

Un método gráfico para la regionalización agroecológica de recursos naturales

Walter Ritter Ortiz*
Sergio Antonio Guzmán Ruiz**
Alfonso Estrada Betancourt**

Recibido: mayo 18, 1998
Aceptado versión final: noviembre 23, 1998

Resumen. En este trabajo se usaron modelos empíricos de la productividad natural neta (B_{NN}) anual para los diferentes ecosistemas, a partir de parámetros climáticos como temperatura, precipitación, evapotranspiración y los índices de aridez. Se calcula la estabilidad de la B_{NN} anual de las diferentes zonas ecológicas, comparando los autovalores de la matriz comunitaria resultante de la interacción biológica con la varianza de la aleatoriedad ambiental climática (precipitación), lo cual permite establecer zonas agroecológicas de igual comportamiento. La sensibilidad de respuesta de los ecosistemas se deduce con un modelo teórico hamiltoniano, transformado a un problema estadístico.

Palabras clave: Clasificación agroecológica, productividad, ecología geográfica.

Abstract. In order to acquire a practical methodology of great use for the B_{NN} computation and its involved dynamics, that contains a large potentiality in the use of decisions for the continuity and optimization of natural resources as well as for the acquisition of the maximum sustained yield (MSY), we use the B_{NN} annual empirical models for the different ecosystems from climatic parameters like: temperature, rainfall, evapotranspiration and aridity indexes. The stability of the annual B_{NN} for different ecological environments by comparing the eigenvalues of the community matrix resultant from biological interaction with the variance of the climatic environmental randomness (precipitation) is also computed. The sensibility response of ecosystems is derived by a theoretical Hamiltonian model transformed to a statistical problem.

Key words: Agroecological typology, productivity, ecological geography.

INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la población y la sobreexplotación de los recursos naturales, las interrelaciones entre el género humano consigo mismo y el resto de la biosfera, se han vuelto sumamente complejas (por complejidad se hará referencia siempre a la longitud del mensaje más corto posible para describir el sistema, Gell-Mann (1994)). Es así que el ambiente y los organismos vivientes están ligados entre sí y son inseparables de la unidad de procesos planetarios. Se sabe que grandes civilizaciones han desaparecido por desconocer, y no poder realizar, una adecuada administración de la máxima capacidad de sostén (MCS) de sus ecosistemas. El equilibrio biológico depende, en gran medida, de la dinámica de renovación de sus recursos naturales y la optimización de éstos. Así,

por ejemplo, la excesiva presión de los bovinos sobre los pastizales erosiona el suelo y expande los desiertos con sus consecuentes efectos de retroalimentación sobre el hombre, por lo que en un análisis socioeconómico serio no se puede prescindir del conocimiento científico de los grandes equilibrios ecológicos y del valor que en ellos tienen los conceptos de renovabilidad, limitación de recursos y de las leyes de la termodinámica (Krebs, 1985; Odum, 1968; Ritter, 1996). El hombre, al conocer la dinámica y evolución de estos recursos, tiene la posibilidad y obligación de no permitir el colapso de su ambiente, tan complejo y fundamental, con todas sus interrelaciones para nuestra vida. Hacer esto presupone conocimientos profundos de los complejos mecanismos de interacción climático-biológicos, así como de las leyes de la ecología.

* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 México, D. F. profesor visitante en la BUAP (Biología) y UMAR (Posgrado).

** Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 México, D. F. México.

El sistema debe ser estudiado en su totalidad, aunque sea toscamente, porque la suma de los estudios parciales de un sistema complejo no lineal (ecosistemas) dan una idea errónea del comportamiento del todo. Sin embargo, ya que para la B_{NN} sólo existen muy escasos valores y éstos son puntuales en espacio y tiempo, en este estudio se pretenden determinar zonas de igual B_{NN} , a partir de variables climáticas, como son el índice de aridez (cociente del balance de radiación entre la precipitación), la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración, con base en relaciones conocidas entre estos índices y la B_{NN} , lo que permite generar una serie larga de valores, analizable por metodologías de series de tiempo; desechando aquellas relaciones que no concuerden con los valores esperados del ecosistema analizado, según valores de Cooper (1975), Leith (1973), Whittaker (1975), Giorgi y Mearns (1991).

Posteriormente, de los valores de transformación de las variables climáticas a valores de la B_{NN} , se calculan a través de la información histórica existente los potenciales, variabilidad, condiciones de equilibrio, tasas de crecimiento (r), razones óptimas de aprovechamiento del recurso, estabilidad y sensibilidad de respuesta del ecosistema. El poder de recuperación se refiere a la probabilidad de sobrevivir a perturbaciones tales como cambios climáticos, incendios u otras alteraciones del medio ambiente, hayan sido o no causadas por la actividad humana.

Los resultados de metodologías gráficas simples son equivalentes a los métodos matemático-ecológicos sofisticados de la teoría Hamiltoniana, lo que da un amplio panorama de posibles aplicaciones inmediatas en la administración de recursos naturales o en la geografía económica general.

Esta metodología se aplica a los ecosistemas del estado de Tlaxcala, el cual forma parte del eje Neovolcánico de la República Mexicana, y presenta una amplia gama de microclimas influidos principalmente por la orografía, esperándose, por lo mismo, múltiples opciones de manifestación en sus ecosistemas.

MODELOS DE PRODUCCIÓN NATURAL NETA A PARTIR DE ÍNDICES CLIMÁTICOS

Rosenzweig (1968) ha señalado que la evapotranspiración real (ER) (mm/año) de la vegetación se puede utilizar en la predicción de la B_{NN} , ya que expresa simultáneamente disponibilidad de agua y energía solar, factores esenciales e indispensables en la fotosíntesis. La relación empírica entre la B_{NN} en gr/m/año y la evapotranspiración, modificada posteriormente por Leith y Box (1972), es en la siguiente forma:

$$B_{NN} = 3000[1 - \exp(-9.695 \times 10^{-4}(ER - 20))], \quad (1)$$

quienes utilizaron valores medidos de B_{NN} de América, Eurasia y África. Leith (1973) obtiene otras relaciones en función de la temperatura media anual, T (°C), y la precipitación media anual, Pr(mm), dadas por:

$$B_{NN} = 3000 / [1 + \exp(1.315 - 0.119T)], \quad (2)$$

$$B_{NN} = 3000(1 - \exp(-6.64 \times 10^{-4} Pr)). \quad (3)$$

Estas relaciones están basadas en un conjunto de lecturas procedentes de más de mil estaciones distribuidas en todos los continentes; tomándose el valor más bajo cuando los resultados no coinciden.

Ritter *et al.* (1986, 1988), para diferentes ecosistemas de la República Mexicana, ajustaron valores observados de B_{NN} y de B_{AG} con sus respectivos índices de aridez local ($IA = Q^*/LPr$), que están en función de la disponibilidad de energía, Q^* , del calor latente de evaporación, L, y la precipitación, de acuerdo con Budyko (1974), encontrando las siguientes relaciones:

$$B_{NN} = 2016(IA)^{-0.83139}, \quad (4)$$

$$B_{AG} = 2063(IA)^{-0.7206}, \quad (5)$$

para la B_{NN} y B_{AG} , respectivamente.

