar la comprensión de la dinámica espacio-temporal del sistema. Independientemente de los problemas técnicos, como la calibración o la desviación de los sensores, la contraparte de esas ventajas radica en dos puntos:

1. La medición satelital se ve afectada por condiciones exteriores como la atmósfera, la geometría de observación y de iluminación y el ruido del suelo. La importancia de estos efectos es ciertamente mayor o menor en función de la longitud de onda utilizada (menos efectos atmosféricos en la medición microonda, por ejemplo).
2. La dificultad de interpretación física de la información contenida en estas mediciones. El problema radica en que la medición radiativa obtenida por satélite no es inmediatamente relacionada con variables pertinentes utilizadas para describir los procesos de superficie (Chehbouni *et al.*, 1996).

Varios métodos de utilización de datos de teledetección se sometieron a prueba. El primer método consiste en relacionar empíricamente la medición satelital con los parámetros de superficie. El ejemplo más común es el de las relaciones entre el índice de vegetación NDVI, que corresponde a una combinación de los canales visible y próximo infrarrojo del sensor AVHRR por ejemplo, y de la biomasa o el índice foliar. Sin embargo, el NDVI es muy sensible, a la vez, a las variaciones de las propiedades espectrales del suelo y a las condiciones de observación e iluminación (efectos direccionales). Lo anterior limita considerablemente la utilización del NDVI sobre una cobertura dispersa y, por lo tanto, en las zonas áridas y semiáridas (Qi *et al.*, 1994b, Huete *et al.* 1992,; Leprieur *et al.*, 1994). En colaboración con los equipos de científicos de la Universidad de Arizona se desarrolló un nuevo índice de vegetación: MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), que reduce considerablemente el ruido del suelo, facilita la normalización de los efectos direccionales y puede permitir detectar índices muy bajos de cobertura (Qi *et al.*, 1994; Chehbouni *et al.*, 1994). Sin embargo, debido a su carácter empírico, las relaciones entre la medición satelital y los parámetros de superficie son difícilmente generalizables en condiciones que difieren de aquéllas en las que fueron establecidas. El segundo método consiste en utilizar los datos satelitales, en conjunción con modelos de transferencia radiativa acoplados a procedimientos de inversión para obtener los parámetros físicos primarios de la superficie, que condicionan de manera explícita la luminancia de cortas de onda o la emisión en los campos térmico y microonda (Cabot *et al.*, 1994; Njoku *et al.*, 1994; Gond *et al.*, 1997). Este método es ciertamente más físico; su aplicación práctica se ve, sin embargo, limitada por tres factores:

- a. Los modelos de transferencia radiativa existentes distan mucho de ser perfectos; en particular, es preciso mejorar la parametrización de la heterogeneidad espacial.
- b. Con los sensores disponibles, para una determinada condición «puntual» de la superficie, el número de parámetros que debe ser invertido es a menudo superior al número de observaciones disponibles.
- c. Los parámetros primarios, que condicionan la firma espectral de la superficie (grosor óptico u orientación de la hoja, en el campo visible por ejemplo), no son necesariamente utilizables directamente en los modelos que describen el balance de agua y de energía de la superficie.

Fueron asimismo sometidos a prueba métodos alternativos que están en proceso de perfeccionamiento desde hace varios años. El primero está basado en el acoplamiento entre los modelos de procesos y los modelos de transferencias radiativas (Chehbouni *et al.*, 1994, Lo Seen *et al.*, 1994; Njoku *et al.*, 1994; Cabot *et al.*, 1994). Mediante los datos de HAPEX-Sahel, se modeló la reflectancia del paisaje saheliano, utilizando, de entrada, los parámetros de la vegetación proporcionados por el modelo de funcionamiento. Lo anterior permitió simular la evolución sobre la estación de reflectancias en los canales visible y próximo infrarrojo del sensor AVHRR de NOAA, y comparar las reflectancias observadas con las reflectancias simuladas. El segundo método está basado en las técnicas de minimización, donde la información satelital permite controlar la coherencia de la modelación de la evolución de ciertas variables observables por teledetección, minimizando la distancia entre las variables medidas y las variables simuladas mediante ajuste de las condiciones iniciales o de los parámetros del modelo. La aplicación de este método a los datos infrarrojos térmicos, obtenidos en el conjunto de la estación de lluvias durante HAPEX-Sahel, fue sometida a prueba en el marco de dos Maestrías (Cayrol, 1997) y arrojó resultados sumamente alentadores; en particular, la utilización de las mediciones obtenidas a las 14:00 horas permitió estimar la capacidad en el campo, y mejorar la simulación de la humedad del suelo y de los flujos instantáneos.

En el marco de SALSA, se tuvo éxito la aplicación a los datos ópticos de los sensores AVHRR y VEGETATION (Cayrol *et al.*, 1999, 2000a; Nouvellon, 2001). Existe sin embargo un tercer método, que acaba de instalarse en la comunidad científica. Utiliza la teledetección con el fin de ajustar directamente variables de estado, utilizando un esquema de asimilación secuencial (Boulet *et al.*, 2002, Merlin, 2006a, b). Se asume que los dos últimos esquemas descritos (modo minimización y modo asimilación) presentan un cierto número de ventajas y de inconvenientes. En lo que se refiere a la minimización, la idea subyacente es que el modelo de procesos, el modelo de transferencia radiativa y los datos satelitales son confiables. La diferencia entre variables observadas y simuladas tan sólo puede explicarse por la incertidumbre relacionada con los valores de las constantes del modelo de procesos; dichos valores se fijan de

manera definitiva, lo que limita toda explotación posterior del satélite. Por otra parte, el esquema de asimilación secuencial, si bien considera incertidumbres relacionadas con los datos y las variables de estado de los modelos, no impone ninguna restricción particular a los parámetros «constantes» (Chehbouni *et al.*, 2000c). Con base en esta observación se implementarán estos dos modelos, de manera complementaria en el seno del equipo agua y en el marco del programa SudMed. Cabe señalar que todos estos métodos fueron, en la mayoría de los casos e incluso de manera exclusiva, aplicados a escala local. En lo sucesivo, se pretende capitalizar el potencial del muestreo espacial del satélite, por medio de la evaluación de los algoritmos antes mencionados de manera distribuida. Es la forma más eficaz de combinar los datos de la teledetección y los modelos de procesos más allá de la escala parcelaria

Por último, con el fin de aprovechar plenamente la diversidad de información contenida en los datos multiespectrales, multidireccionales y multiresoluciones, resulta indispensable resolver los problemas de la falta de correspondencia entre las resoluciones espaciales de los diferentes sensores, y por otra, entre la información proporcionada por dichos sensores y la que requieren los modelos de procesos. Este problema recibirá una atención particular en los próximos años.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Durante las últimas décadas la comunidad científica francesa logró avances significativos a nivel de la comprensión y la modelación de la mayoría de los procesos que intervienen en la dinámica de las superficies continentales. La mayoría de estos avances se realizaron de manera independiente y por campo disciplinario. Los procesos involucrados fueron eminentemente interactivos; el reto consiste actualmente en realizar la integración coherente de los «bloques» de conocimientos disciplinarios. Lo anterior permitiría abordar nuevos cuestionamientos científicos, identificar las lagunas, pero también las sinergias, y sobre todo definir las prioridades adecuadas para cada comunidad, dentro de un marco interdisciplinario.

El estudio del funcionamiento integrado de las superficies continentales, de los flujos y balances de agua, de energía y de carbono, a escala regional, así como su manejo mediante datos de teledetección multiespectrales y multiresoluciones espacio-temporales, constituyen un importante eje de investigación del programa científico del CESBIO. Con el fin de lograr este objetivo se propone desarrollar, en colaboración con las instituciones asociadas, tanto francesas como internacionales, una herramienta de modelación especializada que incluya modelos de funcionamiento de la vegetación y de los suelos, modelos de transportes verticales de agua, de carbono y de energía en la continuidad suelo-planta-atmósfera y de los modelos hidrológicos distribuidos, que describen los flujos de superficie y de subsuperficie. Se trata, a corto plazo, de construir una plataforma integrada de modelación de las superficies continentales y de asimilación

de las mediciones de teledetección a escala regional. Esta plataforma manejará el conjunto de los procesos de superficie y proporcionará condiciones a los límites (ejemplo: flujos), a una resolución adecuada a los modelos atmosféricos, que proporcionarán a su vez los parámetros de forzamientos meteorológicos.

Esta herramienta está destinada a la realización de estudios a escala regional e incluye un conjunto de modelos de transferencia radiativa, que permiten asimilar datos de teledetección multisensores con fines de inicialización, control y validación. En función de sus objetivos, de los sitios de estudio y de las restricciones, este dispositivo debería permitir integrar modelos de procesos o de transferencia radiativa de diferentes grados de complejidad. (ver: concepto en la Figura 9). La instrumentación de esta plataforma se apoyará en los programas operativos del CESBIO (SUDMED en Marruecos y México, GLOBAL/Sahel y SUD-OUEST en la región de Toulouse).

Reconocimiento

Este estudio representa la síntesis de investigaciones asumidas durante los últimos 15 años en el marco de varios programas internacionales (Monsoon'90; Hapex Sahel, SALSA, SUDMED), gracias a las contribuciones de antiguos estudiantes y colegas actuales (G. Boulet, A. Chaponnière, O. Merlin; Y. Nouvellon, P. Cayrol, J. Pellonq).

