

Capítulo 10

¿Y si el bosque desaparece?

Luc Descroix, José Luis González Barrios, Raúl Solís Moreno

¡Lluvia y bosque! Estos elementos se encuentran ligados sin discusión, dado que entre más lluvia mayor densidad de vegetación natural. Las zonas boscosas frecuentemente se asocian a las montañas, las unas y las otras continuamente se encuentran ligadas, aunque en otras épocas pudieron parecer desagradables e incluso insoportables (Corbin, 2001). En la actualidad, al buscar en Europa medios naturales vírgenes o al menos poco perturbados por la actividad humana, esta búsqueda se dirige en forma intuitiva hacia la montaña, es decir hacia las zonas de lluvia. La propia lluvia ha sido objeto de diferentes percepciones en distintas épocas: han existido períodos, como la edad romántica, donde la lluvia era recibida como beneficiaria y purificadora; o bien, a juicio de Alain Corbin (2001), cuando la lluvia era menospreciada en los años 1950 – 1960 y en ese entonces *"nadie se arriesgaba a reconocer que una lluvia fina podía ser muy agradable en ciertos momentos del año"*. La percepción de la lluvia varía aún más dentro del espacio: en Europa, en algunas ocasiones se vuelve desagradable cuando los días grises y lluviosos se prolongan por varias semanas, llegando a provocar inundaciones en las planicies; por el contrario en el Sahel, en África, es unánimemente bien recibida que hasta los niños se precipitan corriendo bajo las gotas de lluvia; o al norte de México, ya sea en el desierto Chihuahuense o en la Sierra Madre Occidental, donde la lluvia siempre es portadora de buenas noticias.

De manera científica, una de las preguntas que se han hecho las sociedades y los expertos desde hace mucho tiempo, a través de las diferentes épocas y en medios muy diferentes es: *¿Los bosques pueden hacer llover?*

Las relaciones entre la distribución espacial de las lluvias y la localización de las formaciones vegetales son objeto de debates históricos, los cuales no se pueden realizar sin recordar los que protagonizaron los especialistas, desde mediados del siglo XIX a finales del XX, sobre el papel que tiene el bosque en la formación de los escurrimientos y las causas de la erosión actual en los Alpes del Sur.

La propia presidencia de México ha lanzado una "Cruzada Nacional por los Bosques y el Agua", lo que demuestra que el debate no está cerrado. Antes de analizar los resultados de trabajos realizados sobre el papel que tiene el bosque en la localización de las lluvias, se propone partir de las reflexiones o frases emitidas por los responsables mexicanos de la gestión del agua y/o de los bosques.:

Estas reflexiones provienen de un discurso del gobierno del estado de México que, en enero del 2002, declaró que era necesario terminar con la tala indiscriminada de los árboles dado que cada árbol adulto "produce" 8,000 litros de agua al año; al mismo tiempo, el secretario del medio ambiente del gobierno Mexicano, parecía convencido de que reforestando las montañas se puede encontrar el agua necesaria para abastecer los acuíferos y las presas.

Las reflexiones también provienen de una encuesta realizada en el año 2000 por la periodista Sandra Gambino en la Sierra Madre Occidental, titulada "*La Sierra se está secando*". En esta encuesta se pueden leer las impresiones de los habitantes de la Sierra y de los responsables políticos:

- un habitante de la población "La Ciudad" (sobre la carretera Durango – Mazatlán):
-la intensa sequía que padece la Sierra es ocasionada por la tala indiscriminada de los bosques, sale un camión con madera cada tres minutos, se están terminando los bosques y el futuro de los niños está en peligro ya que los pinos generan agua-,
- un chofer maderero: *-se continúa extrayendo madera como antes, sin control ya que no hay policías adentro de la Sierra, y en la mayoría de los casos, los formularios son falsificados-* y más adelante añade *-ahora hace más calor y ya no llueve, los árboles están más secos que nunca-*,
- un gerente de aserradero: *-nos traen madera todos los días; no nos interesa saber de donde viene, lo que nos interesa es producir tablas todos los días para satisfacer la demanda-*, y añade *-el precio de la madera que se entrega a los aserraderos es muy bajo, representa solo el 40 por ciento del precio del mercado declarado-*,

- el representante de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural del estado de Durango: *-el bosque es vital para generar agua, los volúmenes de lluvia que se precipitan en la Sierra disminuyeron drásticamente, provocando una grave sequía-* y señala, *-el primer factor que provoca la sequía es la tala inmoderada del bosque, la cual jamás ha estado regulada-*, posteriormente añade *-la disminución de las lluvias en la parte alta de la cuenca del río Nazas tiene consecuencias directas en La Laguna, y esto se ha agravado en los últimos años-* y finaliza diciendo *-las condiciones de sequía de la Sierra son catastróficas, el paisaje que antes era verde hasta el mes de abril, ahora es seco y sin vida, el verde ha desaparecido y en su lugar todo es color amarillo, café u ocre-*,

- la esposa de un campesino: *-cada vez hace más calor, la tala del bosque ha provocado que ya no llueva más-*.

La periodista concluye: *-el panorama es desolador, la tala inmoderada, la ausencia de un programa de reforestación y de una cultura patrimonial, hacen que el principal pulmón del norte de México este en proceso de "desinflarse"; poniendo en peligro las regiones como La Laguna y los estados de Sinaloa y Nayarit, que dependen de las aguas generadas en la Sierra de Durango-*.

El vínculo entre la disminución de la lluvia y el incremento de la temperatura a causa de la deforestación es una idea compartida en México y África. Estas mismas reflexiones son expresadas en Senegal, donde la savana arbórea se convirtió, en 60 kilómetros al interior de la misma, en una estepa muy pobre cuando a los años de sequía se agregó, en 1992, la decisión del Fondo Monetario Internacional (FMI) de eliminar el subsidio del gas. Así, el consumo de carbón se incrementó rápidamente, provocando un retroceso de 60 km de la vegetación arbustiva o arbórea.

Un estudio muy interesante y completo sobre las relaciones entre el bosque y el agua es la obra de Andreassian (2002), que en su tesis, comienza por presentar los antecedentes de la percepción y las investigaciones científicas sobre el vínculo entre el bosque y la hidrología en general (objeto de sus investigaciones y de su doctorado), y también de la relación entre la vegetación y la lluvia.