Ajustes que por su similitud presentan cierta potencialidad productiva intrínseca de la localidad en función de la disponibilidad del agua, de la energía de la zona y de su valor latitudinal (Giorgi y Mearns, 1991; Kulshreshtha, 1993), teniendo un comportamiento, entre ellos, de una relación caótica con aleatoriedad anual, a uno de orden lineal en los valores promedio a largo plazo (Figura 1), por lo que se puede decir que, en general, cuando existan buenas cosechas de "temporal" agrícola, también se tienen buenos crecimientos en los ecosistemas naturales, sirviendo los

primeros como índices o indicadores de la productividad anual esperada en los segundos (Stakhiv, 1993); encontrándose, también, que las relaciones en función de la temperatura no son aplicables a la República Mexicana, ya que éstas tienden a sobrestimar los valores esperados en el ecosistema (Ritter, 1996).

CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD PRODUCTIVA EN LOS ECOSISTEMAS

La globalización significa complejidad, que es necesaria para la vida, ya que las correlaciones entre los constituyentes individuales y diversificaciones del sistema natural le permiten ser más flexible, adaptarse a los cambios del ambiente y tener mayor probabilidad de sobrevivir. Por otro lado, la especialización o simplificación implica inestabilidad, menores defensas, degradación, pobreza de variabilidad interna y mayor vulnerabilidad (Odum, 1968).

Cuanto mayor sea la complejidad organizativa de un organismo, población o ecosistema, mayor será la cantidad de energía necesaria para mantener el sistema, así, mediante la sucesión, las comunidades evolucionan desde interacciones simples hasta otras más complejas (maduras), manteniéndose un equilibrio general tanto en el flujo energético como en la productividad.

Las fluctuaciones de los tamaños poblacionales alrededor de su MCS se deben a que las razones de mortalidad y natalidad no son constantes, además de ser diferentes y de que los ambientes estocásticos tienen influencia sobre estos valores. En la dinámica de sistemas, los cambios poblacionales ocurren de manera continua y son representados por ecuaciones diferenciales que relacionan la razón de cambio de la población a sus respectivos tamaños poblacionales, en cualquier tiempo, donde la razón de crecimiento efectivo, r , será positiva cuando la población sea menor que la MCS del ecosistema, y, negativa, cuando sea mayor, y si los valores son altos las poblaciones tienden a seguir las fluctuaciones climáticas, mientras que, si son bajos, las poblaciones promedian los efectos de la fluctuación, obteniéndose valores poblacionales de equilibrio globalmente estables cuando la población alcanza su MCS, $B_{NN} = K$.

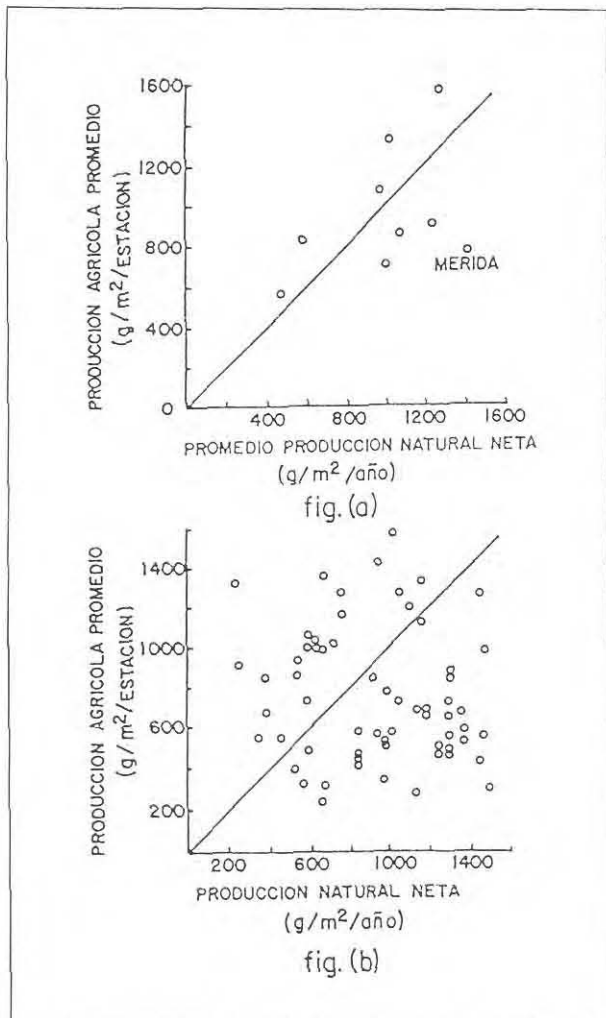


Figura 1. Relaciones entre la productividad natural neta anual y la agrícola estacional (a), y entre la productividad natural neta promedio y la agrícola promedio (b), comprendidas entre 1948-1987 (Ritter *et al.* 1988).

La dinámica de estos sistemas tiene un periodo característico de retorno biológico, $TR = 1 / r$ que da una estimación del tiempo en que la población regresa a su punto de equilibrio después de ser perturbada (Tabla 1). Si el tiempo de retraso en el mecanismo de retroalimentación (T) es grande comparado con TR, habrá una tendencia a sobreexcitar la dinámica del sistema, y conforme el producto rT se hace mayor que la unidad, se presenta la bifurcación de Hopf y los puntos estables dan lugar a ciclos estables. Además, cuando T/TR exceden la unidad, se tiene un mecanismo regulatorio de re-

traso en el sistema, con ciclos aproximados de $4T$. Es de esperarse que si la no-linealidad del sistema no es severa, T tienda a ser corto comparado con TR, haciéndose inestables los puntos estables cuando $r > 2$. Es por esto que, dentro de la zona caótica, la dinámica poblacional de los modelos determinísticos sean mejor descritos en términos probabilísticos (Vander Meer, 1981; May, 1973). Para muchos propósitos, es útil considerar el caos como un mecanismo que amplifica, a escala macroscópica, la indeterminación inherente a la mecánica cuántica (Gell-Mann, 1994).