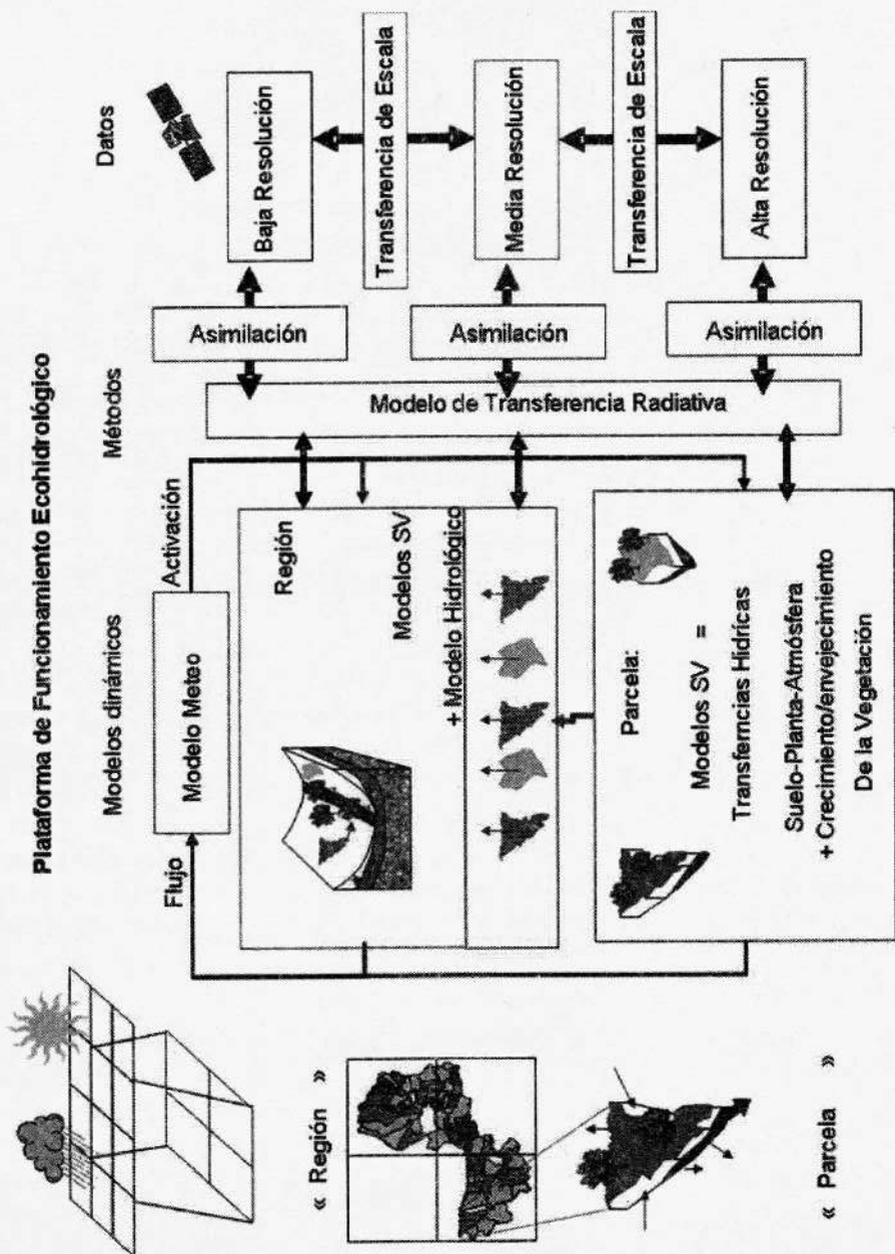


Figura 9. Plataforma de funcionamiento ecohidrológico.

LITERATURA CITADA

- Boulet, G., A. Chehbouni, I. Braud, and M. Vauclin. 1998. A simple Water and Energy Balance Model for Remote Sensing Utilization. American Geophysical Union Spring Meeting, Boston, M. A.
- _____. A. Chehbouni, I. Braud, and M. Vauclin. 1999. Mosaic versus dual-source approaches for modelling the surface energy balance of a semi-arid land, *Hydrology and Earth System Sciences*, 3(2), 247-258.
- _____. A. Chehbouni, L. Braud, M. Vauclin, R. Haverkamp and C. Zammit. 2000. A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105:117-132.
- _____. J. D. Kalma, Y. Kerr, and A. Chehbouni. 2002. Deriving catchment scale water and energy balance parameters using data assimilation based on extended Kalman filtering, *Hydrological Sciences Journal* 47(3), 449-467.
- Cabot, F., A. Chehbouni, E. G. Njoku, Y. H. Kerr, G. Dedieu. 1994. Combined use of spectrale measurement: A promise for surface parameter retrieval. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, USA, IEEE, pp 587-589.
- Cayrol, P., L. Kergoat, S. Moulin, G. Dedieu and A. Chehbouni, 1997. Assimilation de temperature infrarouge thermique dans un modèle couplé VEGETATION/SVAT à l'évolution saisonnière d'une jachère. Centre International de Conférence. Atelier de Modelisation de l'atmosphère, Centre national de Recherches Météorologiques, 2-3 décembre 1997. Toulouse, France.
- _____. A. Chehbouni, L. Kergoat and G. Dedieu. 1999. Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrument during the 1997-1998-1999 SALSA Experiment. International Workshop on Satellite Remote Sensing and Climate. Simulations: Synergies and Limitations. Les Diablerets, Switzerland.
- _____. A. Chehbouni, L. Kergoat, G. Dedieu, P. Mordelet and Y. Nouvellon. 2000a. Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrument during the 1997-1999 SALSA experiment, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105: 91-115.
- _____. S. Moulin, L. Kergoat, G. Dedieu and A. Chehbouni. 2000b. Calibrating a coupled SVAT/Vegetation growth model with remotely sensed reflectance and surface temperature. A case study for the HAPEX-Sahel grassland sites. *J. Appl. Meteorol.* (39) 2452-2472.

- Chaponnière, A., G. Boulet, A. Chehbouni and L. Arsmouk. 2007. Assessing Hydrological processes under scarce data and complex environment. *Journal of hydrological processes*. In press.
- Chebouni, G., Y. H. Kerr, V. Gond, J. Qi. 1992. Recent advances in vegetation index development. Présentée Utilisation de la télédétection spatiale pour le suivi des ressources pastorales. Niamey.
- _____. B. Monteny, J. P. Lhomme, Y. H. Kerr, E. G. Njoku. 1993. Sensible heat Flux estimation over heterogeneous terrain. Presented at the AGU, December 1993, San Francisco, CA, USA.
- _____. D. Entekhabi, J. P. Lhomme, E. G. Njoku and Y. H. Kerr. 1994. Investigation of surface heterogeneity: Derivation of effective parameters. AGU West Pacific, Hong Kong.
- _____. J. P. Lhomme, B. Monteny, J. Qi, E. G. Njoku, and Y.H. Kerr. 1994. Energy Partitioning Over Heterogeneous Surfaces, Western Pacific Geophysics Meeting, Hong Kong, Chine, EOS p. 28.
- _____. Y. H. Kerr, J. Qi, A. R. Huete and S. Sorooshian. 1994. Towards the development of multidirectional vegetation index, *Water Resour. Res.*, Vol 30, N°5, pp 1281-1286.
- _____. D. Entekhabi, M. Friedl. 1995. Development and validation of a technique to estimate turbulent flux using R.S. data. Présenté à EOS workshop on Land Surface Evaporation and Transpiration, NASA GSFC.
- _____. J. P. Lhomme, E. G. Njoku, D. Nichols, D. Stannard, S. M. Moran and Y. H. Kerr. 1995. Relationship between radiative and aerodynamic surface temperature over sparsely vegetated surfaces; International Geociencie and Remote Sensing Symposium, Firenze Itali, IEEE, pp 739-741.
- _____. D. Lo Seen, E. G. Njoku, B. A. Monteny. 1996. Examination of the difference between radiative and aerodynamic surface temperatures over sparsely vegetated surfaces. *Remote Sensing Environment*, vol 58:177-186.
- _____. D. M. Entekhabi, J.P. Field, T. Brunel, F. X. Denmead. 1997. A new approach of using TIR data to estimate surface energy balance components during FIFE and OASIS Experiments, AISH'97, Rabat.
- _____. D. Lo Seen, E. G. Njoku, J.P Lhomme, B. Monteny, Y. H. Kerr. 1997b. Estimating of sensible heat flux using radiative surface temperature. *J of Hydrology*, Hapex Sahel special issue, vols 188-189, pp 855-868.

- G. Boulet, J-P. Lhomme, Y. H. Kerr. 1997. Derivation of Effective Surface Controlling Parameters In arid and semi-arid zones: Application to Remotely Sensed Variables AISH'97, Rabat.
- Y. H. Kerr, C. Watts, O. Hartogensis, D. Goodrich, R. Scott, J. Schieldge, K. Lee, W. G. Shuttleworth, G. Dedieu and H. A. R. De Bruin. 1999. Estimation of area-average sensible heat flux using a large aperture scintillometer, *Water Resour. Res.* Vol. 35, No. 8, p. 2505-2512.
- C. Watts, J-P. Lagouarde, Y. H. Kerr, J. C. Rodriguez, J-M. Bonnefond, F. Santiago, G. Dedieu, D. C. Goodrich and C. Unkrich. 2000a. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105:215-226.
- D. C. Goodrich, M. S. Moran, C. J. Watts, Y. H. Kerr, G. Dedieu, W. G. Kepner, W. J. Shuttleworth and S. Sorooshian. 2000c. A preliminary synthesis of major scientific results during the SALSA program, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105:311-323.
- Y. Nouvellon, Y. H. Kerr, M. S. Moran, C. Watts, L. Prevot, D. C. Goodrich, and S. Rambal. 2001a. directional effect on radiative surface temperature measurements over a semi-arid grassland site, *Rem. Sens. Environ.* 76:360-372.
- Y. Nouvellon, J. P. Lhomme, C. Watts, G. Boulet, Y. H. Kerr, M. S. Moran and D. C. Goodrich. 2001b. Estimation of surface sensible heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *J. Agric. and For. Meteorol.*, 108: 55-65.
- R. Escadafal, G. Boulet, B. Duchemin, V. Simonneaux, G. Dedieu, B. Mougnot, A. Oliosio, H. Hanich. 2007a. Integrated modeling and remote sensing approach, toward a sustainable management of water resources in a semi-arid region: the SUDMED project. Accepted International Journal of Remote Sensing.
- J. C. B. Hoedjes, J-C Rodriguez, C. Watts, J. Garatuza, F. Jacob, and Y. H. Kerr. 2007b. Remote sensing based estimates of daytime area-averaged surface fluxes over contrasted agricultural patchwork in a semi-arid region in Mexico., *Agricultural and Forest Meteorology*. In press.
- Gond V., F. Cabot, A. Chehbouni, J-C. Meunier. 1997. Determination of vegetation parameters through measured and simulated AVHRR data over SALT/HAPEX-Sahel site, Accepted in *J of Hydrology, HAPEX-Sahel Speciale issue*. vols 188-189, pp 779-787.