La visión histórica de la autorregulación vegetación – lluvia

El vasto panorama histórico trazado por Andreassian (2002) comienza en la antigüedad. Sin embargo, solo se mencionarán algunas de las apreciaciones más recientes. Así, Bernardín de Saint Pierre (1787), señala en relación a la Isla de Francia (Isla de Mauricio): *- La atracción vegetal de los bosques se relaciona con la atracción metálica de los picos*

de sus montañas, de tal forma que un campo vecino situado en lugar descubierto, a menudo presenta falta de lluvia, mientras que en el bosque llueve casi todo el año-. Pocos años después, Rauch (1801) declara: *-se sabe, ya no se puede dudar, que los apacibles bosques que forman el más hermoso ornamento de la naturaleza, ejercen el más poderoso imperio sobre todos los meteoros ácueos-*. En 1819, el prefecto de Basses-Alpes (actualmente provincia francesa "Alpes de Haute Provence") propagó la siguiente idea: *-las altas montañas ejercen una atracción sobre las nubes, y esta atracción es la mayor posible cuando las cumbres son boscosas; entonces las nubes no solamente son atraídas, sino retenidas-* (Dugied, 1819). Para justificar la necesidad de reforestar las montañas, el silvicultor Baudrillart (1823) afirmó: *-la cantidad de agua que caía antes en Francia era mucho más considerable de lo que es actualmente-, debiéndose esto –a la disminución de las montañas boscosas y a la destrucción del bosque que cubría sus cumbres-, y agrega, -la destrucción de los bosques, en particular sobre las montañas, da por resultado la disminución de las aguas, la irregularidad de las lluvias y el cambio de temperatura-*. Algunos años más tarde, un agrónomo Boussingault (1837), concluye de sus trabajos: *-las grandes superficies deforestadas disminuyen la cantidad de aguas que escurren en el territorio de un país, y es imposible decir si esta disminución se debe a una menor cantidad anual de lluvia, a una mayor evaporación de las aguas pluviales, o a estos dos efectos combinados-*.

Formado en la escuela de puentes y caminos (*Ponts et Chaussées*) al igual que Saint Pierre y Rauch, Dausse (1842) estaba convencido que *–el hombre tiene el poder de cambiar en algunos años, por deforestación, un clima húmedo en un clima seco-*. Más escéptico, Becquerel (1865) plantea una serie de cuestionamientos que según él quedan por aclarar, entre los cuales menciona: *-¿Los bosques ejercen una influencia sobre las cantidades de agua que se precipitan y sobre la distribución de las lluvias a través del año, así como sobre los regímenes de las aguas escurridas y las aguas de manantia?-*. Él refuerza así la opinión de Surell, ingeniero de puentes y caminos que afirmaba en 1841: *-esta influencia del bosque sobre el clima no se demuestra rigurosamente, y se apoya más en presunciones que en observaciones positivas-*. No obstante, en 1878, el silvicultor Matthieu, estudiando los datos pluviométricos de tres estaciones situadas una en el bosque de Hayas, cerca de Nancy, la segunda en sus linderos y la última a 20 km situada en la planicie, pone de manifiesto que la estación situada en la zona agrícola sólo recibe el 80 por ciento de las precipitaciones de las dos estaciones forestales. Para los silvicultores, esta diferencia es la prueba irrefutable que el bosque atrae la lluvia (Andreassian, 2002). Este autor señala una clara diferencia de percepción entre una escuela "forestal" y una "agrupación de ingenieros". Este hecho, que el bosque hace llover, es corroborado en la escuela de los silvicultores en 1909 por Jacquot que indica *-lo que se estableció en Nancy, se corrobora indudablemente por todas las observaciones inscritas en Rusia, en Alemania, Austria, Suiza y hasta en la India-*. Por el contrario, fue refutado completamente por Vallès (1857) que afirmó: *-es en terrenos desnudos, más que sobre los bosques, que la lluvia cae con mayor abundancia-*. Entre estas dos fechas, Cézanne (1872) ya había resuelto las dos contradicciones afirmando: *-los bosques son incapaces de modificar sensiblemente la cantidad de agua pluvial que cae en la cuenca de un río-*.

La reciente evolución de esta cuestión

Más recientemente, la intervención de los medios electrónicos de cálculo permitió recurrir a modelos capaces de tomar en cuenta la posible retroacción o autorregulación de la vegetación sobre las lluvias. Sin embargo, se realizan observaciones, cada día en mayor número, aunque las referencias son en general más europeas o africanas que mexicanas o norteamericanas, poniendo de manifiesto que en esas regiones la cuestión está en el centro de las preocupaciones científicas.

Nuevamente los silvicultores hacen hincapié en el papel que tienen los macizos forestales en la génesis de la lluvia. Así, Martin (1950) puso de manifiesto, para la pequeña comunidad de *Landes de Gascogne* enclavada al interior del más grande macizo forestal europeo, que entre los períodos de observación de 1782-1818 y de 1891-1900, alrededor de este macizo forestal de reciente constitución, la precipitación media anual habría pasado de 709 mm a 938 mm, mientras que ésta no mostró cambios en Toulouse y sólo aumentó 6 por ciento en París. El aumento de la pluviosidad sobre la región reforestada de *Landes* sería pues del orden de 25 por ciento. No obstante, esto plantea el problema de la fiabilidad del equipo de medición utilizado en ambos casos. Más al norte, el Jutland aún boscoso en el siglo XVI, aunque las guerras eliminarían posteriormente los bosques de encino, sufrió de sequías de primavera durante el siglo XIX afectando sus cultivos. Esto motivó la constitución de la "sociedad de *Landes*" en 1866, con la finalidad de reforestar la región con pinos con la esperanza de humedecer el clima de primavera (Bavier y Bourquin, 1957). La sociedad y el Estado Francés reforestaron 118,000 hectáreas de mesetas y 40,000 hectáreas de cimas; después de lo cual, las precipitaciones registradas en los meses de abril, mayo y junio habrían pasado de 100 mm en 25 días de lluvia hacia 1870, a 150 mm en 35 días de lluvia, mejor distribuida y de menor intensidad.

Más recientemente, Poncet (1981) concluye que *-los macizos forestales retardan los vientos hasta una altura sobre el suelo que corresponde a la capa límite de turbulencia de mayor circulación atmosférica, reforzada por la aspereza aerodinámica de las altas frondosidades. Este fuerte frenado actúa en primer lugar sobre la evapotranspiración real de la cubierta forestal y sobre el régimen térmico. Pero este frenado de los vientos, favorable a los intercambios térmicos con la cobertura del suelo, propicia también las condensaciones y facilita las precipitaciones-*. No obstante, este autor es uno de los pocos en citar estudios en los cuales demuestra que las zonas de bosque tienen coeficientes de escurrimiento anuales superiores a zonas deforestadas, ambas en igualdad de condiciones.

Los universitarios aportaron su contribución a estas investigaciones; así, para el historiador Thompson (1980), *-la idea según la cual el bosque incrementa las lluvias no es nueva. De acuerdo a las narraciones que Fernando Colón realizara de su padre, Cristóbal*

Colón, éste sabía -por experiencia- que la desaparición del bosque que cubría las islas Canarias, Madera y Azores habría reducido la niebla y la lluvia. Del mismo modo, pensaba que las lluvias que se producen en Jamaica y en las Antillas después de mediodía, eran la consecuencia del exuberante bosque de las propias islas.- Por otra parte, el paso de una masa de aire de una meseta desnuda a un bosque implica, según Escourrou (1981), una disminución de la velocidad del viento y por lo tanto una ascendencia del aire que refuerza la intensidad de las lluvias: -La reforestación permitió, en algunos lugares, aumentar las lluvias en más de 6 por ciento y esta acción es sobre todo sensible durante los años secos. La destrucción del bosque denso en África puede tener consecuencias incalculables cuando se sabe que las lluvias son mayores del 30 por ciento, la humedad relativa del 15 por ciento y las temperaturas más bajas de 15°C en las zonas forestales-.