Tabla 1. Producción primaria anual histórica calculada a partir de la precipitación pluvial B_t , en $g/m^2/año$, capacidad de sostén K_t , en $g/m^2/año$ y razón de crecimiento efectivo, en años

Estaciones	B_t			K_t			r		
	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom	Mín	Máx	Prom
Achicapa	1033	1364	1224	1080	1300	1206	-0,81	2,25*	0,56
Apizaco	959	1553	1234	1050	1360	1239	-2,66	2,40*	0,11
Atlangatepec	863	1394	1071	930	1220	1018	-1,80	3,30*	0,08
Calpulalpan	936	1274	1101	975	1195	1110	-2,50	2,66*	0,22
Cuapixtla	546	1300	989	810	1245	993	-2,10	2,70*	0,13
Cuauila	918	1237	1085	1000	1215	1100	-1,96	1,96	-0,19
Españita	1103	1829	1464	1295	1750	1449	-0,76	1,46	0,49
Huamantla	636	1321	1006	790	1235	1015	-4,70	4,70*	0,15
Hueyotlipan	920	1475	1255	980	1405	1248	-2,25	4,70*	0,28
Ixtacuixtla	600	1271	1039	750	1260	984	-2,95	2,66*	0,16
San Marcos	903	1390	1093	980	1215	1100	-1,07	1,55	0,07
Tepetitla	774	1475	1064	850	1300	1044	-1,84	1,01	-0,32
Tlaxcala	901	1596	1287	1035	1450	1264	-2,40	2,40*	-0,14
Tlaxco	804	1613	1080	850	1410	1087	-3,35	3,35*	0,33
Zombrerito	1071	1626	1278	1134	1450	1255	-2,10	1,96	0,00
Zoquiapan	923	1228	1023	955	1150	1020	-1,64	0,76	-0,25

* Comportamiento caótico.

En un ambiente de comportamiento estocástico, con fluctuaciones climáticas aleatorias, medidas por su varianza ambiental σ^2 , y para pequeñas fluctuaciones poblacionales medidas por la matriz comunitaria (Λ), cuyo tiempo de retorno bioclimático al equilibrio es medido por las partes reales del máximo autovalor negativo ($\Lambda = -\text{Real } \lambda_{\max}$), la estabilidad biológica es dada por $\Lambda > \sigma^2 / 2$. Pero si sucede que Λ es mucho menor que $\sigma^2 / 2$, la población sufrirá grandes fluctuaciones con una tendencia a su extinción, por lo que la

estabilidad o inestabilidad de un ecosistema estará determinada por el balance del poder de recuperación biológica en el ecosistema y la magnitud del efecto de inestabilidad de las fluctuaciones ambientales (May, 1973).

MÉTODO GRÁFICO DE SOLUCIÓN

Una forma gráfica de analizar esta dinámica de comportamiento consiste en graficar las biomásas poblacionales en el tiempo t y $t+1$, y analizar los puntos

de intersección con respecto a una recta a 45°, que son los valores del punto de equilibrio (K) o MCS del ecosistema. La pendiente o tangente de estos puntos de intersección estarán dando los valores de los autovalores, o razón finita de incremento poblacional, donde si el máximo autovalor observado es mayor que la unidad, la población seguirá incrementándose, y si es menor tenderá a la extinción. La razón finita de incremento o autovalor (λ), está relacionada con la razón intrínseca de crecimiento por la expresión $\ln(\lambda) = r$, cuyos valores señalan la estabilidad de los ecosistemas, así como posibles comportamientos "caóticos" y bifurcaciones; además, de los autovalores se puede decir que si toman valores menores que -1 el sistema tiene un comportamiento oscilatorio inestable; si son mayores que -1 pero menores que cero, el sistema es oscilatorio, pero estable; si los autovalores están entre cero y +1, el sistema es asintóticamente estable; y si el autovalor es mayor que +1, el sistema es asintóticamente inestable (Vander Meer, 1981). Para el RMS (Rendimiento Máximo Sostenido) la expresión $H = 1 - (2e^r + 1)/3$, deducida del modelo logístico generalizado de producción y el de distribución de edades de Leslie (Ritter, 1996; Pela y Tomlinson, 1969), puede ser de gran utilidad para conocer la razón óptima de explotación del recurso.

MODELO TEÓRICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SENSIBILIDAD DE LA MÁXIMA CAPACIDAD DE SOSTÉN EN LOS ECOSISTEMAS

Un ecosistema resulta más estable al aumentar su complejidad o con un mayor número de interconexiones entre los posibles niveles alimenticios, así como, posiblemente, con un incremento tanto de su biomasa o del número de especies de la comunidad (May, 1973; Krebs, 1985).

Se sabe que estos procesos biológicos de interacción son altamente no lineales, por lo que se dificulta seriamente la solución de las expresiones matemáticas de su dinámica de comportamiento. Con este propósito, en este trabajo se utilizan algunas técnicas desarrolladas por Kerner (1957, 1959) y Leigh (1965) para determinar las propiedades

estadísticas generales de las ecuaciones de orden superior, de la dinámica productiva del sistema, usándolas para obtener las variables determinantes y condiciones de equilibrio, así como las variables críticas en la sensibilidad de respuesta de los diferentes ecosistemas.

Considerando la B_{NN} , en los ecosistemas dada por

$$\frac{dB_{NN_i}}{dt} = r_i B_{NN_i} + \sum_{s=1}^n |A_{is}| B_{NN_i} B_{NN_s} \quad (6)$$

Donde r_i es la razón intrínseca de crecimiento en ausencia de competencia, A_{is} es una constante que da la influencia de las especies s sobre la razón de crecimiento de las especies i , la cual es proporcional al producto de sus tamaños, y $A_{is} | B_{NN_i} B_{NN_s}$ es la razón de flujo de masa entre las especies i (plantas) y las s (herbívoros). El factor del efecto de los herbívoros puede ser reemplazado por una razón de explotación del recurso, así como, también, por el efecto limitante de una variable climática crítica en el desarrollo del recurso o , simplemente, como la suma de los tres factores. Una medida de la B_{NN} del ecosistema sería:

$$P = \frac{1}{2} \sum_{i,s} |A_{is}| B_{NN_i} B_{NN_s} \quad (7)$$

Si se hace, $x_i = \log(B_{NN_i} / K_i)$, donde las K_i son los valores del punto de equilibrio en las B_{NN_i} se puede considerar un sistema cuasi-Hamiltoniano dado por:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n A_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \approx \sum_{j=1}^n A_{ij} K_j x_j \quad (8)$$

donde

$$H = \sum_{i=1}^n K_i (e^{x_i} - x_i) \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n K_i x_i^2 \quad (9)$$

sistema que representa una distribución probabilística multivariable normal. Esto permite evaluar las propiedades estadísticas de las soluciones de nuestras ecuaciones sin necesidad de resolver las ecuaciones explícitamente. Donde, según Leigh (1965), la frecuencia C de cruzamiento a la línea $x_i = 0$, ($B_{NN_i} = K_i$) es dado por

$$C = \frac{1}{\pi} \sqrt{\sum_j K_i K_j A_{ij}} e^{-\frac{K_i}{2\theta}} \quad (10)$$

Donde θ es una constante de normalización, y considerando válida la siguiente aproximación $|A_{ij}| \approx 2B_{NN_i} / B_{NN_j}^2 \approx 2B_{NN_i} / B_{NN_j}$ se puede deducir que la rapidez de respuesta o sensibilidad de la MCS del ecosistema será directamente proporcional al tamaño poblacional de los herbívoros, la razón de explotación o la magnitud del factor climático limitante e inver-

samente proporcional a la biomasa de las plantas, con lo que para poblaciones pequeñas, mayor abundancia de herbívoros y una alta frecuencia en las heladas, se observará mayor sensibilidad del sistema.