- Goodrich, D. C., A. Chehbouni, B. Goff, B. MacNish, T. Maddock III, M. S. Moran, W. J. Shuttleworth, D. G. Williams, C. J. Watts, L. J. Hipps, D. I. Cooper, J. Schieldge, J. H. Kerr, H. Arias, M. Kirkland, R. Carlos, P. Cayrol, W. Kepner, B. Jones, R. Avissar, A. Begue, J-M Bonnefond, G. Boule, B. Branat, J. P. Brunel, L. C. Chen, T. Clarke, M. R. Davis, H. Debruin, G. Dedieu, E. Elguero, W. E. Eichinger, J. Everitt, J. Garatuza-Payan, V. L. Gempko, H. Gupta, C. Harlow, O. Hoatogensis, M. Helfert, C. Holifield, D. Hymer, A. Kahle, T. Keefer, S. Krishnamoorthy, J. P. Lhomme, J. P. Lagouarde, D. LoSeen, D. Luquet, R. Marsett, B. Monteny, W. Ni, Y. Nouvellon, R. Pinker, C. Peters, D. Pool, J. Qi, S. Rambal, J. Rodriguez, F. Sabtiago, E. Sano, S. M. Scheffer, M. Schulte, R. Scott, X. Shao, K. A. Sbuder, S. Sorooshian, C. L. Unkrich, M. Whitaker, I. Yusel. 2000. Preface paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program Special Issue, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105: 3-20.
- Huete, A. R. G. Hua, J. Qui, A. Chehbouni and Van W. J. D. Leeuwen. 1992. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. *Remote Sens. Environ.* 41:143-154.
- Leprieux, C., M. Verstraete, B. Pinty, A. Chehbouni. 1994. NOAA/AVHRR vegetation indices: suitability for monitoring fractional cover of the terrestrial biosphere, *6th International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France, Proceedings pp 1103-1110.
- Lhomme, J. P., A. Chehbouni and B. Monteny. 1994. Aggregation of energy balance controlling parameters over heterogeneous landscape. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, USA, IEEE, pp 175-178.
- _____. J. P., A. Chehbouni and B. Monteny. 1994a. Effective parameters of surface energy balance in heterogeneous landscape. *Bound. Lay. Meteorol.* 71, 297-309.
- _____. B. Monteny, A. Chehbouni, D. Troufleau. 1994b. Determination of sensible heat flux over Sahelian fallow savannah using infra-red thermometry, *Agric. For. Meteorol.* 68:93-105.
- _____. A. Chehbouni and B. Monteny. 2000. Sensible Heat Flux-Radiometric Surface Temperature Relationship Over Sparse Vegetation: Parameterizing B-1, *Boundary-Layer Meteorology* (3): 431-457.
- Lo Seen, D., E. Mouguin, A., Chehbouni B. Monteny, Y. H. Kerr, T. Lebel, and P. Bessemoulin. 1994. Modelisation du fonctionnement et observation satellitaire de la vegetation herbacée sahélienne, *Xe Journées Hydrológicas de l'ORSTOM*, Montpellier, France.

- _____ A. Chehbouni, E. G. Njoku, S. Saatchi, E. Mougin, B. Monteny. 1997. A coupled Biomass production, water and surface energy balance model for remote sensing application in semiarid grasslands. *Agric. For. Meteorol.* vol 83, No 1-2, pp 49-74.
- Merlin O. and A. Chehbouni. 2004. Different approaches in estimating heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *Int. J. Remote Sens.*, 25 : 275-289.
- _____ A. Chehbouni Y. Kerr, E. G. Njoku, D. Entekhabi. 2005. A combined modeling and multi-spectral/multi-resolution remote sensing approach for disaggregation of surface soil moisture: Application to SMOS configuration. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 43 : 2036-2050.
- _____ A. G. Chehbouni, Y. Kerr, D. Goodrich. 2006a. A downscaling method for distributing surface soil moisture within a microwave pixel: application to the Monsoon '90 data. *Remote Sens. Environ (101)*, 379-389.
- _____ A. G. Chehbouni, G. Boulet, Y. Kerr. 2006b. Assimilation of the disaggregated microwave soil moisture into hydrological modeling using coarse resolution meteorological data: a study case based on the Monsoon '90 data. *J. Hydrometeorol.* 7(6), 13081322.
- Njoku, E. G., A. Chehbouni, F. Cabot, B. Rague, K. Fleming and Y. H. Kerr. 1994. An Approach to Estimating Surface Parameters and Fluxes Using Modeling and Multispectral Remote Sensing, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, USA, IEEE, pp 187-189.
- Nouvellon, Y., M. S. Moran, D. L. Seen, R. Bryant, S. Rambal W. Ni, A. Begue, A. Chehbouni, W. E. Emmerich, P. Heilman. J. Qi. 2001. Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets Remote Sensing of Environment, Volume: 78, 1-2, 131-149.
- Pellenq, J., G. M. Saulnier, G. Boulet, Y. Kerr, A. Chehbouni and F. Habets. 2001. Water and energy balance at local and regional scale: proposal of a common tool designed for the SMOS program, 8^{ème} Symposium International Mesures Physiques et Signatures en télédétection, 8-12 janvier, Aussois, France, pp. 737-742.
- _____ G. Chehbouni, D. Entekhabi, D. Mc Maughlin. 2002. INRA, Seminaire du Département Environnement & Agronomie, Spatialisation de modeles de cultures, Toulouse, France.

- ____ J. Kalma, G. Boulet, G-M Saulnier, S. Wooldridge, Y. Kerr, A. G. Chehbouni. 2003. A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth. *J. Hydrol.*, 276: 112-127.
- Qi, J., Y. H. Kerr and A. Chehbouni. 1994. External Factor Consideration in Vegetation Index Development, *6th International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France, Proceedings pp 723-730.
- ____ A. R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni, 1994b, Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed, *Water Resources Research*, vol. 30, No. 5, pp. 1271-1279.
- Watts, C.J., A. Chehbouni, Y. Kerr, O Hartogensis, J. Rodríguez and A. Garibay 1998. comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over grass and mesquite in northwest Mexico. Special session on hydrology, American meteorological society, Phoenix, AZ pp169-170.
- ____ C. J., A. Chehbouni, J.-C. Rodriguez, Y. H. Kerr, O. Hartogensis and H. A. R. de Bruin. 2000. Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over semi-arid grassland in northwest Mexico, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105: 81-89.

Capítulo X

El Sistema de Creencias: Ensayo sobre un Método y su Herramienta para Analizar las Problemáticas de Agua y Territorio en el Caso Lerma-Chapala-Guadalajara

M. C. Michel Le Page, Dr. Ricardo Ávila Palafox, Lic. Alicia Velázquez Ornelas,
Dr. Francisco Hernández Lomelí, Dr. Alain Winckell,
M. C. Bogar Escobar Hernández,
Dr. Alexis Sierra.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	176
PROPÓSITO	177
Hipótesis	177
Preguntas	178
Acercamiento propuesto	179
Problemática	180
Medios de información	181
Esquema mental	182
Actores	183
El rol y el <i>status</i>	185
Tiempo	186
Metodología	187
Un estudio de caso: el crédito japonés (1995-1998)	189
Estructura del gráfico de toma de decisión	190
Perfiles de los actores	190
Balance de posicionamientos	192
CONCLUSIONES	192
LITERATURA CITADA	195

INTRODUCCIÓN

En un proyecto de investigación llevado a cabo entre el Instituto para la Investigación y el Desarrollo (IRD por sus siglas en francés) y la Universidad de Guadalajara se escogieron dos casos de estudio sobre un período de 10 años. Se marcó arbitrariamente el principio del análisis en una iniciativa pública. En el caso del Lerma, es la intención de organizar diferentemente la gestión; en el caso de la falta de agua (real o percibida) en Guadalajara, es la analizar la empresa que realiza el abasto de agua por el Río Verde. En el momento en que se inicia el estudio (1995), estos dos problemas ya añejos; las primeras propuestas de utilizar el Río Verde para Guadalajara se remontan en los años 40, y la necesidad de mejorar la gestión del agua en el Lerma se puede ubicar en la década de los 50, en la primera crisis contemporánea del lago de Chapala, que llevaría a la creación del Plan Lerma de Asistencia Técnica.

En la cuenca Lerma-Chapala, el funcionamiento del lago de Chapala parece ser un indicador evidente de disfunción. Cuando el nivel del lago tiene bajas visibles se observa una gran agitación local, que por diversos medios de difusión se conoce a nivel nacional e internacional. Acerca del medio, se toma en cuenta esencialmente que la cuenca vertiente (incluyendo el lago) es muy sensible a las variaciones climáticas y, de manera casi causal, las actividades humanas y las actitudes de los actores son muy sensibles a las variaciones locales de disponibilidad de agua.