En los Alpes del Sur, la precipitación de los meses de verano (junio a agosto incluidos), disminuyó de 0.5 a 8 por ciento según los registros entre 1881 y 2000 (Descroix, 1994). Esta tendencia no se observa en los registros de los macizos que se sabe que fueron intensamente reforestados (*Ventoux-Lure, Préalpes de Digne*).

En las regiones tropicales, la deforestación pudo desempeñar un papel importante. Costa de Marfil presentó una sobreexplotación de sus recursos forestales desde hace una treintena de años; ahora bien, el bosque tropical húmedo presenta una evapotranspiración anual próxima a la de los océanos tropicales (1500 a 2500 mm.). Esta destrucción del bosque ¿No equivale a alejar el Sahel de las zonas de suministro de vapor de agua?. Por lo que se refiere a las sequías del Sahel posteriores a 1968, Labeyrie (1985) consideraba que *-el pastoreo excesivo, que va creciendo a medida que la población de la región del Sahel aumenta, contribuye sin duda a volverlas cada vez más intensas y cada vez más fatales-*.

Corresponde a Charney (1975) mostrar, en el contexto todavía de la región del Sahel, el papel de la vegetación en el desencadenamiento de la convección por medio del albedo: *-un incremento del albedo de 14 al 35 por ciento al norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), provoca un desplazamiento de ésta de varios grados hacia el sur, y una disminución del 40 por ciento de la precipitación en el Sahel durante la temporada de lluvias-*. Algunos años después, Anthes (1984), citado por Diongue (2001), realizó un estudio de las observaciones y teorías sobre la capacidad de la vegetación para reforzar las precipitaciones convectivas. Establece tres principales mecanismos: i) incremento de la energía estática húmeda vinculada a una disminución del albedo; ii) creación de circulaciones de gran escala asociadas a las heterogeneidades; iii) reforzamiento de la humedad atmosférica debido a un incremento de la evaporación.

Estos dos autores estudian los fenómenos atmosféricos y trabajan a escala regional. A escala local, se hace hincapié en el papel de los microclimas. Así, se puede leer en un

manual de hidrología y riego dedicado a las regiones tropicales: *-El hombre no puede actuar directamente sobre los microclimas. Por el contrario, puede pretender organizar sus tierras con el fin de modificar, de crear o de mantener los microclimas-* (Dupriez y Leener, 1990). La Figura 10.1 muestra los efectos positivos que puede tener la cubierta vegetal sobre el microclima de una región. Parecería que el papel de los setos, arbolados y árboles aislados es muy importante en la regulación de las temperaturas, tanto en la superficie del suelo como en la capa límite. Por el contrario, los efectos a mezo o macro escala son casi imposibles de probar. Esto le permite a Bruijnzel (1990), investigador de la UNESCO, decir: *-numerosos trabajos realizados en los climas tropicales húmedos y templados, generalmente condujeron a la conclusión de que el bosque no tiene consecuencia sobre la precipitación a nivel local, y que los resultados que indicaron lo contrario, carecen casi todos ellos de robustez en los datos en los cuales se basan-*.

En este caso, es necesario observar que los trabajos más destacados sobre la autorregulación vegetación-lluvia conciernen a los grandes macizos forestales tropicales y a los sectores más lluviosos. Esto se debe a que tanto en hidrología como en precipitación, el impacto de la vegetación es más estudiado y más destacado en estas zonas que en las regiones de poca precipitación.

Algunos datos observados

Los vínculos de la lluvia con la vegetación se encontraron siempre presentes en el razonamiento de los científicos. No obstante, algunas observaciones impulsaron las investigaciones hacia la existencia de una autorregulación. Rabin *et al.* (1990) utilizó imágenes de satélite e información *in situ* que le permitieron observar que la convección se formaba, en primer lugar, sobre una zona con un suelo a mayor temperatura (por ejemplo un campo de trigo) que sobre zonas adyacentes cubiertas de vegetación "verde". Los gradientes de flujo inducidos por los contrastes de superficie pueden ser atenuados dentro de la capa límite por turbulencia si las zonas heterogéneas tienen dimensiones pequeñas. Taylor y Lebel (1998) demostraron que *-bajo ciertas condiciones de superficie, se establece una correlación positiva entre las precipitaciones ocurridas en un determinado día y las precipitaciones ocurridas previamente. Estas condiciones se presentan cuando las combinaciones de lluvias anteriores han modificado los tipos de evaporación local. Los gradientes de lluvia en los acontecimientos subsiguientes tienden a persistir, reforzando la configuración de humedad de los suelos-*. Esto muestra el importante papel que tienen las condiciones de superficie. Además, Philippon y Fontaine (2002) así como Fontaine *et al.* (2002), establecieron que las temporadas de lluvias más húmedas en el Sahel se encuentran precedidas de inviernos (boreales), durante los cuales el contenido de agua en los suelos es anormalmente elevado sobre las regiones del Sahel y Sudan.