RESULTADOS

Varios parámetros climatológicos para el estado de Tlaxcala (precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración e índices de aridez) comprendidos entre 1948 y 1987, para el cálculo de la B_{NN} anual de los ecosistemas son analizados. Se observa que la temperatura es la que presenta menor variabilidad con respecto a los otros parámetros considerados; en cambio, el índice de aridez presenta fluctuaciones anuales mayores de 100% con respecto a su valor medio cuando se consideran zonas sin cubierta boscosa. Los valores normales de la precipitación temperatura e índice de aridez, por ser las más ilustrativas para este estudio, son presentadas en las figuras 2, 3 y 4.

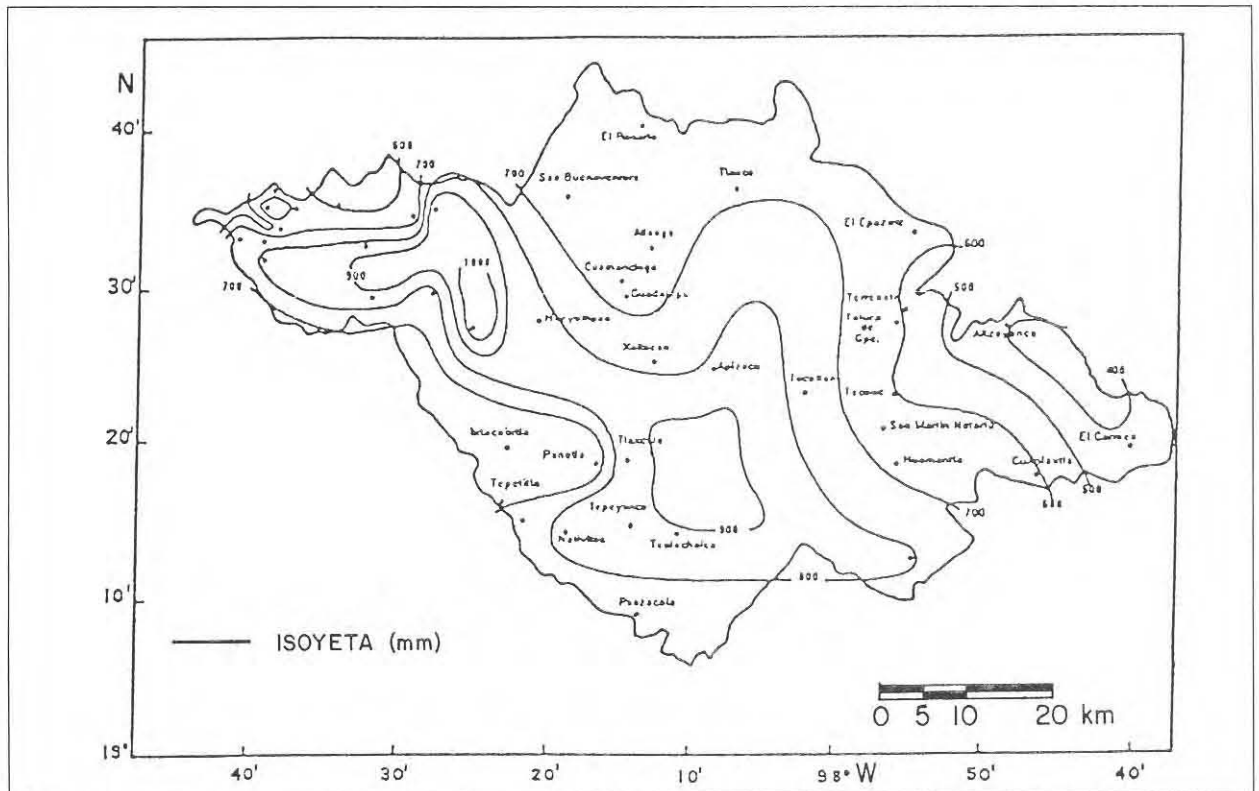


Figura 2. Normales anuales de precipitación (mm) comprendidos entre 1948-1987, para el estado de Tlaxcala, México.

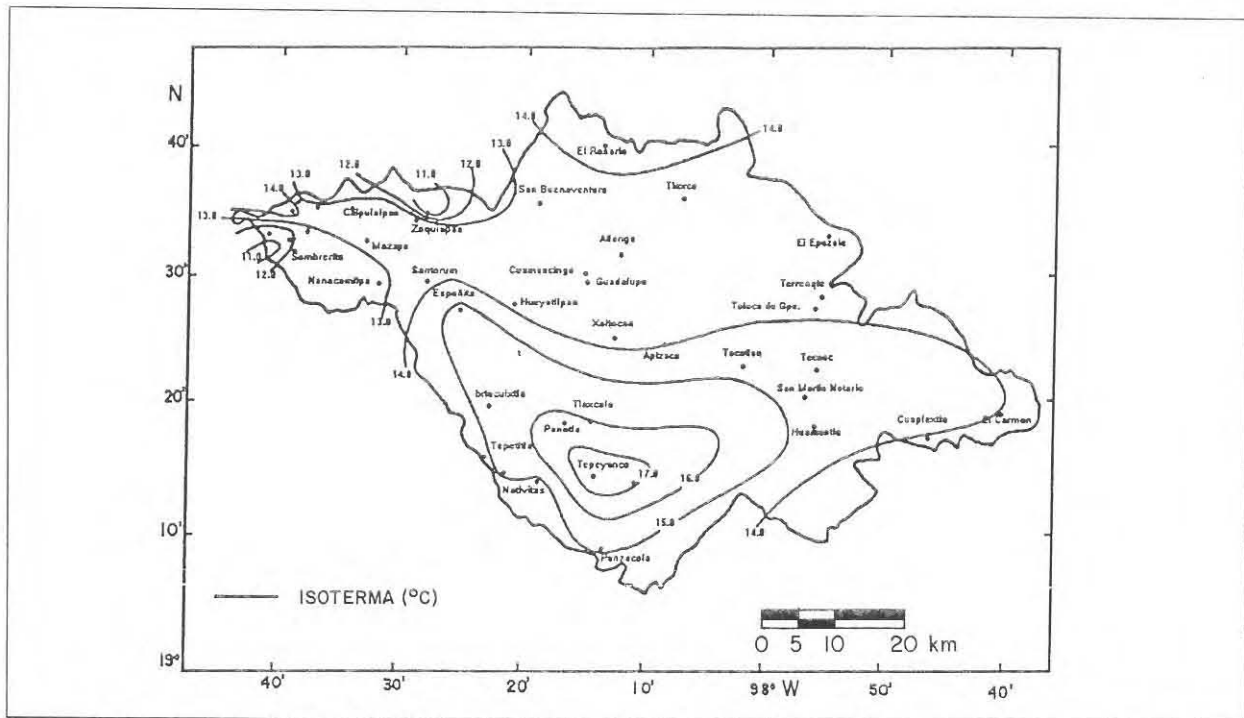


Figura 3. Normales anuales de temperatura (°C) comprendidos entre 1948-1987, para el estado de Tlaxcala, México.