Por otro lado, el conocimiento de la problemática es incompleto y repartido desigualmente, mientras que los actores están muy diferenciados y polarizados según su pertenencia espacial, sectorial y política. La gestión del agua en la cuenca se rige por una gran cantidad de incertidumbres. Algunas de ellas son mantenidas por los actores; en ese caso, se podría hablar de información estratégica, fenómeno que probablemente se puede arraigar en una especie de tradición del secreto, que estaría en conflicto con el concepto de sociedad moderna transparente. Otras incertidumbres se deben a la realidad de los actores, que no son ni omniscientes (el actor de racionalidad limitada), ni intemporales (el actor dispone de un presupuesto de tiempo poco extensible), ni mono-interesados (el actor jerarquiza sus intereses dentro de su presupuesto de tiempo).

La construcción del presente método inicia a partir de las conclusiones de un trabajo anterior (Le Page, 2000), que se intenta implementar en el caso complejo de la gestión compartida de un bien común (Ostrom, 1990) como lo es el agua (Bourtrais, 2000; Petrella, 1998; Laimé, 2003, entre otros). La gestación de la toma de decisión es entonces un tema central (Schneider, 1996; Gil, 2003; Godet, 2004), pero antes de este punto focal que ya ni parece existir (Sfez, 1992), se centra sobre la construcción misma de la problemática (Romelaer y Huauc, 2002; Rousseau, 2003), dentro de un ámbito que parece sumamente incierto por muchas razones

(Veregin, 1998; Bouglet, 2002). Finalmente, diferentes técnicas de la inteligencia artificial (Russel y Norvig, 1995; Raynor, 1999) como los sistemas expertos, los «blackboards» (Krishnamoorthy y Rajeev, 1996), la modelación multi-agente (Ferber, 1995; Wooldridge et. al., 2000; Weiss, 1999; Sun y Naveh, 2004), los gráficos, las redes bayesianas y los diagramas de influencia (basado en los trabajos de Howard & Matheson) han sido una gran fuente de inspiración.

PROPÓSITO

Hipótesis

En este ámbito de estudio, no estaría errado afirmar que la mayoría de los actores están satisfechos la mayor parte del tiempo, pero el hecho de que el *status quo* sea identificado como insatisfactorio por ciertos actores (ecólogos, medios de comunicación, sociedad no-participante) influye sobre los otros actores. El *status quo* no es una situación de inactividad, sino más bien una relación de fuerzas con resultado nulo. Dentro del marco político actual, el debilitamiento del poder central deja lugar a una constante negociación. Citando a Deloffre (2001) establece que «La negociación empieza allí donde el derecho se detiene y». «La negociación se detiene allí donde empieza el conflicto».

Por lo tanto, contrario a un acercamiento científico clásico, el objetivo no es el de reducir ciertas incertidumbres para ayudar a la toma de decisión, sino decir que la mejor decisión es la que se tomará. Esto se acerca definitivamente a Sfez (1992) pues se piensa que la toma de grandes decisiones es escasa, sino inexistente, mientras que existe una gran cantidad de pequeñas decisiones dentro de sub-ámbitos (¿sub-sistemas?) relativamente independientes¹. Los actores de estos pequeños espacios seguramente no aparecen jamás en la gran escena, pero la «suma» de sus pequeñas decisiones participa activamente para delimitar un ámbito de decisión del conjunto.

Está situación que parece inherente a la cuenca Lerma-Chapala se encuentra en las condiciones del modelo que Cohen, March and Olsen (1972) llamaron «*garbage can model*». En la presencia de las tres condiciones básicas, se tendrían «situaciones aparentemente caóticas en las cuales existen bastantes regularidades observables» (Romelaer y Huault, 2002):

¹ «Los miembros del público así como los intereses organizados encuentran ahora más útil limitar sus esfuerzos a ejercer influencia en las escuelas locales, o en sus propios proyectos domésticos o problemas ambientales (Peters, B., 2002/Governance: A Garbage Can Perspective)

-Esta afirmación refuerza la idea de subespacios de la toma de decisión, pero también hace pensar que los actores de los «pequeños» espacios indudablemente no aparecen jamás en el gran escenario. La «suma» de sus pequeñas decisiones participa activamente, sin embargo, en la evolución del sistema social.

- C1: Las preferencias son confusas: o el responsable tiene preferencias borrosas (fuzzy), o sus preferencias cambian a través del tiempo, o bien existen varios actores con preferencias que no son mutuamente coherentes.
- C2: La tecnología es confusa; la relación entre la «entrada» y la «salida» de la toma de decisión no es muy comprensible. Las consecuencias de acciones se pueden pronosticar con una precisión limitada.
- C3: La participación fluctúa: la implicación de los actores en el procedimiento de toma de decisión fluctúa; en el tiempo. Para los que participan, la intensidad de la participación varía. Puede ser que la definición de «quién puede participar» sea imprecisa. La decisión es como una etapa en la cual los agentes entran y de donde se salen bastante libremente.

Entonces, se intenta comprender cómo las prácticas y los conocimientos diferenciados de los actores influyen sobre la solución de problemáticas localizadas y cruzadas en el espacio.

Para esto, la hipótesis es que el juego de la gestión compartida, que incluye negociación, regateo y conflicto, se desarrolla dentro de una estructura bastante rígida, desde el punto de vista legal, organizacional y geográfico, marco de acción de los jugadores. Los ejes de la estructura evolucionan paulatinamente, sin poner radicalmente en cuestión la estructura global. Paralelamente, los actores cambian por su rápido aprendizaje, sus reemplazos y sus nuevas interrelaciones.

Así, la problemática de la gestión del agua se reconstruye permanentemente, según los cambios de los elementos de la estructura y de la dinámica de la acción, antes mencionados. La evolución de los ejes estructurales, los cambios en los objetos del juego, y la interacción entre la estructura y el juego crean períodos de tensión que pueden resultar, eventualmente, en una transformación radical del juego.

Preguntas

Se coincide con el acercamiento de Ferrand (1997) en su intento de ayudar a la gestión (decisión-negociación-conflicto) en el ordenamiento del territorio, del que destaca la integración de los mismos objetos (espacio, actor, intereses) en situaciones abiertas y dependientes de procedimientos reglamentados, pero se ha decidido reducir las ambiciones a la comprensión de ciertas facetas de la toma de decisión en un ambiente que puede parecer peculiar. En efecto, si bien los actores están dispuestos a sentarse ante una mesa (consejo de cuenca), ¿están realmente dispuestos a participar en el juego de la gestión compartida del recurso? Y entonces, en la práctica ¿Cuál es la naturaleza de este juego? Esta pregunta genérica conduce a las siguientes preguntas metodológicas:

- El ámbito: ¿Cuáles son los criterios para determinar los territorios y entonces los actores pertinentes?
- Los juegos: ¿Cuáles son los juegos pertinentes con respecto a esta problemática? ¿Cuáles son las modalidades del juego? ¿Cuáles son las reglas formales e informales del juego? Cuando una negociación se lleva a cabo, ¿cómo se manifiestan sus adelantos y eventuales resultados?
- Los actores: ¿Cómo se identifican y caracterizan los actores pertinentes de cada juego? ¿Cuáles son los niveles de agregación pertinentes de los actores? ¿Hay jugadores escondidos? ¿Cuál es el conjunto de variables mínimas para describirlos? ¿Cómo y a qué juega cada uno de estos actores? ¿Cuáles son sus intereses?
- Las interrelaciones entre actores o entre juegos: ¿Cuáles son las relaciones pertinentes entre los actores? ¿Jerarquía, poder, deseo? ¿Y a qué nivel intervienen? (individuo, organización).
- La interrelación ámbito-juego: ¿Cómo se describe la relación del actor con el espacio? (mandato, legitimidad, presencia, etc.) ¿Cómo reunir a los actores de los diferentes juegos para actuar eficazmente sobre el medio? Se intentará poner particular énfasis en dos puntos que parecen importantes:
 - La emergencia de grupos de actores por afinidad de creencias. Este término se define como el hecho de reconocer una cosa como cierta, verosímil o posible. Se arraiga también en el vocabulario de la inteligencia artificial: «*Un mapa cognitivo es una forma específica de representar las afirmaciones de una persona acerca de un campo limitado, como lo es un problema de políticas*».
 - El segundo punto es la posibilidad o factibilidad de actuar. Este «campo de los posibles» sería en función de los reagrupamientos evocados en el primer punto.

Acercamiento propuesto.

Varios de los autores que intentaron modelar informáticamente el actor y la acción social empiezan por subrayar la dificultad o la imposibilidad de la empresa pero de todos modos lo intentan.

El estado de la cuestión en la cuenca Lerma-Chapala exige primero la realización de un análisis de los estados sucesivos del sistema de toma de decisión, así que se dejará pendiente el interés por el acercamiento multi-agente. Para ello, se ha confrontado a un problema que se divide en dos partes: definir un método para asir a los actores y, por otra parte, analizar la evolución de la configuración del juego.

Problemática

Desde cierta perspectiva, el principal denominador de un juego es la definición de problemáticas localizadas en curso de resolución por algunos actores de la sociedad.

La problemática es un conjunto de cuestiones relativas a un tema. Es difícil de acotar exactamente lo que es el tema, y tal vez todavía más lo que son las preguntas.

El sujeto puede ser un elemento localizado del medio ambiente (el lago de Chapala, la ciudad de Guadalajara), o no estar localizado (el desarrollo sustentable, la pobreza). En un proyecto de equipamiento, el sujeto está forzosamente localizado; habrá cosas en juego² en la instalación y funcionalidad del equipamiento, e impactos sobre el medio ambiente.