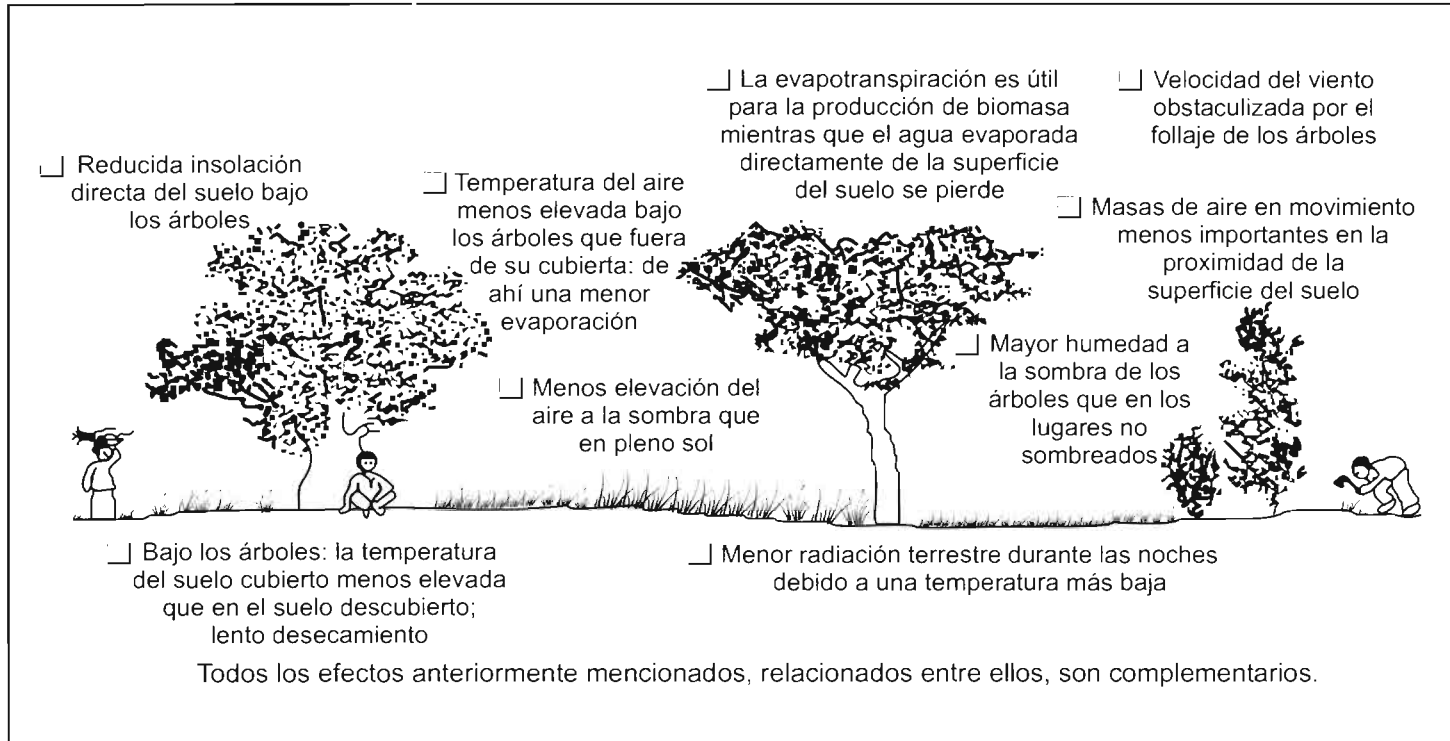


Figura 10.1. Efectos positivos de la vegetación sobre el microclima de una región (de acuerdo a Dupriez y Leener, 1990).

Cualquiera que sea el argumento, la duda persiste; Lavabre y Andressian (2000) afirman: *-el bosque tiene un impacto significativo en el clima local (menor albedo, mayor evapotranspiración). A la escala regional, a pesar de algunos resultados de investigación en el sentido de un efecto positivo sobre la pluviosidad, es difícil sin embargo concluir sobre un efecto cualquiera de la cobertura forestal-*

Muchas conclusiones basadas en los resultados de los modelos

Las autorregulaciones vegetación-clima son difíciles de determinar. Por ello, cada vez más se recurre a los modelos de simulación (con el riesgo de construir un modelo para responder a una pregunta científica y que éste sea desarrollado, desde un principio, para responder en el sentido buscado). Con respecto a la recirculación del agua, Cosandey y Robinson (2000) concluyen: *-las estimaciones varían mucho de un modelo a otro. Henderson-Sellers (1987) compara los resultados de 4 de ellos: la modificación de las precipitaciones que resultarían de la deforestación del Amazonas variaría desde un incremento de 75 mm (Lettau et al., 1979) a una reducción de 200 a 230 mm (Henderson-Sellers y Gornitz, 1984), o de 100 a 800 mm según las zonas (Wilson, 1984 citado por Henderson-Sellers, 1987). Lean y Warrilow. (1989) mencionan que la lluvia disminuiría un 20.3 por ciento, los escurrimientos 11.9 por ciento y la evapotranspiración de 27.2 por ciento. Dickison et al. (1986) encuentran también una reducción de la evaporación (hasta de 50 por ciento) y de las precipitaciones (20 por ciento). Un modelo propuesto por Shukla et al. (1990) proporciona estimaciones similares-*. En el mismo macizo forestal, se determinó que *-el efecto de la deforestación es un recalentamiento del suelo y un incremento de la convergencia de humedad inducida por un refuerzo de la ZCIT (Polcher y Laval, 1994)-*. Otros modelos permitieron definir que: *-la evaporación a partir del océano Atlántico Tropical, del África del Oeste y del África Central contribuyen 23, 27 y 17 por ciento respectivamente a las lluvias sobre el África del Oeste-*; otros autores hacen variar esta proporción de 10 al 90 por ciento, utilizando modelos diferentes (Gong y Eltahir, 1996). Zeng et al. (1999) señalan que al considerar la autorregulación "humedad del suelo – vegetación", se reproducían mucho mejor los valores de precipitación que al considerar estos elementos por separado. Por otra parte, el mismo equipo de investigadores observó que: *-cuando el modelo combinado (atmósfera-tierra-vegetación) es forzado por algunos factores como la temperatura de la superficie del océano SST por sus siglas en inglés (Sea Surface Temperature), una autorregulación positiva de los cambios vegetales conduce al incremento del gradiente espacial entre las regiones desérticas y las regiones forestales, a costa de las zonas de savana. Cuando la variación interanual de la SST se toma en cuenta, la variabilidad climática tiende a reducir la precipitación y la vegetación de las regiones más húmedas, y a aumentarlos en las zonas más secas, amortiguando la transición desierto-bosque-* (Zeng y Neelin, 2000). Asimismo, en África del Oeste se ha constatado que: *-cambios de la circulación general desempeñaron un papel importante en el desencadenamiento de la sequía en la región del Sahel (1968 – 1995), aunque otros mecanismos pueden ser responsables de la persistencia de las condiciones secas. Un Análisis de Componentes Principales (ACP) centrado en la velocidad vertical de los vien-*

tos indica un cambio importante en la circulación general antes de la sequía, durante los años 1960. Cambios similares de circulación general en los años 1970 no estuvieron acompañados de un retorno a las condiciones húmedas- (Long et al., 2000).

Por último, Shinoda y Gamo (2000) y Shinoda (2000) apreciaron la existencia de correlación entre una vegetación más provista de lo normal (altos valores del índice de diferencia de vegetación normalizado NDVI por sus siglas en inglés *Normalized Difference Vegetation Index*), y los valores de temperatura sobre la capa límite de convección inferior a lo normal; este último hecho conduce a un gradiente de temperatura altitudinal superior y en consecuencia a una mejor convección y una mayor precipitación. Estos autores ponen de manifiesto que las lluvias llamadas de los "mangos", que se producen en el Sahel algunos meses antes de la temporada de lluvias, pueden también causar esta mejora de la convección. Esta retroacción entre vegetación y precipitación explica en gran parte el mecanismo de la desertificación.

Un ejemplo de búsqueda de relación rugosidad-precipitación en la Sierra Madre Occidental

Como se mencionó en el Capítulo 5, la relación lluvia-vegetación es muy grande a causa de la estratificación de las formaciones vegetales en función de la precipitación media anual. Esta fuerte relación impide encontrar, por análisis factorial, cualquier relación opuesta que muestre autorregulación o retroacción de la vegetación sobre la distribución espacial de las lluvias. A continuación, se tratan de interpretar los resultados de trabajos de campo efectuados durante una misión en noviembre 2002. En esta misión se visitaron los sitios de un gran número de estaciones climáticas con registros de lluvia localizadas en la Sierra Madre Occidental.

Para ello, se seleccionaron una treintena de estaciones distribuidas, de norte a sur, en una superficie superior a los 400 km² y donde, por otra parte, las condiciones (a excepción del tipo de forestación) fueron en general las mismas.