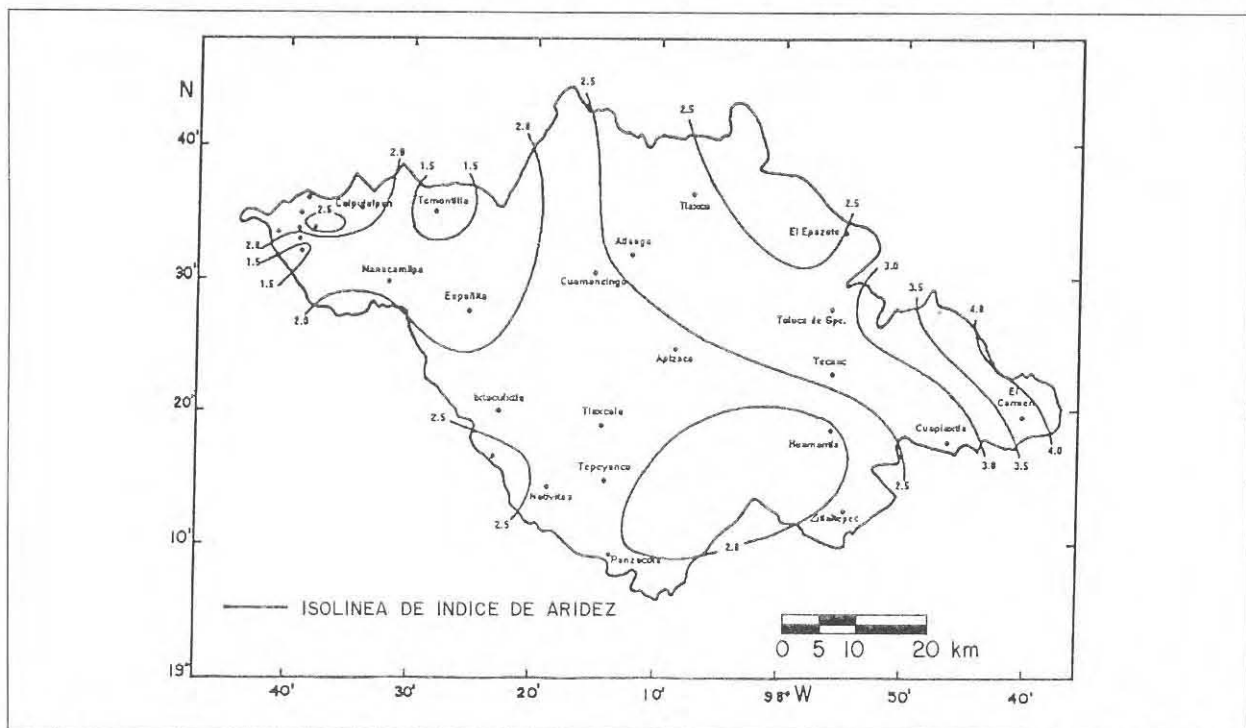


Figura 4. Normales anuales de índice de aridez comprendidas entre 1948 y 1987, para el estado de Tlaxcala, México.

Los modelos empíricos utilizados para calcular en forma instantánea y para la simulación de la B_{NN} a partir de las variables climáticas de la precipitación y el índice de aridez, son los que más se aproximan a la B_{NN} esperada por el tipo de ecosistemas

del lugar (Cooper, 1975, y Whittaker, 1975), y la B_{AG} observada (Figura 5), distinguiéndose tres tipos de microzonas ecológicas con similar homogeneidad productiva (Figuras 6 y 7):

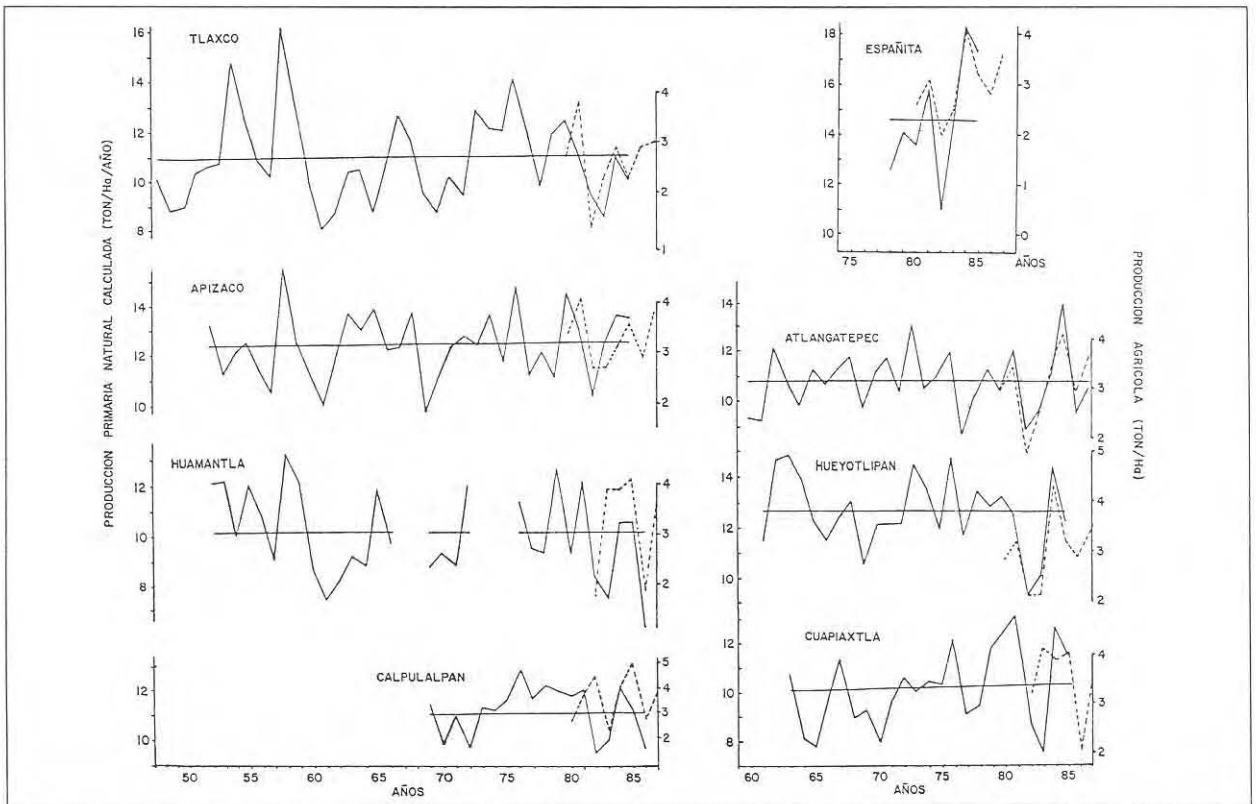


Figura 5. Productividad natural neta anual (-) y biomasa de maíz (---) utilizando un índice de cosecha de 0.44, tomado de Flores (1987).