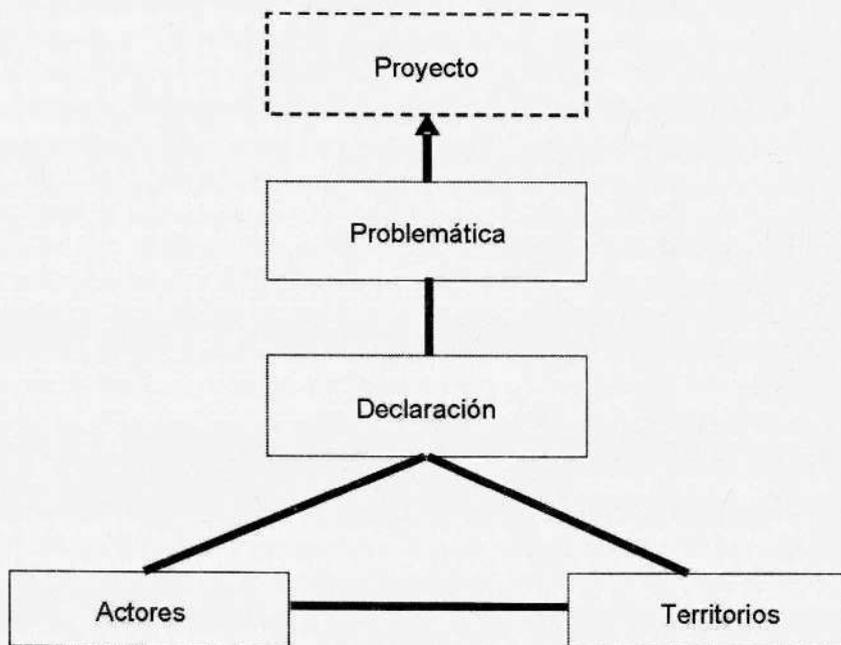


Figura 1. Concepto general de la problemática.

²La palabra francesa «enjeu» no tiene traducción directa. Se traduce por «lo que está en juego».

Por la propagación territorial inherente a los temas de agua, nuestro sujeto está localizado. Así, la gestión del agua de la ciudad determina una cantidad de territorios en relación con la ciudad misma.

Las problemáticas están ligadas por elementos espaciales cruzados y actores que tienen roles cruzados. En estos dos casos, la problemática como conjunto de cuestionamientos y problemas se renueva con el tiempo. Hoy en día, en nuestro contexto de estudio, sin lugar a dudas se puede decir que un buen número de los problemas identificados al principio no han sido resueltos, o bien han levantado otros problemas. Eso pasa, por supuesto, en toda profundización de un problema, pero la toma de decisión también implica saber hasta dónde se tiene un desarrollo suficiente de la problemática, y actuar.

Medios de información

En el marco de acción mexicano descrito en otras partes (debilitación de la autoridad, incertidumbres, preferencias confusas, transición política y democrática) (Ávila *et Al.*, 2003) los actores se expresan con relativa libertad sobre las diferentes problemáticas al gusto del día. Como se señala en el modelo del «bote de basura», los actores encuentran cierto prestigio al estar presentes en el proceso de toma de decisión, por lo que los vectores o relevos de la información son muy importantes.

Participan en dos niveles: primero, transmitiendo una imagen desde el ámbito «real» hacia el «ámbito de la problemática», ese campo restringido de la sociedad que incluye solamente a los actores interesados; después, transmitiendo del mundo de la problemática hacia la sociedad.

La transmisión de representaciones por los vectores no es anodina. Los actores y los territorios están seleccionados¹. Las representaciones simbólicas que se transmiten están filtradas, reformuladas y, por supuesto, las maneras de producir la información revisten diferentes formas.

En un primer tiempo distinguiremos lo siguiente:

- Los medios masivos de comunicación jerarquizan (primera plana, frecuencia de aparición)

Problema
Actor
Territorio

- Los medios masivos de comunicación participan en la jerarquización de los problemas en el tiempo. Ciertos problemas requieren una solución inmediata, otros pueden esperar. En la práctica, la urgencia es asumida por los actores de la problemática.

Esquema mental

Haciendo una elección metodológica importante, se piensa que los actores y los cuestionamientos forman un «campo», estructurado en redes de actores y en redes de ideas, y que la estructura se puede deducir de la lectura minuciosa de las declaraciones de prensa. De estas declaraciones, hechas por los actores, se pueden extraer algunas «ideas» recurrentes. La relación entre las ideas se identificará explícitamente en la declaración de un actor. Entonces, los acuerdos sobre ciertas ideas supondrían una simpatía entre actores. *A priori*, la redundancia de acuerdos refuerza la simpatía. La antipatía funciona de la misma manera, pero exclusivamente en asuntos polemizados.

También creemos que dos casos de estudio, espacialmente yuxtapuestos, entrarán en relación por medio de cuestiones que surgen en niveles inferiores al marco de gestión, que es la cuenca.

La red de ideas, que se llaman pomposamente «esquema mental de la problemática», no existe *a priori*; resulta de una construcción *a posteriori* que se realiza a partir de la retranscripción periodística. Esta red se parece a una red bayesiana, pero en lugar de asignar una probabilidad a los nudos, se relaciona con las declaraciones originales, las cuales remiten a los autores, fecha, periódico, etc.

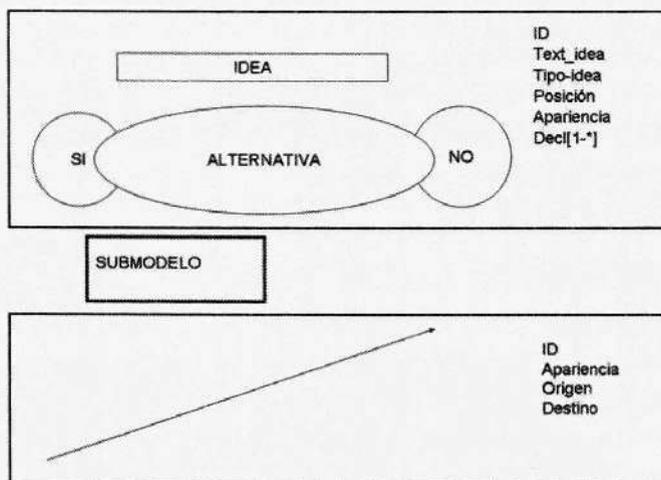


Figura 2. Las primitivas gráficas del modelo propuesto.

³Como lo denuncia Ramonet (2001) el medio informativo, y en particular la prensa, es manipulador y manipulado. Es también esclavo de las prácticas modernas de la prensa, que dan prioridad a lo inmediato y lo sensacional.

Este acercamiento tiene la ventaja de estructurar las ideas por el análisis de los elementos evocados. No es una construcción lógica de la problemática, tal como ha podido ser enunciada por los diversos interventores, ni abarca todas sus vertientes. Por ejemplo, en estos casos, los actores abordan solamente de manera superficial los asuntos de educación ambiental.

Se cree, pero quedaría por demostrarlo, que esta red no encuentra existencia en ninguno de los actores involucrados, pero podría retratar algunas de sus percepciones.

Algunos puntos importantes acerca del esquema mental son:

- Los tiempos de inicio y terminación del esquema. Tienen que ser seleccionados en función de inflexiones importantes de la problemática.
- El esquema es incremental. Las ideas aparecen poco a poco y nunca están eliminadas, aunque sí envejecen cuando ya no son mencionadas. Desaparecen de la memoria colectiva.
- Las relaciones entre las ideas tienen que ser enunciadas claramente por el actor o los textos fundadores. Las relaciones están orientadas por el principio de que una idea conlleva a otra idea.
- En la elaboración del esquema, se han escogido solamente dos tipos de nudos:
 - El concepto sencillo: una frase de pocas palabras que resume el sentido de la declaración
 - La alternativa: si el concepto no encuentra consenso entre los actores, el esquema se divide entre los pros y los contras.

Actores

En el acercamiento empírico, los actores están materializados de dos formas, el actor individual (la persona) y la organización. Aunque en realidad, el actor social puede ser despersonificado, (la persona se identificada a través de su cargo, o es un documento como una ley, un plan, etc.), los medios identifican a los actores principalmente de estas dos maneras.

La persona es llevada a jugar varios papeles o roles. Cada rol está vinculado a una organización. El rol social se define por las expectativas que la sociedad coloca en un individuo. Para nosotros, se trataría de caracterizar cada uno de estos elementos conceptuales, y de preguntarnos qué queremos saber, es decir, lo que es pertinente para nuestras problemáticas.

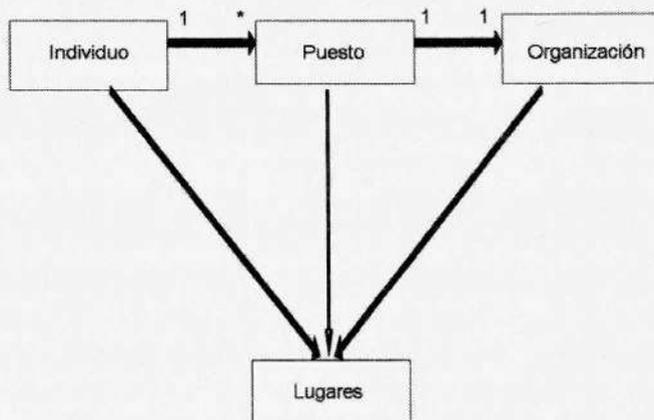


Figura 3. Descripción general de la base de datos de actores.

Empezando por los individuos. Es uno de los puntos de entrada principales, puesto que se han capturado el nombre y apellido de la persona que hace la declaración. ¿Cuáles son las características propias al individuo que podrían ser pertinentes?