Es necesario precisar que el número de estaciones se redujo considerablemente; de 312 estaciones a cerca de treinta. Por lo general esta cifra se considera como el límite de una población estadísticamente representativa. Sin embargo, no fue posible encontrar un mayor número de estaciones en condiciones homogéneas. Así, se seleccionaron solo aquellas estaciones situadas a nivel del bosque y en las altas mesetas (altiplanicies) de la Sierra Madre Occidental, de tal modo que el relieve, la altitud, la rugosidad y el tipo de formación vegetal fueran grosso modo los mismos. De esta manera, las estaciones presentan condiciones uniformes en bosque de pinos, entre 2200 y 3000 msnm, y sobre la

zona de altiplanicies riolíticas de la Sierra. La lista de las estaciones, señaladas en la Figura 10.2, también se presenta en el Anexo 1.

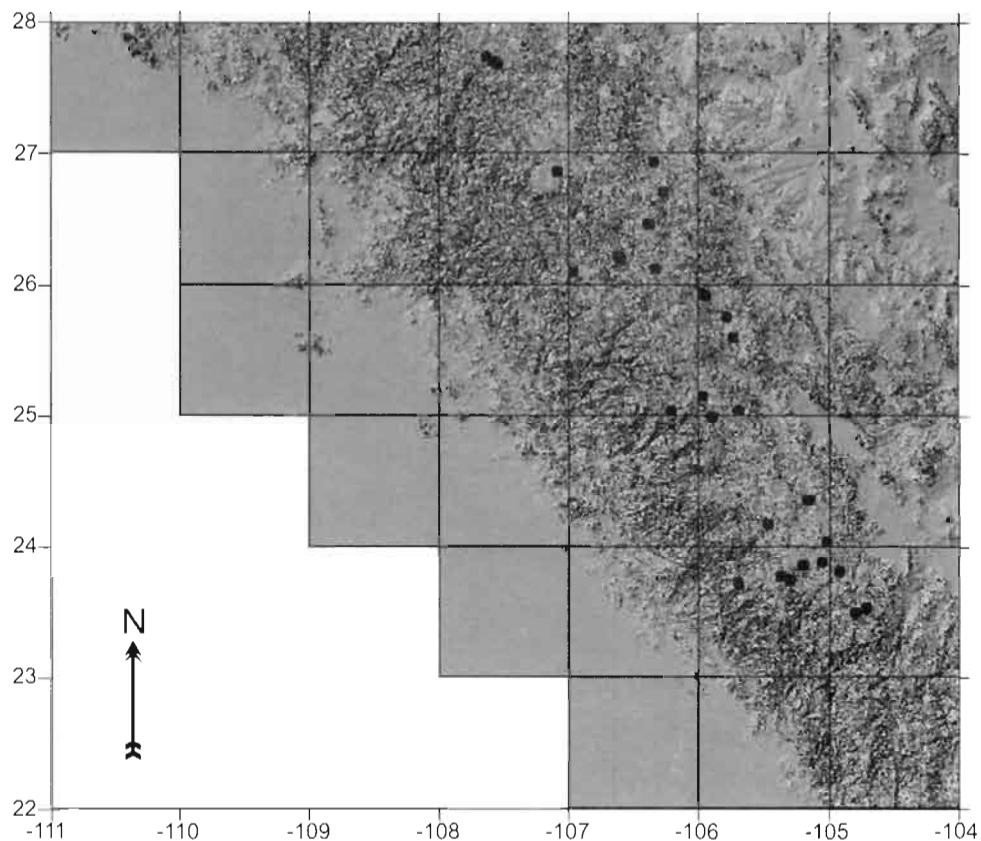


Figura 10.2. Relieve de la zona estudiada (según el modelo numérico de elevación mexicano con malla de 90 m) y la ubicación de las estaciones.

Hipótesis iniciales

Se consideró que los elementos del paisaje con mayores posibilidades de ejercer una influencia sobre la distribución espacial de las precipitaciones serán los siguientes:

- la precipitación media (PMO), principal variable dependiente; la desviación estándar de las lluvias anuales (PET) y su coeficiente de variación (PCV);

- el relieve:

- la altitud (ALT) de la estación; utilizando los modelos digitales de elevación en una superficie cuadrada de 36 km² en torno a la estación, la altitud media (AMO); la desviación estándar de sus altitudes (AET) y su coeficiente de variación que se considerará como la rugosidad de esta superficie (ACV);

- las masas vegetales:

- densidad bajo bosque y al descubierto:(IDF e IDC) y rugosidades respectivas (IRF e IRC).

La mayoría de las estaciones se sitúan en lugares descubiertos (no es aconsejable la instalación de un pluviómetro al interior del bosque), se consideró la densidad y la rugosidad de las masas vegetales tanto en las áreas descubiertas como en los bosques que las circundan;

- la superficie de las áreas descubiertas (SUPC).

También se tomó en cuenta la distancia al océano Pacífico (DIO), la latitud (LAT) y la longitud (LONG) de la estación, y la rugosidad del suelo en torno a la estación (IRS).

Las siglas indicadas entre paréntesis, utilizadas en el análisis de componentes principales, se muestran en el Cuadro 10.1.

Clasificación de las variables por ACP

Se procedió, una vez elaborada la matriz de correlación (Cuadro 10.2), a realizar un ACP (Análisis de Componentes Principales) para clasificar las variables y establecer las posibles redundancias implicadas entre ellas.

Cuadro 10.1. Variables consideradas en el análisis de componentes principales (ACP).

Sigla	Nombre de la variable
PMO	Precipitación media anual
PET	Desviación estándar de las precipitaciones anuales
PCV	Coefficiente de variación de las precipitaciones anuales
ALT	Altitud de la estación
AMO	Altitud media de una superficie cuadrada de 36 km ² entorno a la estación.
AET	Desviación estándar de las altitudes de la superficie cuadrada de 36 km ² .
ACV	Coefficiente de variación considerado como la rugosidad de esta superficie
DIO	Distancia al océano Pacífico
LONG	Longitud en UTM (proyección Universal Transversal de Mercator)
LAT	Latitud en UTM (proyección Universal Transversal de Mercator)
IDC	Índice de Densidad Vegetal Descubierta
IDF	Índice de Densidad Vegetal Forestal
IRC	Índice de Rugosidad Vegetal Descubierta
IRF	Índice de Rugosidad Vegetal Forestal
IRS	Índice de Rugosidad del Suelo
SUPC	Superficie Descubierta

Cuadro 10.2. Matriz de correlación de las variables.