1. La microzona localizada al este del estado de Tlaxcala, si se considera a la precipitación con los valores calculados de B_{NN} son de 7.5 a 10.0 ton/ha/año; y si se considera el índice de aridez es de 6.0 a 9.0 ton/ha/año, siendo los valores más bajos del estado. Esta zona es también la que presenta mayor rango de fluctuación.
2. En la microzona localizada al noroeste del estado, ambos modelos con valores de B_{NN} de 10.0 a 12.0 ton/ha/año dieron los mismos resultados.
3. En la microzona del centro-sur del estado, si se considera a la precipitación con valores calculados

de B_{NN} son de 12.5 a 14.0 ton/ha/año; si se considera que el índice de aridez es de 9.5 a 12.0 ton/ha/año. Esto significa, en el primer caso, los mayores valores de B_{NN} calculados en el estado.

Los valores obtenidos de los modelos de B_{NN} a partir de variables climáticas dan mayor número de casos de asociación con los valores de la producción agrícola B_{AG} estacional cuando se calcula la B_{NN} a partir de la precipitación (85% de casos), y menores cuando se usan los índices de aridez (50%) (Figura 5).

En general, los modelos empíricos basados en la precipitación son lo suficientemente útiles y adecuados

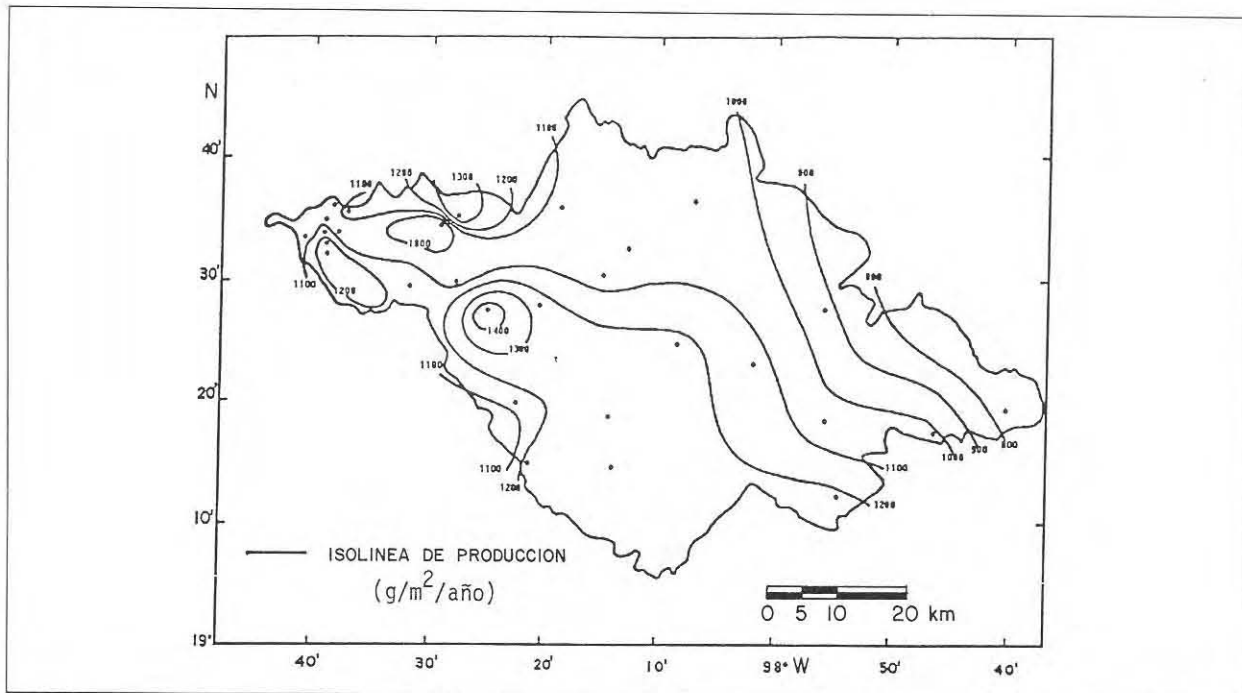


Figura 6. Productividad natural neta anual calculada (gr/m²/año) con el modelo empírico de la precipitación, según Leith (1973).

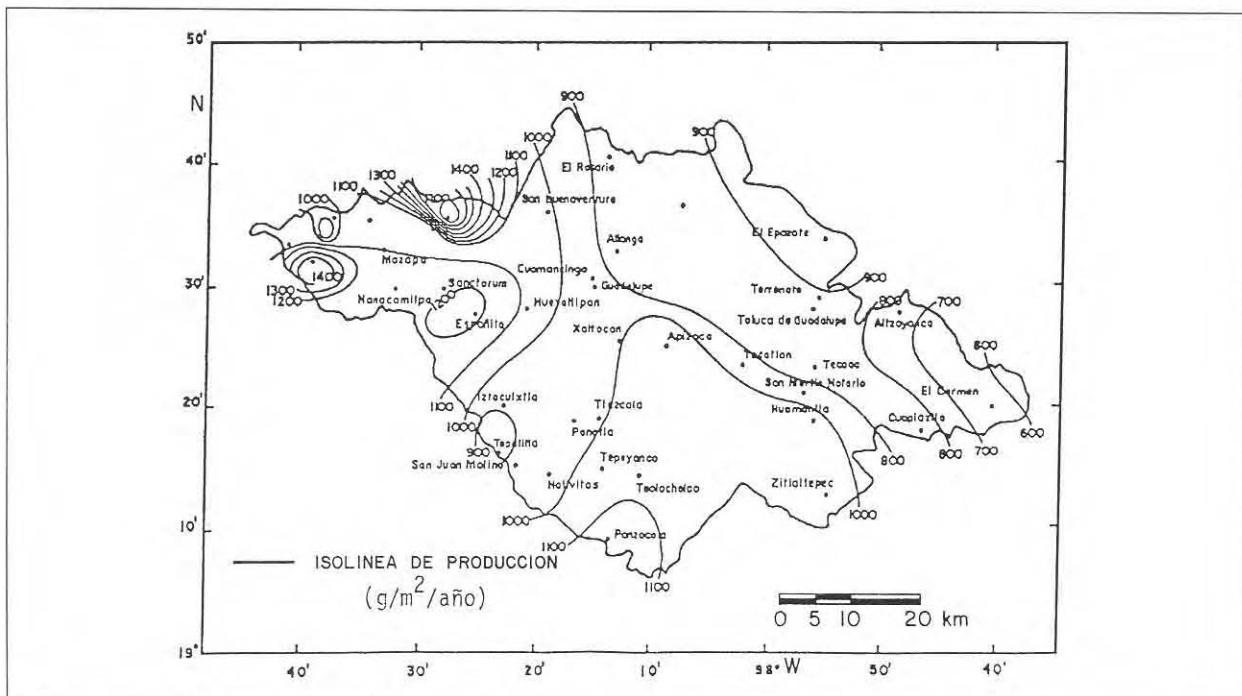


Figura 7. Productividad natural neta anual calculada (gr/m²/año) con el modelo de índice de aridez, según Ritter et al. (1986,1988).

para el cálculo instantáneo de la B_{NN} anual de una zona y siguen, además, el mismo comportamiento que la B_{AG} estacional observada, por lo que se procedió a generar las series históricas de la B_{NN} , necesarias para este estudio, a partir de dicha variable.

En la **tabla 2** se dan los resultados del análisis de estabilidad de esta serie de datos para algunas localidades del estado de Tlaxcala, analizados por los métodos gráficos de May (1973) y Vander Meer

(1981), Ritter (1996), pudiendo observarse que existe, en general, un equilibrio en el porcentaje promedio de comportamiento inestable (49.9%) con respecto al estable (50.1%), coincidiendo las zonas estables con las de mayor disponibilidad de agua y mayor B_{NN} (**Figuras 2 y 8**).

Al número de intersecciones en el punto de equilibrio se le dividió entre el número de años analizados para obtener la sensibilidad de respuesta (SR)

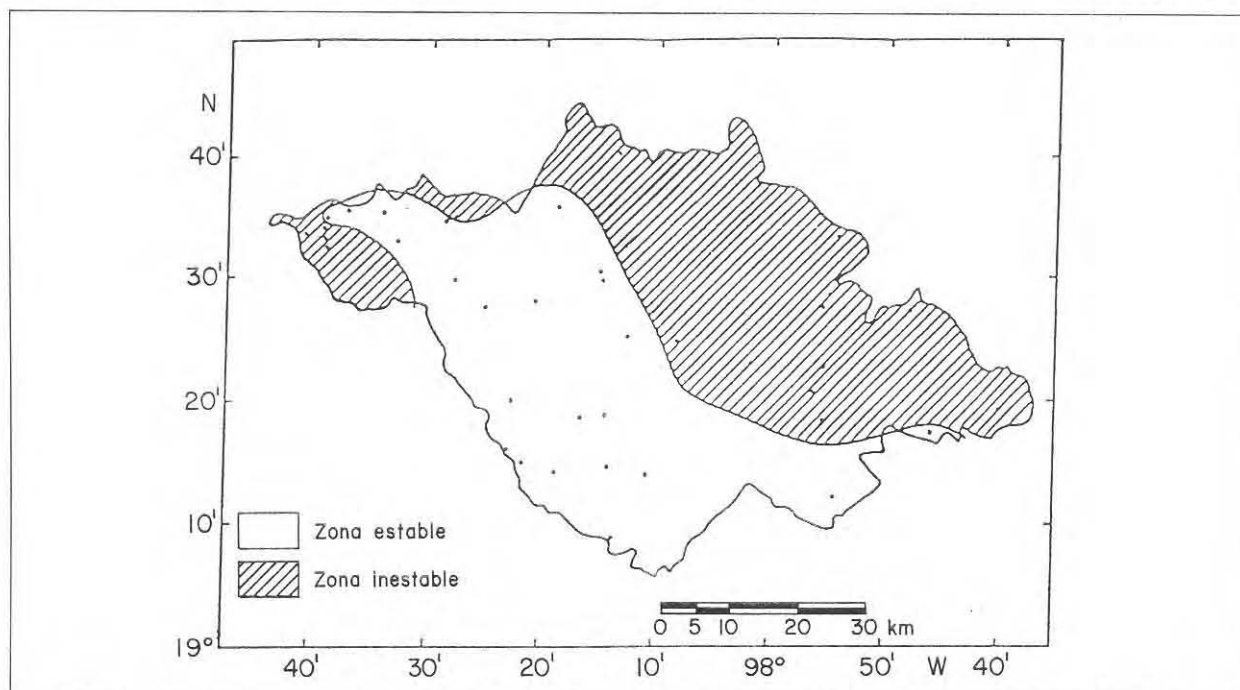


Figura 8. Zonas con un comportamiento estable e inestable (sombreado) en el estado de Tlaxcala, México.

del ecosistema (**Tabla 2**), observándose que todas las zonas presentan en promedio un cruzamiento cada dos años, lo que significa que la B_{NN} oscila alrededor de la MCS. La laguna de Atlangatepec caracterizada por su gran frecuencia de heladas (**Figura 9**), es la que presentó el mayor índice de sensibilidad (0.64) y separación del valor de equilibrio; Tlaxco, con una de las más altas productividades y 60% de comportamiento inestable, presentó el menor valor (0.47); Tlaxcala capital, con una productividad alta y una baja frecuencia de heladas, junto con Calpulalpan y Cuapiaxtla, con un bajo porcentaje de comportamiento inestable (47 y 50%, respectivamente) y una regular productividad y fre-

cuencia de heladas, presentan un mismo índice (0.61), mientras que Apizaco, Cuauila, Huamantla y Hueyotlipan (0.55-0.57), parecen formar otra zona de comportamiento parecido. Españita, con una alta productividad, presenta poca frecuencia de heladas (**Figura 9**). Ratificando lo observado en la **figura 1**, a corto plazo existe una relación no lineal en las producciones, pero a largo plazo se vuelve lineal y manifiesta pequeñas fluctuaciones alrededor de sus valores promedio de equilibrio. Un alto valor de este índice implica una mayor dinámica de manifestación, pero también una mayor capacidad de recuperación y de retorno al punto de equilibrio, después de sufrir una perturbación externa. Tal característi-

ca es función inversa de la cantidad de humedad disponible en el ecosistema y, por lo mismo, del tamaño de su biomasa permanente B_{NN} (tipo de ecosistema del lugar) y en forma directa de la frecuencia de heladas, lo que viene a validar la aproximación utilizada por Leigh (1965) para el cálculo de la fre-

cuencia de cruzamiento del punto de equilibrio C , así como con los resultados obtenidos por Ritter *et al.* (1995) en el análisis de los riesgos de inversión agropecuaria de la zona utilizando un modelo estocástico de análisis de la variabilidad y predictibilidad de la lluvia.

Tabla 2. Dinámica del comportamiento (%) de la estabilidad y sensibilidad de respuesta (S. R.) en diferentes ecosistemas de Tlaxcala.

Estaciones	Inestable Asintótico	Inestable Oscilatorio	Estable Asíntótico	Estable Oscilatorio	S. R. (n.i./n.a.)	Periodo (años)
Apizaco	19	32	23	26	0.55	1952-1985
Atlanga	32	24	24	20	0.64	1960-1986
Calpulalpan	33	14	20	33	0.61	1969-1985
Cuapiaxtla	20	30	25	25	0.61	1963-1983
Cuauila	17	33	50		0.57	1967-1980
Huamantla	35	22	30	13	0.57	1952-1985
Hueyotlipan	30	14	26	30	0.56	1961-1984
San Marcos	27	7	33	33	0.59	1967-1983
Tlaxcala	20	30	40	10	0.61	1962-1983
Tlaxco	30	30	25	15	0.47	1948-1984

n.i./n.a. = Intersecciones al punto de equilibrio (C)/Número de años.

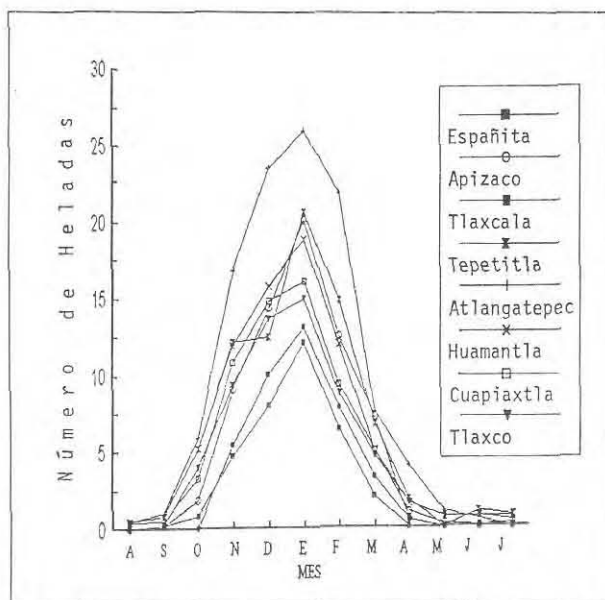


Figura 9. Números de heladas promedio comprendidas entre 1948-1987, en ocho localidades del estado de Tlaxcala, México.

Se observa, también, en la **tabla 2**, que la frecuencia de cruzamientos, a través del punto de equilibrio o situaciones en que la B_{NN} rebasa o no los valores estacionales de la MCS, es directamente proporcional a la biomasa de herbívoros o, en su lugar, la razón de explotación del recurso, o si no existe tal, de la magnitud del factor climático crítico limitante. En este último caso se consideró como tal al número de heladas de la zona. Para que el método gráfico aquí propuesto como metodología rápida de análisis emule a lo esperado por el modelo de Leigh, debe dar un valor de índice de sensibilidad (IS) proporcional al número de heladas e inversamente proporcional a la productividad, para obtener una IS alta o lo contrario para una IS baja, lo cual quedó verificado con los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

A María Esther Grijalva por la elaboración de la versión final de este manuscrito.

REFERENCIAS

- ☞ Budyko, J. I. (1974), *Climate and Life*, Academic Press, 508 p.
- ☞ Cooper, J. P. (1975), *Photosynthesis and Productivity on different environments*, Cambridge University Press, London, 353 p.
- ☞ Flores J., J. P. (1988). Determinación de dosis de fertilización nitrogenada para maíz y cebada en el estado de Tlaxcala mediante un modelo lineal simplificado, tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Posgraduados, Montecillos, Estado de México, 123 p.
- ☞ Gell-Mann, M. (1994), "The Quark and the Jaguar. Adventures in the Simple and the Complex", *Metatemas* 38, 413 p.
- ☞ Giorgi, F. y L. O. Mearns (1991), "Approaches to the simulation of regional climate change: A review", *Reviews of Geophysics*, 29(2):191-216.
- ☞ Kerner, E. H. (1957), "A statistical mechanics of interacting biological species", *Bull. Math. Biophys.*, 19, pp. 121-146.
- ☞ Kerner, E. H. (1959), "Further considerations on the statistical mechanics of biological associations", *Bull. Math. Biophys.*, 21, pp. 217-225.
- ☞ Krebs, J. (1985), *Ecología. Estudio de la distribución y la abundancia*, Ed. Harla, México, 753 p.
- ☞ Kulshreshtha, S. N., (1993), "World Water Resources and Regional Vulnerability: Impact of Future Changes, RR-93-10", International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- ☞ Leigh, E. G. (1965), "On the relation between the productivity, biomass, diversity, and stability of a community", *Zoology*, vol. 53, pp. 777-783.
- ☞ Leith, H. y E. Box (1972), "Evapotranspiration and Primary Productivity, C. W. Thornthwaite Memorial Model", in *Papers on Selected Topics in Climatology*, J. R. Mather, ed., Elmer, New York, 2:37-44.
- ☞ Leith, H. (1973), Primary Productivity in Ecosystems: Comparative Analysis of Global Patterns, *Unifying Concepts in Ecology*, pp. 67-68.
- ☞ May, R. M. (1973), *Stability and Complexity in Model Ecosystems*, Princeton, N. J, 235 p.
- ☞ Ritter O., W. M. E. de Garay, y R. S. Guzmán (1986), "Balance de radiación y potenciales de productividad primaria en algunos ecosistemas terrestres de la República Mexicana", *Geof. Int.*, vol. 25, núm. 2, pp. 285-314.
- ☞ Ritter O., W., A. Noguez e I. Rosas (1988), "Evaluación del potencial de la estabilidad de la producción agrícola con base en índices climáticos para algunas localidades de la República Mexicana", *Geof. Int.*, vol. 7, núm. 2, pp. 263-278.
- ☞ Ritter O., W., R. S. Guzmán y S. Zempoaltecatl (1991), "Duración e intensidad de sequías en el estado de Tlaxcala y sus posibilidades de pronóstico", *V Congreso Nacional de Meteorología*, 2-4 oct./1991. Ciudad Juárez, Chihuahua.
- ☞ Ritter O., W., A. P. Mosiño y C. E. Buendía (1995), Rainfall variability and predictability for agricultural purposes in Central Mexico.
- ☞ Ritter O., W. (1996), Un modelo integral clima-producción (aplicaciones en la optimización de ecosistemas naturales y agrícolas del estado de Tlaxcala), tesis de Doctorado en Biología, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 159 p.
- ☞ Rosenzweig, M. L. (1968), "Net Primary Productivity of Terrestrial Communities: Prediction from Climatological Data", *Am Nat.*, 102 (1923), pp. 67-74.
- ☞ Stakhiv, E., (1993), "Water resources planning and management under climate uncertainty", in Ballentine, T. and E. Stakhiv (eds.), *Proceedings of conference on Climate Change and Water Resources Management*, US Army Institute for Water Resources, Fort Belvoir, VA, USA: IV/20-IV/36.
- ☞ Vander Meer, H. (1981), *Elementary mathematical ecology*, John Wiley & Sons, 287 p.
- ☞ Whittaker, R. H. (1975), *Communities and Ecosystems*, 2nd ed. MacMillan, New York, 162 p.