- La edad de la persona informa sobre la experiencia vivida.
- La procedencia (lugar de nacimiento) puede informar sobre ciertas preferencias.
- El perfil educativo, y más precisamente la parte final, informa sobre «tendencias racionales» y las competencias adquiridas formalmente.
- El recorrido profesional podría informar sobre las distintas funciones, competencias y organizaciones por donde pasó la persona. Esta información biográfica podría ser vital para incluir la amplitud de la red social y espacial de la persona.
- El individuo dispone de recursos propios. Pero son difíciles de evaluar.
- El sistema de valores: en la literatura correspondiente, encuentra que es propio de un individuo, o de una colectividad (la cultura de empresa). Son maneras de ser, reconocidas como ideales. También parece difícil informar este dato sistemáticamente, aunque es posible separar grandes categorías, como el pensamiento ingenieril, tecnócrata, etc.

Las organizaciones (institución, grupo, partido político) representan el segundo nivel de captura de información acerca de los actores. Los actores individuales casi siempre están identificados por los periodistas como pronunciándose para una

organización. Algunas veces, incluso la declaración es anónima, procede directamente de un informe emitido por una organización.

Entre la sociología organizacional y el análisis estratégico, se encuentra un gran número de referencias para describir una organización; se retendrán los siguientes puntos:

- El tipo (económico, político, sociedad civil)
- El sector (agua, agricultura)
- El territorio. Para una organización, el territorio reviste varios sentidos. Puede ser un territorio de intervención, un territorio administrativo, un territorio a conquistar. Lo importante es reconocer el espacio formal donde la organización juega un papel. También sería pertinente saber cuál es la proporción del territorio de la problemática que es cubierta por el espacio de la organización (importancia territorial relativa de la organización con respecto a la problemática) y, por otra parte, la proporción del territorio de la organización que es cubierta por el espacio de la problemática (importancia de la problemática para la organización desde una perspectiva territorial). Desde este enfoque, la definición de los niveles territoriales de la problemática es muy importante.
- La edad y tamaño (Mintzberg, 1978), pues a mayor edad, un comportamiento más formal, y a mayor tamaño, una estructura más elaborada, donde las tareas son más especializadas, las unidades están más diferenciadas y su componente administrativo más desarrollado. Mintzberg define otras características de las organizaciones que no se han implementado; son las dimensiones del medio (estabilidad, complejidad, diversidad y hostilidad) y el poder, que expresa un grado de control externo sobre la empresa. No obstante, se ha conservado la relación jerárquica entre los entes.

El rol y el *status*

En la teoría funcionalista, la noción de rol se diferencia de la de *status*. El rol es lo que se supone que la persona hace, el *status* es la posición que la persona ocupa, lo que se supone que es. El rol es una función fijada, prescrita con la ambición de realizar un conjunto de acciones, un trabajo. Cada rol es asignado a una organización social, la familia, la empresa, etc. La manera como el individuo ejecuta su rol es percibida por los otros como adecuada o no, apropiada o no. No obstante, no puede haber consenso, porque si el rol social está bien definido en su centro (objetivos, misiones principales), más se aleja hacia su periferia, más se encuentran misiones secundarias, opcionales. Así, la demás gente realiza una comparación entre el concepto que se hace del rol y el rol percibido.

En la teoría interaccionista, el rol corresponde más a una actitud que se toma en una situación dada, que es actuada y adaptada a medida que se desarrolla el juego. La adaptación del rol da pie a confusión tanto para el actor como para los demás, que tienen que identificar con qué «personaje» están interactuando. Evidentemente, la noción de rol se torna sumamente interesante cuando un individuo se ve forzado a jugar varios papeles a la vez. Así, se encuentran varias situaciones, como el conflicto individual, o el reforzamiento del poder. La sucesión del individuo en diferentes roles durante su vida, y más particularmente sobre el tiempo abarcado por la ventana de estudio, debería también permitir identificar posibles relaciones entre actores.

Cabe recalcar que en las diversas asistencias en el consejo de cuenca o talleres, se ha percatado de que el rol, o por lo menos la esfera a la cual pertenece la persona, está subrayado por las vestimentas y los vocabularios peculiares.

El status social equivale a la noción de prestigio asociada a una posición social. El status socioeconómico combina el ingreso, el nivel educativo, el prestigio, la notoriedad. De la misma manera que para el rol, la evaluación del status por los demás se hace en función de escalas de valores personales propias.

Para estas necesidades, se intentará trabajar tomando el método más comúnmente adoptado, es decir, definir el *status* y después los roles que corresponden al individuo. Para volver operacionales tales conceptos con relación en los cuestionamientos, es indispensable relacionarlos no a la sociedad en general, sino a la «sociedad de la gestión del agua», si es que existe.

Tiempo

Se ha insertado en varios niveles. En la problemática, hemos notado que hay momentos en que las opiniones convergen. Son los momentos culminantes en los que la problemática se puede resolver en algunas partes o disolver en diferentes partes. Se nota que también existe una segunda dimensión temporal exógena a la problemática, pero interiorizada por los actores. Se trata en particular de las fechas electorales, los plazos, y algunas fechas de cumplimiento de compromisos. En el análisis de los medios de comunicación, se nota que el tiempo parece acelerarse o densificarse, las declaraciones se multiplican, ciertos actores expresan literalmente que el tiempo presiona, que hay que adelantar, tomar decisiones.

La noción de urgencia se vuelve a encontrar en una situación de crisis, después de una catástrofe, cuando se trata de encontrar soluciones rápidamente a los problemas presentes. Salvar vidas y reestablecer las redes urbanas son urgencias que no parecen prestarse a discusión (a pesar de que en una crisis se establece de inmediato una jerarquía entre los problemas). En la toma de decisión, la urgencia

es forzosamente una construcción social. Es urgente resolver el problema ahora; si no, existe el riesgo de no poder resolverlo en los términos previstos por el actor.

Metodología

La lectura de la realidad descansa sobre el trabajo de análisis de las declaraciones en la prensa. De una manera clásica, se llega a la construcción de un archivo tabulado. El trabajo se distribuye después en dos fases: la identificación de los actores, y la construcción del esquema mental.

La primera fase se desarrolla de la manera siguiente. Seleccionando territorios, problemáticas y ventana temporal de estudio, se diseñan los criterios para un corpus de notas en ciertos periódicos seleccionados. En este caso, los periódicos tienen la característica de ser eminentemente regionales, y de expresar dos visiones territoriales diferentes (Correo de Guanajuato vs rotativos de la región de Guadalajara). La Figura 4 muestra este proceso.

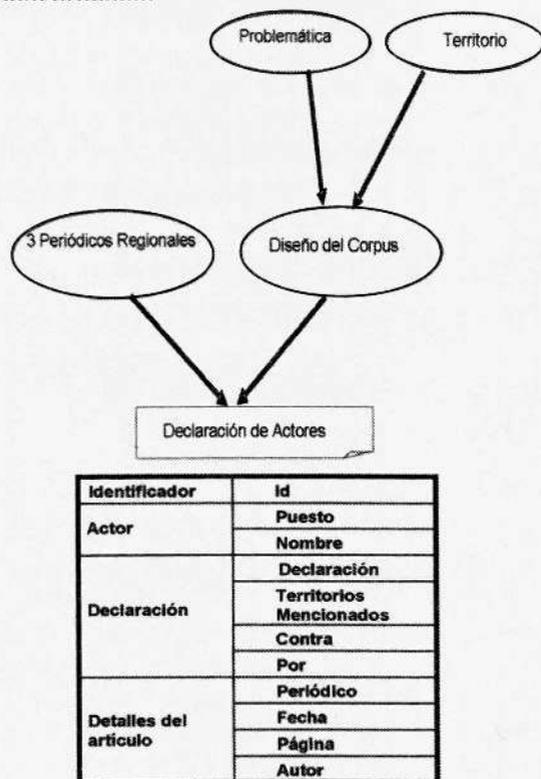


Figura 4. La creación de la base de datos de actores.

Para la construcción del esquema mental, el uso de las declaraciones periodísticas muestra varias dificultades:

- El concepto de «idea» debe atenerse a las siguientes características:
 - Una frase corta (de preferencia menos de 12 palabras)
 - Una frase afirmativa
 - Un fraseado sencillo con sujeto-verbo-predicado
- Las declaraciones pueden ser largas, y es difícil separar una o varias ideas sencillas. Sobre todo al principio del trabajo, es necesario leer con detenimiento las notas para extraer los conceptos clave y sus interrelaciones.
- Los actores políticos manejan la llamada «*langue de bois*», es decir, el arte de disfrazar su verdadera opinión en declaraciones consensuales; o su corolario, la «*langue de coton*» (Steiner, 2002), es decir, el arte de opinar sobre lo que sea.
- Cada uno de los actores juega su propia estrategia. Para esto, ciertas presiones aparecen con manifestaciones de tipo temporal. Por ejemplo, declarando que los resultados de un peritaje no están listos y enseguida, que hay urgencia de llevar a cabo el proyecto.
- La identificación de las ligas entre las ideas se debe hacer para cada nota.
- A medida que crece el modelo es necesario detener el proceso para revisar ideas duplicadas o parecidas, así como la inteligencia del gráfico.

El examen de las declaraciones muestra que son de varios tipos:

- Los postulados son principios considerados como verdad, que sirven de base para la reflexión.
- Las consecuencias de los postulados. Por encadenamiento y asociación de ideas se observa la construcción de la reflexión de los actores. Estas reflexiones –que en los periódicos se basan en pocos datos técnicos– llevan generalmente a proponer una acción.
- Las propuestas de acción pueden, por supuesto, transformarse después en acciones reales.
- Las acciones mismas. Tienen un inicio bastante preciso (se inicia la construcción, el trasvase, el estudio), El final de la acción no siempre es tan preciso (inauguración vs funcionamiento). Acciones sin terminar pueden resultar en la reacción de los actores. Por lo tanto, sería importante integrar en el gráfico la noción de criterio temporal de resolución. Por otro lado, la envergadura de las acciones no es percibida de la misma manera por todos los actores.