	PMO	PET	PCV	ALT	AMO	AET	ACV	DIO	LONG	LAT	IDC	IDF	IRC	IRF	IRS	SUPC
PMO	1.00															
PET	0.81	1.00														
PCV	-0.48	0.11	1.00													
ALT	0.49	0.45	-0.25	1.00												
AMO	0.33	0.29	-0.15	0.84	1.00											
AET	0.02	0.02	0.11	-0.08	0.00	1.00										
ACV	-0.07	-0.04	0.18	-0.26	-0.21	0.97	1.00									
DIO	-0.69	-0.32	0.72	-0.43	-0.29	-0.14	-0.05	1.00								
LONG	0.07	-0.20	-0.43	0.06	0.03	0.43	0.39	-0.56	1.00							
LAT	-0.35	0.00	0.63	-0.23	-0.16	-0.33	-0.27	0.82	-0.93	1.00						
IDC	0.20	0.08	-0.21	0.13	0.07	0.20	0.16	-0.36	0.24	-0.31	1.00					
IDF	0.53	0.48	-0.25	0.57	0.44	-0.17	-0.27	-0.48	-0.03	-0.16	0.19	1.00				
IRC	-0.02	-0.16	-0.22	-0.04	0.03	0.23	0.19	-0.14	0.39	-0.34	0.66	0.02	1.00			
IRF	0.06	-0.08	-0.32	0.28	0.27	-0.02	-0.07	-0.45	0.41	-0.44	0.27	0.47	0.40	1.00		
IRS	-0.27	-0.12	0.31	-0.19	-0.09	-0.03	-0.02	0.35	-0.48	0.50	-0.10	0.11	-0.25	-0.15	1.00	

Se consideraron cuatro componentes principales cuyos valores se indican en el Cuadro 10.3. Todos ellos explican el 73,4 por ciento de la varianza de la población.

Cuadro 10.3. Valores correspondientes a los 4 primeros componentes del ACP.

	Valor Propio	% Total Varianza	Acumulado Valor Propio	Acumulado % agregado
1	4.8614	30.3839	4.8614	30.38
2	3.3637	21.0236	8.2252	51.41
3	2.0076	12.5475	10.2328	63.96
4	1.5080	9.4256	11.7409	73.38

La clasificación de las variables aparece en las Figuras 10.3 (ejes 1 y 2) y 10.4 (ejes 3 y 4). El primer espacio de las variables representa más del 51 por ciento de la varianza explicada.

- el primer eje está representado principalmente por la rugosidad del relieve (ACV), su desviación estándar (AET), el índice de rugosidad de las áreas descubiertas (IRC), la superficie de estas áreas (SUPC) y la desviación estándar de las lluvias anuales (PET). La superficie descubierta se correlaciona de manera negativa con la lluvia media anual, lo que conduce a pensar que grandes claros podrían constituir zonas donde la rugosidad disminuye, implicando una disminución relativa de las precipitaciones.

- el segundo eje es definido esencialmente por la distancia al océano (DIO), el coeficiente de variación interanual de las precipitaciones (PCV) y el índice de rugosidad del bosque (IRF).

Los dos primeros se correlacionan de manera negativa con la lluvia (PMO).

Por el contrario, la lluvia se correlaciona en forma positiva con el índice de densidad y el índice de rugosidad del bosque (y en menor grado con las áreas descubiertas); esto parece ratificar el papel que ejerce la rugosidad de las formaciones vegetales sobre la generación de las lluvias.

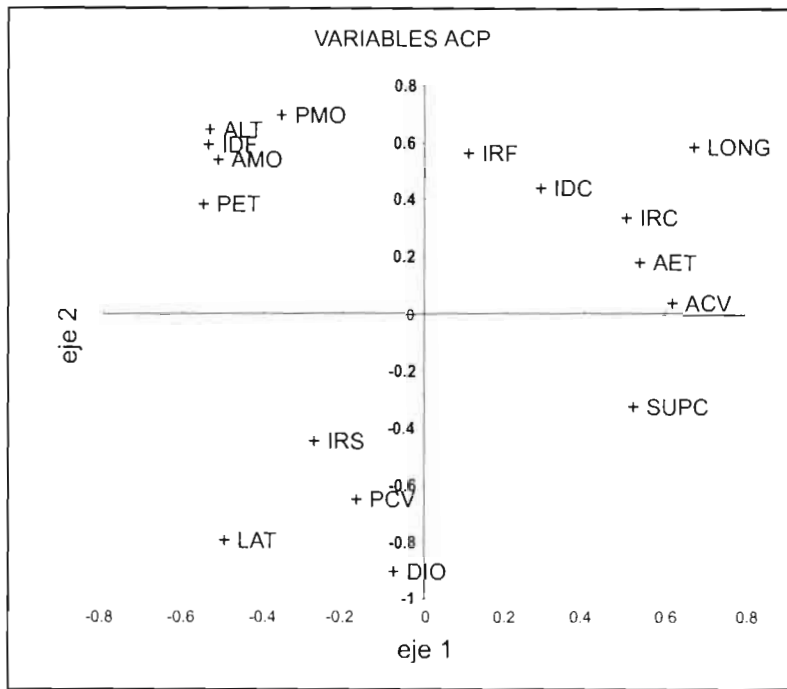


Figura 10.3. Espacio de las variables en función a los dos primeros componentes.

El segundo plano de las variables (ejes 3 y 4, Figura 10.4) explica el 22 por ciento de la variación de las observaciones.

- el eje 3 es determinado claramente por la precipitación media (PMO) que, de manera ilógica, se correlaciona en forma negativa con todos los índices de rugosidad (IRF e IRC) y densidad (IDF e IDC), siendo el índice de rugosidad del bosque el de mayor peso. Esto hace más relativas las observaciones anteriores, donde la matriz de correlación (Cuadro 10.2) pone de manifiesto que no hay correlación entre la lluvia y la rugosidad de la cubierta. Estos resultados se oponen a los obtenidos anteriormente (Descroix *et al.*, 2001), donde se observó una clara correlación entre la lluvia y la masa vegetal; esta última expresada con el valor de NDVI para diferentes superficies en torno a la estación. Sin embargo, en la relación lluvia-NDVI de este estudio se presenta el problema de correspondencia opuesta, donde la vegetación de una región depende de la precipitación que recibe.
- el eje 4 no establece casi ninguna información relativa a la lluvia, encontrándose muy cerca del eje 3 para determinar una correlación con el cuarto componente. Este eje se encuentra definido esencialmente por la rugosidad del relieve (ACV y AET).

La contradicción de la información proporcionada por los ejes 2 y 3 muestra los problemas de interpretación de los componentes principales. Se pueden obtener correlaciones opuestas según las variables analizadas, esto debido al papel complementario que juega cada una de las variables en relación a las otras.

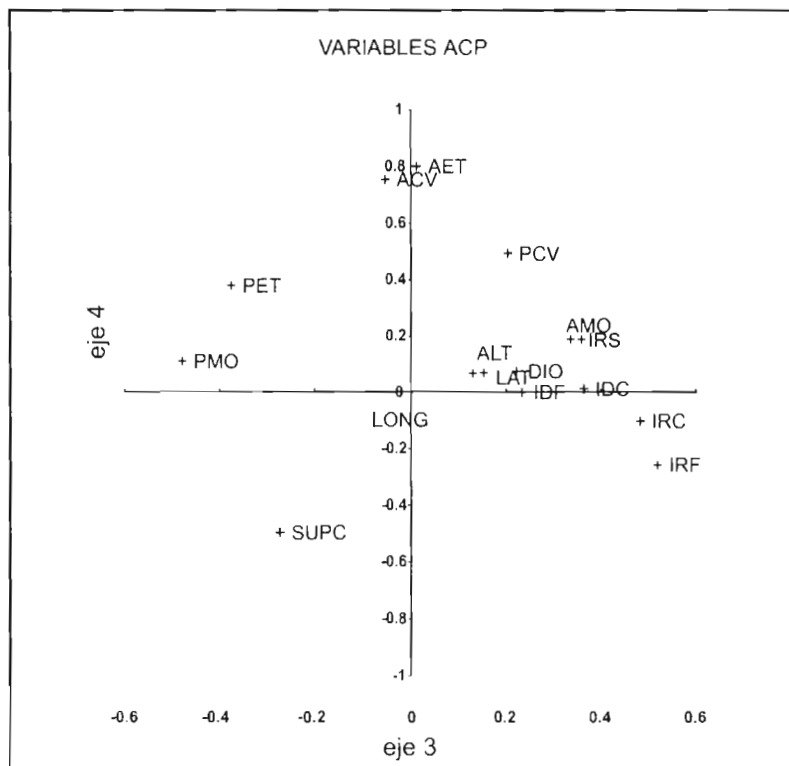


Figura 10.4. Plano de las variables según los ejes 3 y 4.

Clasificación de las estaciones por ACP

Los individuos considerados en la población estadística son las estaciones climáticas con registros de lluvia, las cuales se tomaron en cuenta en este análisis. Las intercorrelaciones de estas estaciones, representadas por los componentes 1 y 2, se muestran en la Figura 10.5. Los valores propios y porcentaje de variación explicado son los mismos que para las variables.

Se constata en la Figura 10.5 que las estaciones se agrupan en 3 subconjuntos claramente definidos:

- el grupo 1 de las estaciones situadas más bajo en altitud (2000 a 2250 msnm), sobre todo incluidas dentro del estado de Durango (excepto Balleza -8005- y Llanitos -8320) y que por lo tanto tienen una precipitación media anual moderada (550 a 700 mm.);
- un grupo 2 de estaciones, esencialmente situadas en el estado de Chihuahua, a una mayor altitud (de 2400 a 3000 msnm) pero dónde la precipitación también es moderada (600 a 800 mm.) como consecuencia al internarse en el continente; son las estaciones más distantes de la costa, y sobre todo las más septentrionales, por lo tanto más distantes del flujo del monzón americano;
- finalmente el tercer grupo reúne las estaciones más lluviosas, éstas también situadas en altitud (2300 a 2600 m) y sobre las zonas de mesetas más próximas al Pacífico y también las más meridionales, más expuestas al monzón.

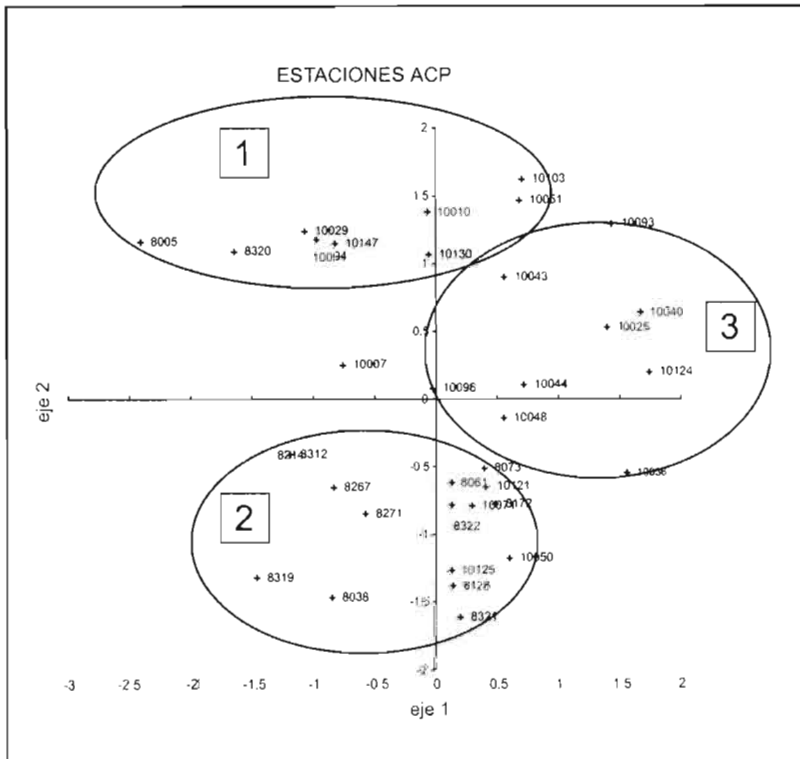


Figura 10.5. Espacio de los individuos (estaciones) según los dos primeros componentes del ACP.

En conclusión, este estudio referente a un número reducido de estaciones permite poner de manifiesto que si los factores locales como la aspereza del relieve y la vegetación, desempeñan un papel sobre la distribución de las precipitaciones, este papel es menor con relación a los factores regionales y globales como la altitud, la latitud, la longitud y la distancia en relación al litoral.

Bibliografía citada

- Andreassian, V. 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de doctorat de l'Université Paris 6, 275 p.
- Anthes, R. 1984. Enhancement of convective precipitation by mesoscale variations in vegetative covering in semiarid regions. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23: 541-554.
- Baudrillart, J-J. 1823. *Traité Général des Eaux et Forêts, chasses et pêches*, 1. Chez Arthus Bertrand, Paris, 816 p.
- Bavier, J.B. et Bourquin, A. 1957. *Défense et illustration de la forêt*. Payot, Lausanne.
- Becquerel, A-C. 1865. *Mémoire sur les forêts et leur influence climatérique*. Firmin-Didot frères, Paris, 366 p.
- Boussingault, J-B. 1837. *Mémoire sur l'influence des défrichements dans la diminution des cours d'eau*. *Annales de Chimie*, 64: 113-141.
- Bruijnzell, L.A. 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review, UNESCO, IHPA, Publication of the Humid Tropics Programme.
- Charney, J.G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Q.J of the Roy. Meteor. Soc.*, 101 (248):193-202.
- Cézanne, E. 1872. *Suite de l'étude sur les torrents des Hautes Alpes*. Dunod, Paris, 382 p.
- Corbin, A. 2001. *L'homme dans le paysage*. Ed Textuel, Paris, 190 p.
- Cosandey C. et M. Robinson. 2001. *Hydrologie Continentale*. Armand Colin, 359 p., Paris.
- Dausse, M. 1842. De la Pluie et de l'influence des forêts sur les cours d'eau. *Annales des Ponts et Chaussées*, 3 (mars-avril): 184-209.
- Descroix, L. 1994. *L'érosion actuelle dans la partie occidentale des Alpes du Sud*:Thèse de doctorat de géographie, Université Lyon II France. 337 p
- Descroix, L., J.F. Nouvelot, J. Estrada et T. Lebel. 2001. Complémentarités et convergences de méthodes de régionalisation des précipitations : application à une région endoréique du Nord-Mexique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 14/3: 281-305.
- Dickison, R.B.B., D.C. Palmer, and D.A. Daugharty. 1986. Assessment of harvesting treatment effect on the water balance of forested basins-p Precipitation network design considerations. *Integrated Design of Hydrological networks. AISH Publ.* 158:97-103.

- Diongue, A. 2001. Interactions entre convection et écoulement de grande échelle au sein de la mousson de l'Afrique de l'Ouest. Thèse de l'Université Toulouse 3- Paul Sabatier, Physique de l'atmosphère., 248 p.
- Dugied, P.H. 1819. Projet de reboisement des Basses-Alpes. Imprimerie Royale, Paris, 113 p.
- Dupriez, H. et P. De Leener. 1990. Les chemins de l'eau: ruissellement, irrigation, drainage. Terres et Vie, L'Harmattan ENDA, Nivelles Belgique, 380 p.
- Escourrou, G. 1981. Climat et environnement: les facteurs locaux du climat. Masson, coll ; géographie, 180 p. , Paris.
- Fontaine, B., N. Philippon, S. Trzaska, et P. Roucou. 2002. Spring to summer changes in the West African monsoon through NCEP/NCAR reanalyses (1968-1998), *JGR*, 107 in press.
- Gambino, S. 2000. La sierra se está secando. *Revista de Coahuila*, mayo 2000, pp. 26-27.
- Gong, C. and E. A. B. Eltahir. 1996. Sources of Moisture for Rainfall in West Africa, *Water Resources Research*, 32(10), 3115-3121.
- Henderson-Selers, A. and V. Gornitz. 1984. Possible climatic impact of land cover transformations; with particular emphasis on tropical deforestation. *Climatic changes*, 6:231-257.
- Henderson-Selers, A. 1987. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land surface parametrizations. *Quat. Jour. Of the Royal Meteorological Soc.*, 114:439-462.
- Jacquot, A. 1909. La forêt et son rôle dans la nature et la société. Recueil de conférences populaires, Paris.
- Labeyrie, J. 1985. L'homme et le climat. Denoël, Paris, 272 p.
- Lavabre, J. et V. Andreassian. 2000. La forêt, un outil de gestion des eaux ?. Cemagref Editions, Antony, 120 p.
- Lean, J. and D.A. Warrilow. 1989. Simulation of the regional climatic impact of Amazonian deforestation. *Nature*, 342 (6248): 411-413.
- Lettau, H., K. Lettau and L.C.B. Molion. 1979. Amazonia's hydrologic cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. *Monthly Weather Review*, 107:227-238.
- Long, M., D. Entekhabi and S.E. Nicholson. 2000. Interannual variability in rainfall, water vapor flux and vertical motion over West Africa, *J. Clim.*, 13, 3827-3841.
- Martin, J.J.E. 1950. Influence de l'état boisé sur la pluviosité. *Revue Forestière Française*. Nancy (n° d'avril 1950).
- Matthieu, A. 1878. Météorologie comparée agricole et forestière. Imprimerie Nationale, Paris, 70 p.
- Philippon, N. et B. Fontaine. 2002. The relationship between the Sahelian and previous 2nd Guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness? *Annales geophysicae*, 20:575-582.
- Polcher, J. and K. Laval. 1994. The impact of African and Amazonian deforestation on

- tropical climate. *J. of Hydrol.*, 155: 389-405.
- Poncet, A. 1981. Interactions Forêts et climats, in «Eaux et climats», mélanges offerts en hommage à CH. Péguy, Grenoble CNRS, 1981, pp 445-461.
- Rabin, R., S. Stadler, P. Wetzel, D. Stensrud and M. Gregory. 1990. Observed effects of landscape variability on convective clouds. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71: 272-279.
- Rauch, F.A. 1801. Harmonie hydro-végétale et météorologique ou recherches sur le smoyens de recréer avec nos forêts des températures et la régularité des saisons, par des plantations raisonnées, 2. Chez les frères Levrault, Paris, 299 p.
- Saint Pierre (de), B.J.H. 1787. Etudes de la Nature, 2. Imprimerie de Monsieur, Paris.
- Shinoda, M. 2000. Desertification and drought as a possible land-surface/atmosphere interaction. *Global Environmental Research*, 3 (1):9-15.
- Shinoda, M., et M. Gamo. 2000. Interannual variations of boundary layer temperature over the African Sahel associated with vegetation and the upper troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D10): 12317-12327.
- Shukla, J., C. Nobre and P.J. Sellers. 1990. Amazon deforestation and climatic change. *Science*, 247: 1322-1325.
- Surell, A. 1841. Etude sur les torrents des Hautes Alpes. Carilian-Goeuruy et Victor Dalmont, Paris, 283 p.
- Taylor, C. and Th. Lebel. 1998. Observational Evidence of persistent Convective-scale rainfall patterns. *Monthly Weather Review*, 126:1597-1607.
- Thompson, K. 1980. Forest and climate change in America: some early view; cité par Cosandey et Robinson, p.316.
- Vallès, F. 1857. Etude sur les inondations, leurs causes et leurs effets. Victor Dalmont, Paris, 528 p.
- Zeng, N., J.D. Neelin, J.D., K.M. Lau and Compton J. Tucker. 1999. Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286:1537-1540.
- Zeng, N. J. and D. Neelin. 2000. The role of vegetation-climate interaction and interannual variability in shaping the African savanna, *J. Clim.*, 13:2665-2670.

La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada

Obra colectiva dirigida y editada por
Luc Descroix, José Luis González Barrios y Juan Estrada Avalos

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

IRD

Institut de recherche
pour le développement

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Serapio Rendón # 83 Col. San Rafael México Distrito Federal 06470 México. www.inifap.gob.mx

Institut de Recherche pour le Développement (IRD) 123, rue Lafayette Paris 10ème. Francia. www.ird.fr

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA). Apartado Postal # 41 Lerdo Durango 35115 México.

IRD Representación en México. Cicerón # 609 Col. Los Morales México Distrito Federal 06470 México.

Título original de la obra:

“La Sierra Madre Occidental, un château d'eau menacé”. Editions IRD Paris.

Traducción y edición técnica en español:

José Luis González Barrios y Juan Estrada Avalos

Imagen en Portada:

Mirador de los altos en la Sinforosa, Guachochic, Chihuahua (foto Luc Descroix). Fondo: Imagen satélite de la Sierra Madre Occidental.

Diseño de Portada y Pre-prensa

Beatriz Ileana Martínez Román

El contenido de los capítulos, es responsabilidad de los autores.

Ejemplo de cita:

Viramontes Pereida, D. 2004. Los recursos hidráulicos en el centro norte de México: perspectiva histórica, pp. 33-42. En: Descroix, L., J.L. González Barrios, J. Estrada Avalos. (Editores). La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Ediciones INIFAP - IRD. Gómez Palacio, Durango, México. 300 p.

©Derechos Reservados

ISBN: 968-800-584-3

La presentación y disposición en conjunto de “La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada”, son propiedad de los editores y sus instituciones. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema o método electrónico, mecánico (incluyendo fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito de los editores.