- Los eventos, que son independientes de las acciones humanas (el clima por ejemplo).
- Los reclamos de información aparecen bajo dos formas: las que exigen «así nomás», y que no esperan forzosamente una respuesta, y las otras, que exigen una respuesta (encuesta de factibilidad, estudios hidrológicos, etc.).
- Los dilemas, elecciones entre dos o varias alternativas que presentan ventajas e inconvenientes.

Un estudio de caso: el crédito japonés (1995-1998)

Poco después de su investidura, el gobernador de Jalisco promocionó un préstamo de 500 millones de dólares para resolver varios problemas relativos a la gestión del agua en Guadalajara. A lo largo de los tres años que se extiende el episodio del crédito japonés, se han compilado 599 declaraciones (El Informador y Siglo XXI), de las cuales 533 fueron utilizadas para la construcción del gráfico.

En un estudio más extenso, se aborda la estructura del gráfico, su evolución en el tiempo, el mapa mental de los actores preeminentes, así como las relaciones territoriales a través de las declaraciones. Aquí, primero se limita a mostrar el análisis global de la estructura y la desconstrucción de uno de sus ejes principales. En seguida, se muestra el mapa mental de los principales actores tal como se han auto-descrito en la prensa.

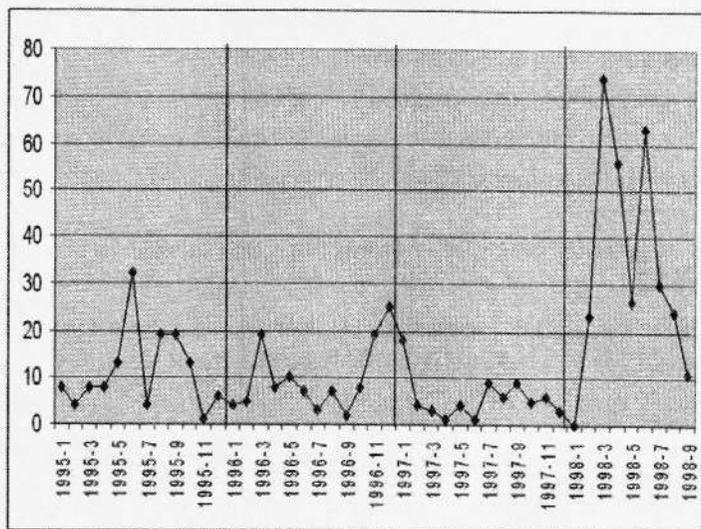


Figura 5. Evolución del número de declaraciones.

Estructura del gráfico de toma de decisión

El análisis del gráfico permite reconocer que la toma de decisión gira alrededor de tres preguntas principales:

a)

- ¿Guadalajara tiene un problema urgente de abastecimiento de agua? (Fig. 6).
- ¿El crecimiento de Guadalajara es descontrolado?
- ¿Hay problemas importantes en la red de agua potable?
- ¿La población consume/gasta agua de manera irresponsable?
- ¿Chapala está en situación de gravedad?

b)

- ¿El SIAPA (Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado) tiene una administración deficiente?
- ¿Es necesario privatizar al SIAPA?
- ¿Se tiene y existe la posibilidad de que aumenten las tarifas?

c)

- ¿Son necesarias las inversiones en obras para saneamiento y abastecimiento de agua?

Pregunta final:

- ¿Tomar un crédito de 500 millones de dólares?
- ¿El financiamiento japonés podría tener varias ventajas?
- ¿Es necesario reformular la iniciativa para que se apruebe el crédito japonés?
- ¿Existen problemas para llegar a un consenso en el Congreso por intereses encontrados?
- ¿Son necesarias las inversiones en obras para saneamiento y abastecimiento de agua?

Cada una de estas facetas de la problemática tiene cargas históricas y funcionales que los actores intentan resolver en el fuego de la acción.

Perfiles de los actores

La herramienta permite generar el perfil de los actores pertinentes. Su examen muestra claramente la amplitud del perfil, sus ideas centrales así como su

congruencia en el tiempo. La comparación de un perfil particular con el mapa de la problemática muestra también los temas que no aborda el actor.

Otro asunto interesante es la posibilidad de comparar los posicionamientos de actores, y así cuantificar agrupamientos por afinidad u oposición de ideas. En el asunto del crédito japonés se identifica perfectamente el grupo gubernamental, y la aparición tardía de un grupo opositor. Sin embargo, los dos grupos coinciden en distintos puntos.

Común a cualquier proceso de toma de decisiones, las iniciativas oficiales para la resolución al problema del agua presentan impulsores y detractores.

El balance de posicionamientos

El programa ofrece la posibilidad de observar fácilmente aspectos específicos del debate. Las ideas están organizadas en cinco submodelos. Se puede cuantificar y visualizar fácilmente la importancia que toman los asuntos de Chapala y del SIAPA, mientras que otros puntos no menos fundamentales casi no forman parte de la discusión: Guadalajara tiene un problema urgente de abastecimiento de agua, cuáles son las alternativas de financiamiento y las soluciones propuestas. Una reducción del gráfico, de los argumentos hacia los nodos de alternativa, permite también una simplificación de la problemática.

CONCLUSIONES

La resolución del sistema de opiniones consiste entonces en vislumbrar cuáles fueron los ejes y meandros por donde circuló el proceso de toma de decisión colectivo. En el presente episodio se resolvió hacia una negativa del Congreso de Jalisco al proyecto del Ejecutivo Estatal. Más allá de las minorías o mayorías en el Congreso, el sistema de opiniones muestra importantes zonas de incertidumbre:

- La supuesta necesidad de incrementar el abastecimiento de Guadalajara
- El porvenir del lago de Chapala articulado alrededor de su cantidad y calidad de agua
- El futuro del SIAPA a través de la comprobación de su ineficiencia, la solución a su deuda, etc.

A pesar del grado poco avanzado de la parte analítica, el software desarrollado ha permitido una primera aproximación de la problemática tal como la habían enunciado los mismos actores visibles en la prensa. La herramienta sigue en desarrollo actualmente, y parece prometedora para realizar varios análisis basados en posicionamientos de actores y teoría de grafos. La asociación a una base de datos de actores permite realizar fácilmente los agrupamientos, y observar el mapa

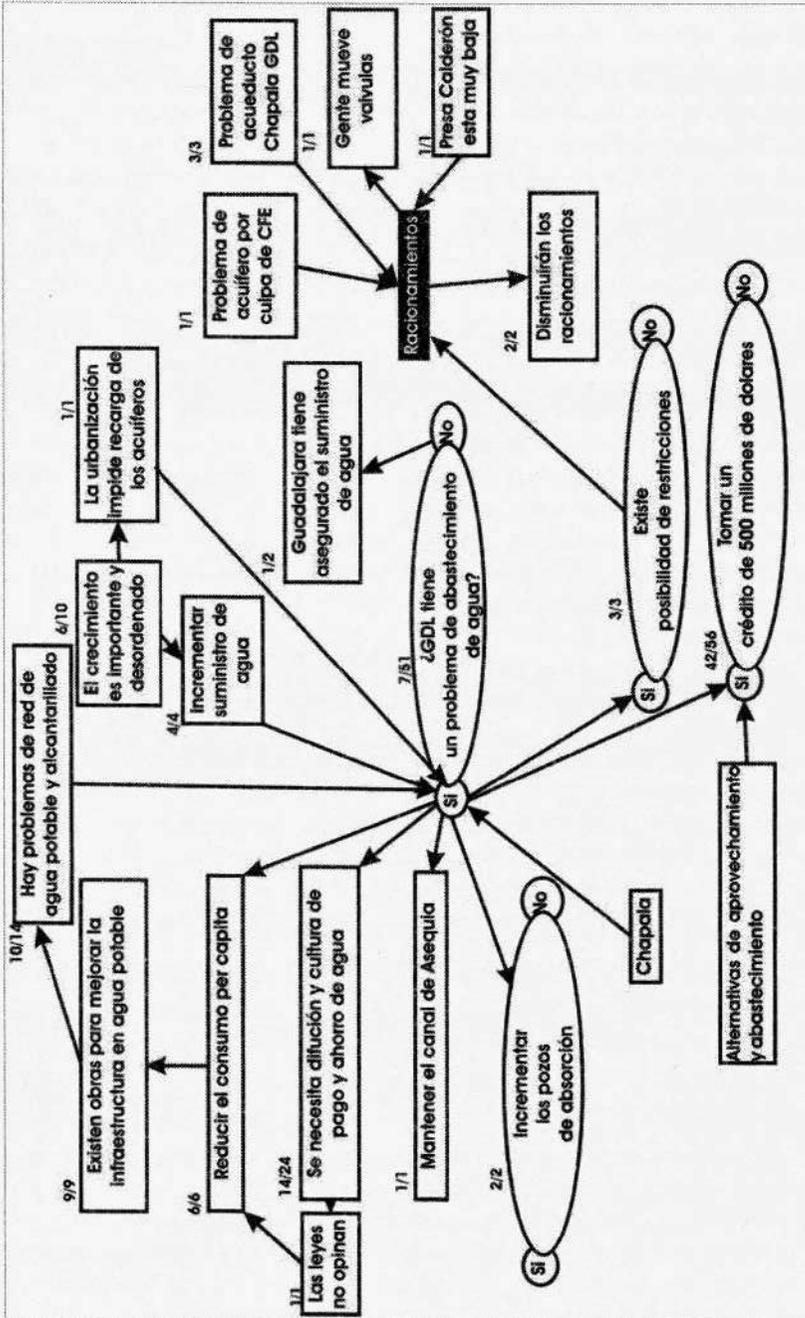


Figura 6. Ejemplo de la estructura de la argumentación alrededor del problema de abastecimiento de agua de la ciudad de Guadalajara.

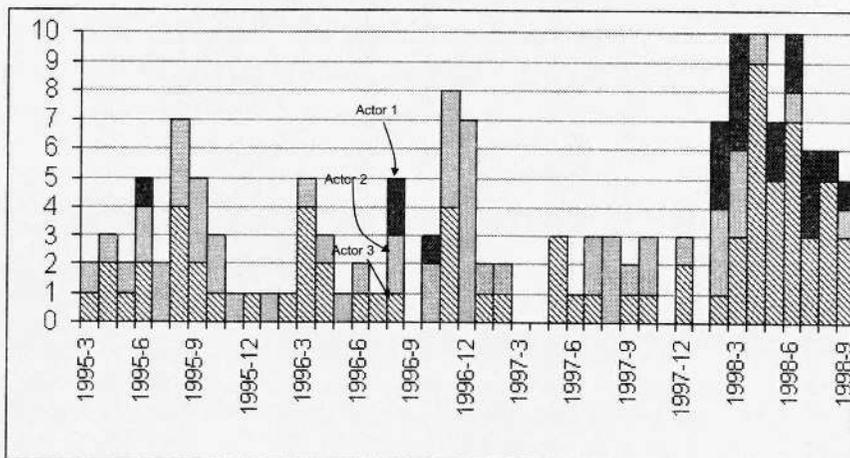


Figura 7 Número de declaraciones de los principales personajes gubernamentales.

mental de este agrupamiento. La introducción de la variable tiempo en algunos puntos de la información (declaración, actor, rol, organización) permite generar recortes temporales. Por fin, la herramienta ofrece la capacidad de calificar el grado de simpatía/antipatía entre actores, así como su evolución en el tiempo.

No obstante, la extrema reducción del número de entidades gráficas (idea y alternativa) parece un obstáculo. Antes de seguir más adelante en los análisis, parece necesario implementar dos puntos. El primero es la realización de ciertas propuestas expuestas en el gráfico, a través de una acción transformadora. La realización no es un evento intemporal, sino que tiene una duración. El problema consiste en que, si bien las declaraciones expresan el inicio de la realización, su finalización no reviste siempre la misma publicidad. En un primer momento, se interpreta que este hecho (el inicio de una acción) es un éxito político, pues se decidió una acción común, mientras que su terminación parece más bien de carácter técnico.

Por otra parte, el método periodístico conlleva una gran imprecisión sobre las cifras. Estas imprecisiones pueden tener como fuente tanto al declarante como al periodista, o su transcripción. El hecho es que existe una cierta variabilidad sobre las cifras utilizadas (la cantidad a la cual se eleva el crédito, los volúmenes de agua almacenada, etc.). Estas imprecisiones no impiden la comprensión del sistema, pero agregan un cierto ruido que se debe clarificar.

Finalmente, los arcos dirigidos entre los nodos necesitan conllevar más sentido. Por el momento portan únicamente el sentido de consecuencia (la flecha

sale del nodo) o argumento (la flecha llega al nodo), pero se les debería de agregar la noción de oposición entre ideas, es decir, que los arcos tendrían un signo (+ o -).

Aunque no haya aparecido claramente en este papel, siempre se ha tenido presente que la gestión compartida del recurso agua tiene que integrar la relación espacial al proceso de toma de decisión. Si se abordan por separado actor y territorio, lo cual es la percepción natural, se tendrá relaciones actor-espacio del tipo:

- El actor actúa sobre el territorio.
- El actor está representado sobre el territorio.
- El actor recibe (crea) informaciones acerca del territorio.

Estas relaciones no son permanentes; nacen, desaparecen y tienen altibajos. Pero se anclan en la memoria del actor. De hecho, se puede considerar que, para el actor, el espacio existe únicamente a través de relaciones pasadas, que llevaron a la construcción de una representación del espacio. En este nivel se puede preguntar si el individuo tiene tantas representaciones de un objeto como roles social. Una respuesta un tanto brutal sería que el individuo se crea una representación de síntesis. También se debe preguntar si el espacio existe solamente como una localización de los problemas que los roles del individuo tienen que resolver. El espacio ya no es solamente el substrato de la acción, sino la unión de problemáticas. Los problemas se superponen al territorio y, en consecuencia, las relaciones y los tipos de relaciones se multiplican. Esta es la base del concepto de complejidad.

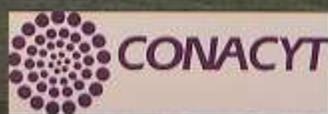
Si el espacio vive dentro de cada uno de los actores, está forzosamente fragmentado y mal conocido, y las herramientas y métodos exhaustivos (SIG) no corresponden a la inmensa incertidumbre (y tampoco a su contrario, ¡el gran conocimiento!) que languidece dentro de cada uno.

LITERATURA CITADA

- Ávila, R., B. Escobar, W. Winckell, M. Le Page. 2003. El Desarrollo: Pieza clave en la gestión del agua en Guadalajara, en *El Futuro del agua en México* pp. 233-255, Universidad de Guadalajara, El Colegio de México, UCLA Program on Mexico, 2004, México D. F.
- Bourtrais. 2000. Gestion sociale locale, dans *Du bon usage des ressources renouvelables*, Latitude 23, IRD éditions, 472p.
- Bougllet, T. 2002. Incertitude et environnement: essai de représentation et analyse des choix publics, Thèse pour obtenir le grade de docteur en Sciences Économiques de l'Université de Paris I, 206p.
- Deloffre, G. 2001. Introduction à la négociation, www.univ-nancy2.fr/ICN/.
- Ferber, J. 1995. Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective, Interéditions, 522p.
- Ferrand, N., G. Deffuant. 1997. Aide à la gestion des conflits en aménagement du territoire. Approche multi-agents et modèles cognitifs des acteurs, Cemagref-LISC, rb6-97.doc.
- _____. 1997. Modèles multi-agents pour l'aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire, Thèse présentée à l'Université Joseph Fourier pour l'obtention du doctorat spécialité informatique.
- Gil R., F. et Barrasa N., A. 2003. Comunicación en las organizaciones pp. 321-353 in *Introducción a la psicología de las organizaciones* (Gil Rodríguez, Carlos Maria Alcocer), Alianza editorial, 597p.
- Godet, M. 2004. Manuel de prospective stratégique, 2^e édition, Dunod, 267p.
- Krishnamoorthy CS, S. Rajeev. 1996. Artificial Intelligence and Expert Systems for Engineers, CRC Press, CRC Press LLC.
- Laimé, M. 2003. Le dossier de l'eau, pénurie, pollution, corruption, Editions du seuil. 400p.
- Le Page, M. 2000. Expansion urbaine à la frontière du premier monde, mémoire de DESS, université de Montpellier.
- Mintzberg, H. 1978. Structure et dynamique des organisations, Editions d'Organisation, traducido de *The structuring of Organizations: a synthesis of the research*, Prentice Hall, 434p.
- Ostrom, E. 1990. El gobierno de los bienes comunes, la evolución de las instituciones de acción colectiva, Universidad Nacional Autónoma de México,

- 2000, traducido de *Governing the Commons, the evolution of institutions for collective action*, Cambridge University press.
- Peters, G. 2002. *Governance: a garbage can perspective*, Institute for advanced studies, Vienna, 32p.
http://www.ihs.ac.at/publications/pol/wp_84.pdf
- Peters, B. 2002. *Governance: A Garbage Can Perspective*. *Governance: A Garbage Can Perspective*.
- Petrella, R. 1998. *Le manifeste de l'eau, pour un contrat mondial*, Editions Labor, 150p.
- Ramonet, I. 2001. *La tyrannie de la communication*, Folio actuel, 290p.
- Raynor, W. 1999. *The International Dictionary of Artificial Intelligence*, Glenlake Publishing Co, 295p.
- Romelaer, P. and I. Huault. 2002. *The relevance of the Garbage-Can Model*, Université Paris IX Dauphine, laboratoire Crepa, working paper n°80, 33p
<http://www.dauphine.fr/crepa/ArticleCahierRecherche/CahierdeRecherche/cahier80.pdf>
- Rousseau, L. 2003. *Comparaison de points de vue pour la formulation de problèmes*, Thèse présentée pour l'obtention du titre de Docteur en informatique de l'Université Paris Dauphine, 235p.
- Russell, S. J. and P. Norvig. 1995. *Artificial Intelligence, a Modern Approach*, Prentice Hall, 946p.
- Schneider, D. K. 1996. *Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle*, Thèse présentée à la Faculté des sciences économiques et sociales de l'Université de Genève, 440p.
- Sfez, L. 1992. *Critique de la décision*, Presses de la fondation nationale des sciences politiques, 572p.
- Steiner, B. 2002. *De la langue de bois à la langue de coton: les mots du pouvoir*, pp193-208, in *Les mots du pouvoir, sens et non sens de la rhétorique internationale*, Nouveaux cahiers de l'IUED #13.
- Sun, R. and I. Naveh. 2004. *Simulating Organizational Decision-Making Using a Cognitively Realistic Agent Model*, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 7, no. 3, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/3/5.html>.
- Veregin, H. 1998. *Data Quality Measurement and Assessment*, GIS Core Curriculum, NCGIA.

- Weiss, G. 1999. Multiagent Systems, a Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence, Massachusetts Institute of Technology, 585p.
- Wooldridge, M., N. Jennings, D. Kinny. 2000. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 3, 285-312, Kluwer Academic Publishers.



CENID-RASPA
Km 6.5 margen derecha canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.
Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.
Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34
e-mail: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx