

TEORÍA DE ESTADOS Y TRANSICIONES APLICADA A SUELOS VOLCÁNICOS SOMETIDOS A DIFERENTES MANEJOS III: ACOPLAMIENTO CON LA TEMPERATURA DEL SUELO

⁽¹⁾Fernando Paz, ⁽²⁾Sara Covalada, ⁽²⁾Juan F. Gallardo, ⁽³⁾Christian Prat, ⁽¹⁾Jorge D. Etchevers y ⁽¹⁾Claudia Hidalgo

¹Colegio de Postgraduados de Montecillo, Texcoco (México); ²C.S.I.C. Salamanca (España); ³IRD-LTHE, Grenoble (Francia). <pellat@colpos.mx>

RESUMEN. Mediante el uso del marco conceptual de los Modelos de Estados y Transiciones (MET) se discute la relación entre la temperatura del suelo (T_s) y la respiración del mismo (R_s). El esquema de acoplamiento del sistema suelo-vegetación-atmósfera permite presentar argumentos y evidencia experimental que explica el porqué de las relaciones entre T_s y R_s , dependiendo del grado de acoplamiento de las componentes del sistema. Asimismo, se discuten las implicaciones de este acoplamiento en relación con los flujos de C y el cambio climático.

Palabras clave: Estados y transiciones, temperatura edáfica, degradación edáfica.

INTRODUCCIÓN. La respiración del suelo (R_s) representa el flujo de C de la parte subterránea de los ecosistemas hacia la atmósfera y es una variable de tipo dinámico (cambios rápidos). En la perspectiva de los Modelos de Estados y Transiciones (MET) (10-12), se puede utilizar la R_s como variable de análisis (9). No obstante esta situación, es conveniente analizar una variable indirecta más fácil de medir y de menor costo. Al respecto, la temperatura del suelo (T_s) ha sido usada como una variable relacionada con la respiración del suelo (R_s) (5). Aunque existen trabajos mostrando que la T_s está relacionada en forma exponencial con la R_s , en muchas

situaciones la relación entre T_s y R_s es pobre o no existe. La explicación de este desacoplamiento entre T_s y R_s ha sido argumentada bajo diferentes perspectivas y escalas (2), sin que se haya logrado un consenso más o menos claro. Ahora bien, desde la perspectiva del cambio climático es importante entender la relación entre T_s y R_s , ya que T_s es dependiente de la temperatura del aire (T_a ; 8). Para poder entender la dinámica de la T_s y su relación con R_s , es necesario analizar el sistema suelo-vegetación-atmósfera, de tal forma que se clarifiquen las interrelaciones entre sus componentes.

En este trabajo se presentan argumentos teóricos y evidencia experimental con el fin de explicar como el acoplamiento suelo-vegetación-atmósfera conduce a diferentes grados de correlación entre T_s y R_s . Como primera aproximación se utilizó un modelo linealizado de la R_s en función del tiempo (t ; 9, en este volumen) tal como muestra la Fig. 1. La relación entre el $\ln[R_s]$ y el t fue modelada linealmente usando tres segmentos asociados al crecimiento de la vegetación: etapa creciente, etapa de meseta y etapa decreciente. La pendiente (tasa de cambio) de la etapa decreciente fue asociada con el carbono orgánico del suelo (COS) en *Andosoles*, bajo la perspectiva de los MET (1). El modelo propuesto se muestra en la Fig. 2 (9).

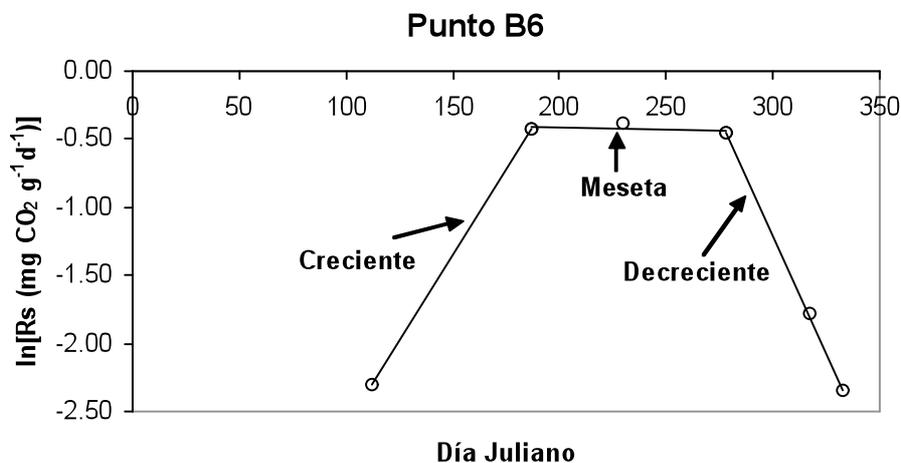


Figura 1. Modelo temporal de la respiración del suelo (9).

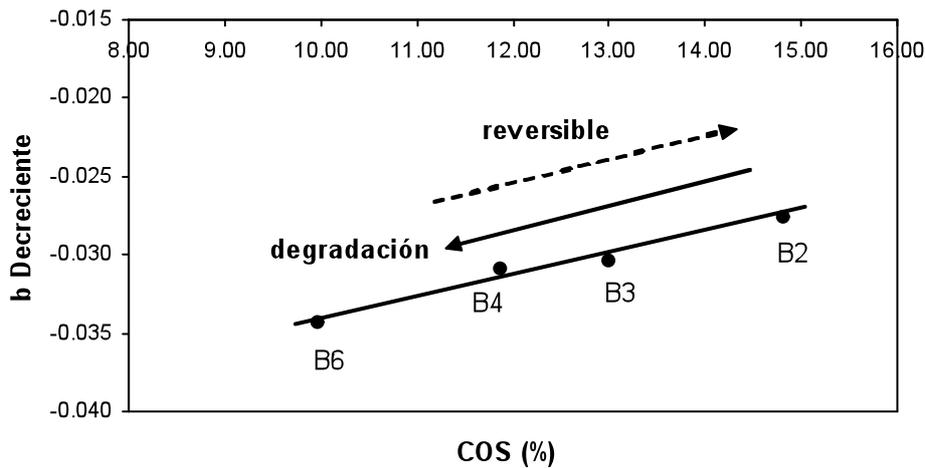


Figura 2. Padrón entre la pendiente b de la etapa decreciente y el COS (9).

MATERIALES Y MÉTODOS. La zona de estudio se localiza en la microcuenca de Atécuaro, en la parte suroeste de la cuenca de Cuitzeo, Estado de Michoacán (México; 19° 33' y 19° 37' N; 101° 09' y 101° 15' W). Once puntos fueron seleccionados a lo largo de una toposecuencia sobre *Andosol* en zonas de pastos (P1), bosques mixtos de pino-encino que presentan diferente nivel de degradación (B1-B7; mayor número indica mayor degradación), un área dedicada a la extracción de leña que sufrió un incendio en el año 2000 (I) y dos áreas de cultivo agrícola (C1 y C2).

La respiración del suelo fue monitoreada mediante un equipo EGM4 (*PP Systems*) que contaba con una sonda para medir la T_s . En cada

sitio se realizaron de 5 a 8 mediciones durante los meses de abril, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2005.

Bajo el argumento de una relación exponencial entre T_s y R_s (5) se espera que el modelo de la Fig. 1 también sea razonablemente aplicable a T_s . La relación definida entre T_s y R_s sólo es válida para el caso de que el bosque de pino-encino (BPE) esté acoplado (es decir, dentro de la línea de degradación de la Fig. 2) con la vegetación-atmósfera. La Fig. 3 muestra la situación para un punto dentro de la línea acoplada y la Fig. 4 muestra el caso de un punto no acoplado (9).

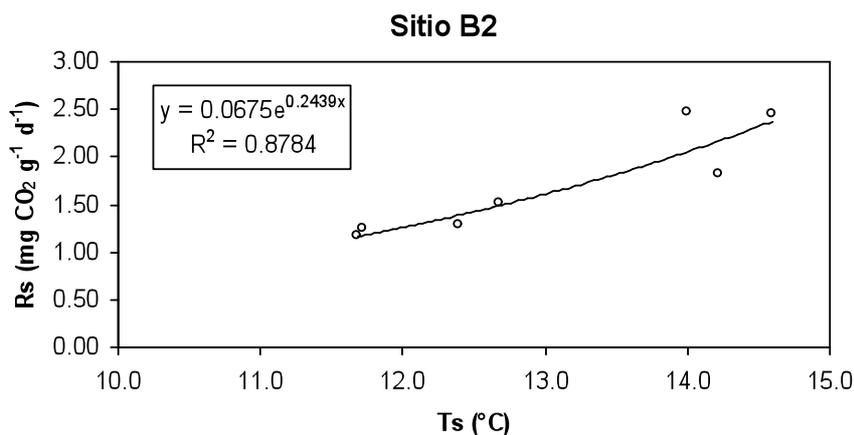


Figura 3. Relación entre T_s y R_s para un sitio acoplado suelo-vegetación-atmósfera.

Acoplamiento vegetación-atmósfera: Para darle un significado más concreto al término "acoplamiento" se puede utilizar la fórmula de McNaughton y Jarvis (6) para el caso de los flujos de energía en la interfaz vegetación-atmósfera:

$$E = \Omega E_{eq} + (1 - \Omega) E_{imp} \quad (1)$$

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + R_v / R_a)}$$

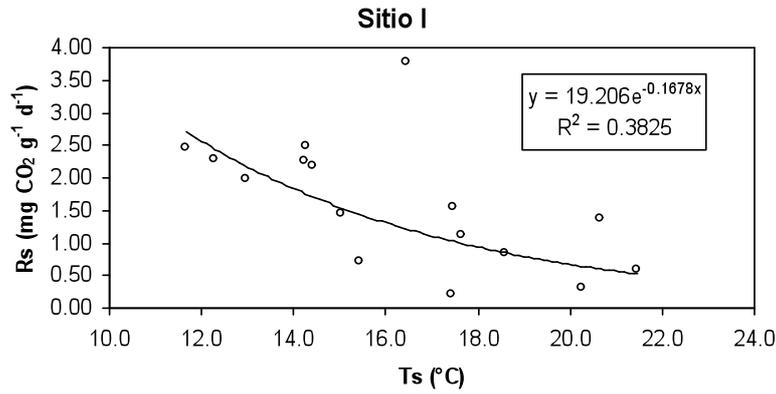


Figura 4. Relación entre T_s y R_s para un sitio desacoplado suelo-vegetación-atmósfera.

donde E es el flujo de calor latente total, E_{eq} es el flujo de calor latente en equilibrio y E_{imp} es el impuesto; Ω es el factor de desacoplamiento ($0 =$ acoplamiento perfecto y $1 =$ aislamiento completo de la atmósfera), Δ es la tasa de incremento en la presión de vapor de agua saturada con la temperatura, λ es el calor latente de vaporización, γ es la constante psicométrica a 25°C , R_a es la resistencia aerodinámica y R_v es la resistencia de la vegetación. Analizando la formulación de Penman-Monteith (7), en los límites, tenemos que:

$$\lambda E_{eq} = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_n \text{ para } R_a \rightarrow \infty, \Omega \rightarrow 1.0 \quad (2)$$

$$\lambda E_{imp} = \left(\frac{\rho C_p}{\gamma R_v} \right) DPV \text{ para } R_a \rightarrow 0, \Omega \rightarrow 0.0$$

donde ρ es la densidad del aire, C_p es la capacidad calorífica específica del aire, R_n es la radiación neta (flujo) y DPV es el déficit de presión de vapor de agua en el aire.

En el caso de las temperaturas de superficie (vegetación; T_v) y del aire (T_a ; flujo de calor sensible), la formulación de McNaughton y Jarvis puede ser puesta como:

$$T_v - T_a = \Omega \left[\frac{\gamma(R_a + R_v)}{\rho C_p (\Delta + \gamma)} \right] R_n - (1 - \Omega) \left[\frac{1}{\gamma R_v / R_a} \right] DPV \quad (3)$$

$$(T_v - T_a) \rightarrow \infty \text{ para } \Omega \rightarrow 1.0$$

$$(T_v - T_a) \rightarrow 0 \text{ para } \Omega \rightarrow 0.0$$

Aunque la formulación de las ecuaciones (1) y (3) sólo es válida para medios homogéneos (latifolios) las implicaciones son de tipo general.

Así, un medio acoplado (bosque acicular) mantiene una diferencia pequeña entre las temperaturas de la vegetación (T_v) y la del aire (T_a).

Puesto que la T_a sigue patrones relativamente coherentes (escalas diarias hacia arriba), es esperable que la T_v esté fuertemente relacionada con los flujos de energía y masa del ecosistema. Lo contrario sucede para los sistemas desacoplados, donde la T_v responde en forma

“caótica” o inversamente a los flujos (pastizales, matorrales). El mismo argumento puede ser utilizado para la relación entre la R_s y la T_s , dado que T_s y T_a (junto con T_v) están acoplados (8).

Para validar la argumentación de que en sistemas perturbados la relación entre T_s y R_s se desacopla (explicando las Fig. 3 y 4) se revisó una base de datos de mediciones diarias de R_s (7), que incluye bosques aciculares (ENF), bosque mixto acicular y de hoja ancha caducifolio (MXD), bosque de hoja ancha caducifolio (DBF), sabana (WSV) y pastizal (GRS).

De acuerdo a los factores de acoplamiento (factor Ω) en relación a los flujos atmosféricos (4) se tiene que el esquema de la Fig. 5 es válido para un ecosistema o bioma particular, donde éste se perturba en forma gradual hasta llegar al suelo desnudo desprovisto de vegetación. En el caso de la vegetación caducifolia en el periodo de caída de las hojas se puede perder el acoplamiento, explicando la dependencia de la relación entre T_s y R_s (3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN. Los datos de R_s de los diferentes biomas analizados se revisaron en función de su correlación con la T_s y sólo aquellos años y biomas que tuvieron una relación exponencial entre T_s y R_s ($R^2 > 0.7$) fueron considerados (sistemas acoplados). La Fig. 6 muestra un ejemplo de un sistema acoplado y la Fig. 7 de un sistema desacoplado.

Se ajustó el modelo de la Fig. 1 a los biomas analizados y se estimaron las intersecciones (a) y pendientes (b) de las etapas crecientes y decrecientes. En la Fig. 8 se muestra la relación entre a y b de la etapa creciente de los biomas acoplados y en la Fig. 9 la misma información, pero para la etapa decreciente.

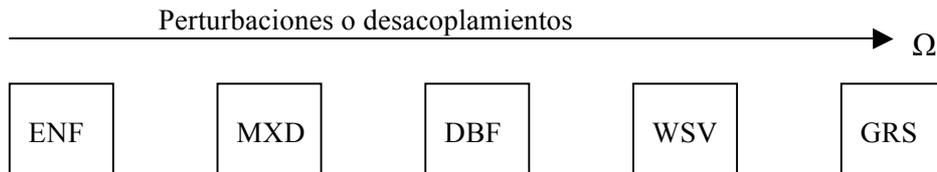


Figura 5. Desacoplamiento de ecosistemas naturales o perturbados.

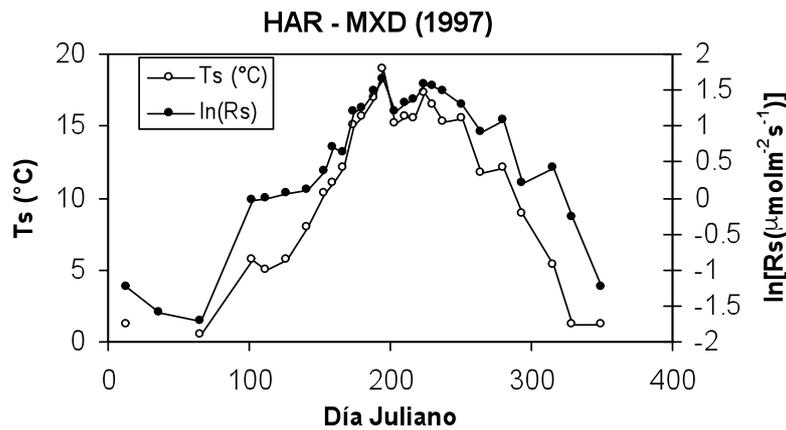


Figura 6. Sistema acoplado Ts-Rs.

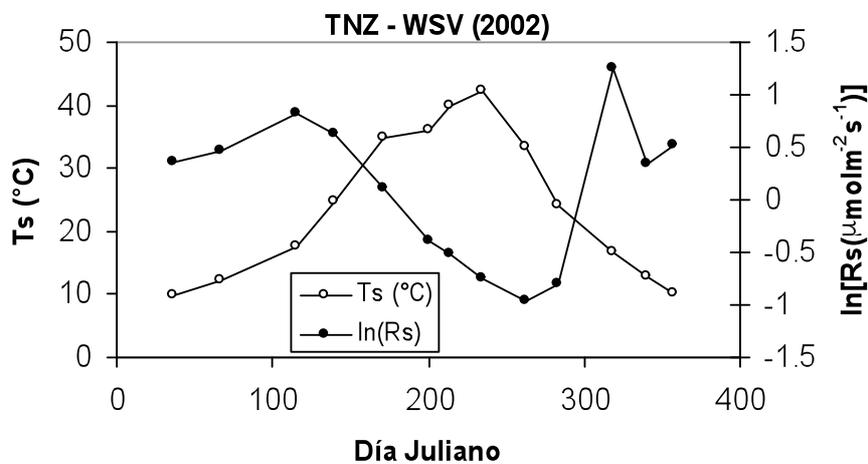


Figura 7. Sistema desacoplado Ts-Rs.

En las Fig. 8 y 9 se observan que los sistemas más acoplados (ENF, MXD y DBF), en ambas etapas, muestran una relación funcional bien definida entre los valores del modelo propuesto. En el caso de los sistemas desacoplados (los pocos casos donde se pudo ajustar razonablemente el modelo lineal), muestran un patrón discordante con los sistemas acoplados. La relación entre los valores del

modelo (a y b) es del tipo general, teniendo en cuenta que los biomas analizados implican diferentes condiciones ambientales (7) y que cada punto de las Fig. 8 y 9 representa un clima particular (anual). Esto define patrones universales para sistemas acoplados atmosféricamente y reduce la complejidad de las estimaciones de los flujos de C (proceso controlado por la atmósfera).

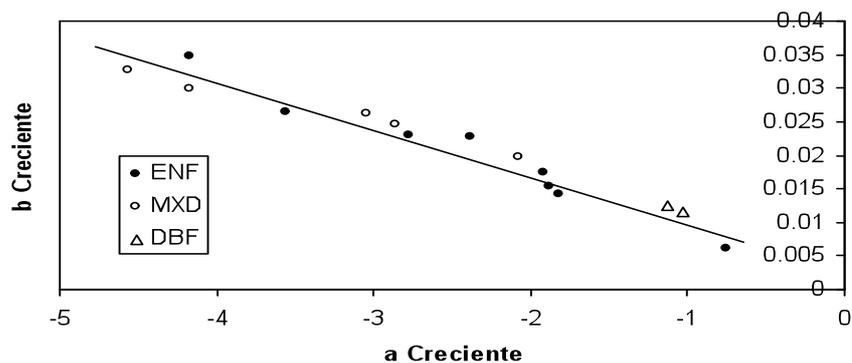


Figura 8. Patrones entre los valores del modelo lineal para la etapa creciente (acoplada).

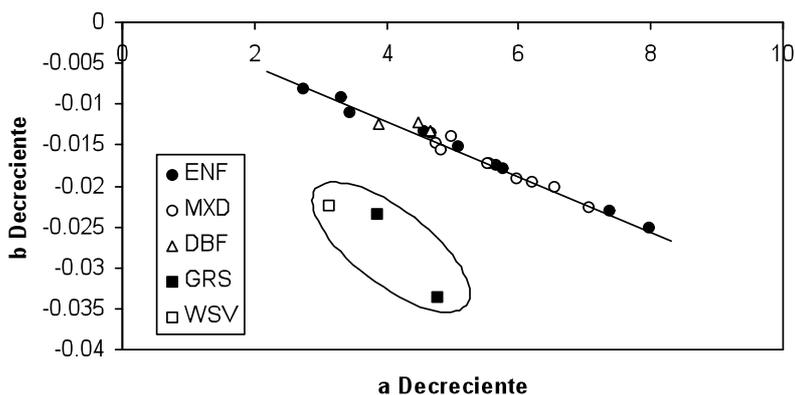


Figura 9. Patrones entre los valores del modelo lineal para la etapa decreciente (acoplada).

Adicionalmente se analizaron dos biomas acoplados en sus respuestas multitemporales. La Fig. 10 muestra los resultados obtenidos para el caso de la etapa creciente del modelo de Rs y la Fig. 11 muestra la relación entre los valores de las etapas crecientes y decrecientes (relación entre ambas etapas).

Del análisis de las Fig. 9 y 10 es claro que los patrones temporales (escala diaria) de los flujos de carbono de los suelos en sistemas acoplados varían en forma dinámica (dependiente del clima y/o manejo), pero coherente (relación lineal). Ésto reduce las necesidades de monitoreos continuos de Rs, dado que, generalmente, los patrones “meta-paramétricos” de las Fig. 9 y 10 tienen una relación lineal que pasa por el origen,

implicando que con sólo un punto (año), podemos caracterizar la dinámica ambiental de la Rs. Por tanto, un punto implicado en los patrones lineales de las Fig. 10 y 11 es que con el conocimiento de las pendientes es posible predecir los valores de Rs máximo (etapa de meseta, si acaso existe). Ello es consecuencia del sistema de rectas que generan espacios meta-paramétricos lineales. En la Fig. 12 se muestra la relación entre la pendiente b y Rs máxima, donde esta última no fue estimada por el modelo, sino que simplemente se extrajo de la base de datos experimentales (error asociado). No obstante, la Fig. 12 muestra una relación lineal entre la pendiente b y Rs, validando el argumento teórico.

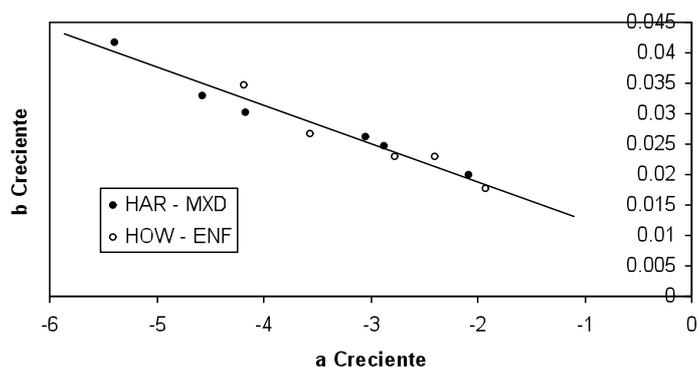


Figura 10. Patrones multitemporales de los valores del modelo lineal de la etapa creciente.

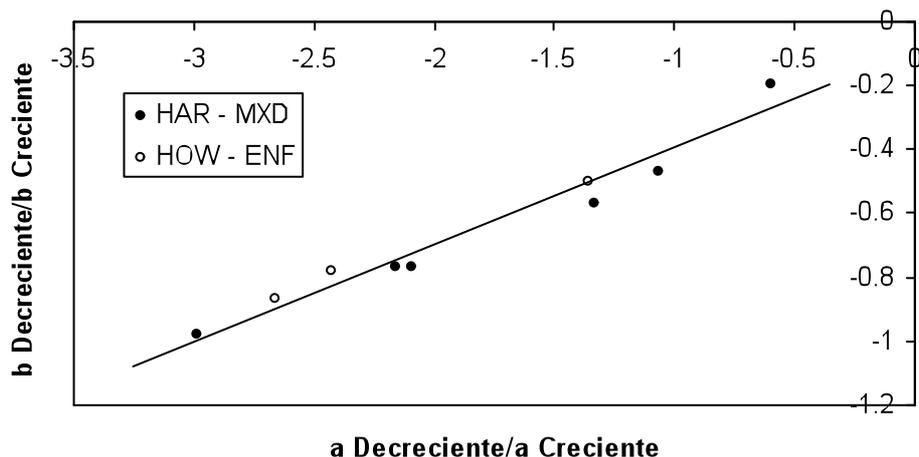


Figura 11. Patrones multitemporales de los valores del modelo lineal de la etapa creciente y decreciente.

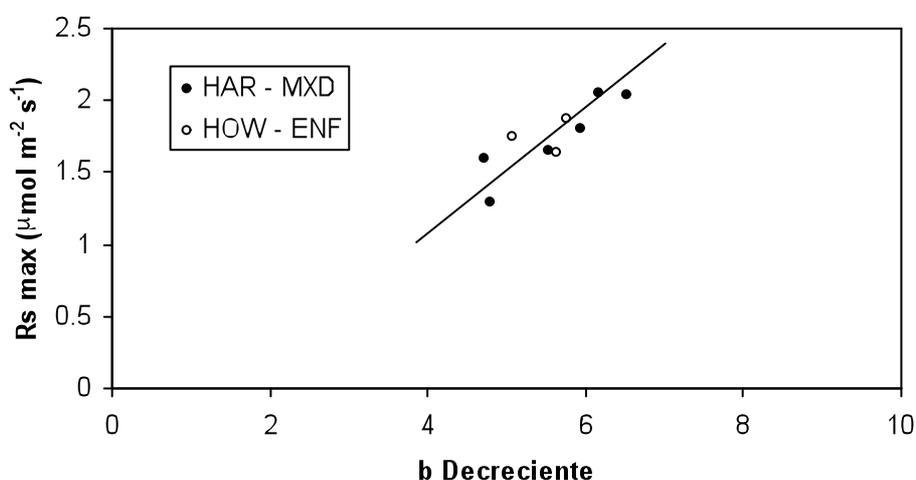


Figura 12. Relación entre b de la etapa decreciente y Rs máxima.

CONCLUSIONES. Aunque sólo se hizo un bosquejo del esquema integral de modelación de la Rs y su asociación a la Ts para la dinámica de los flujos de C edáfico, la evidencia experimental y argumentación teórica señalan que es posible desarrollar un marco integrado (espacios meta-paramétricos) de modelación de un proceso aparentemente muy complejo y explicando los problemas de las relaciones entre Ts y Rs. Asimismo se evidencia el porqué en los sistemas desacoplados atmosféricamente (por ejemplo, sistemas degradados) la modelación de las dinámicas es fundamentalmente dependiente del régimen atmosférico prevaleciente, requiriéndose otro enfoque. Esto es particularmente relevante en relación al cambio climático, donde los sistemas desacoplados (naturales o degradados) no responden directamente a las variaciones climáticas.

LITERATURA CITADA.

1. Covaleda, S., F. Paz, J. F. Gallardo, C. Prat, J. Etchevers. y C. Hidalgo. 2007. Teoría de

- estados y transiciones aplicada a suelos volcánicos sometidos a diferentes manejos I: relación molar (Sio-Sid)/(Alo-Ald). Simposio Carbono Orgánico del Suelo y Calentamiento Global: Perspectivas y Oportunidades de Investigación en Latinoamérica. XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Guanajuato (México): En prensa.
2. Davidson, E.A., I.A. Janssens y Y. Luo. 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} . *Global Change Biol.*, 12: 154-164
3. DeForest, J.L., A. Noormets, S.G. McNulty, G. Sun, G. Tenney y J. Chen. 2006. Phenophases alter the soil respiration-temperature relationship in a oak-dominated forest. *Int. J. Biometeorol.* 5: 135-144
4. Golberg, V. y C. Berthofer. 2001. Quantifying the coupling degree between land surface and the atmospheric boundary layer with the coupled vegetation-atmosphere model HIRVAC. *Annales Geophysicae*, 19: 581-587

5. Lloyd, J. y J.A. Taylor. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.*, 8: 315-323
6. McNaughton, K.G. y P.G. Jarvis. 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: T.T. Kozlowski (ed.). *Water Deficits and Plant Growth*. Vol. II. Academic Press, San Diego. pp. 1-47
7. Monteith, J.L. y M.H. Unsworth. 1990. *Principles of environment physics*. Edward Arnold Publ., New York. 287 pp.
8. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams y K.W. King. 2002. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000. TWRI Report TR-191. Texas Water Resources Institute. College Station, Texas. 498 pp.
9. Paz, F., S. Covaleda, J.F. Gallardo, C. Prat, J. Etchevers y C. Hidalgo. 2007. Teoría de estados y transiciones aplicada a suelos volcánicos sometidos a diferentes manejos II: respiración del suelo. Simposio Carbono Orgánico del Suelo y Calentamiento Global: Perspectivas y Oportunidades de Investigación en Latinoamérica. XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Guanajuato (México). En prensa.
10. Stringham, T.K., W.C. Krueger, y P.L. Shaver. 2001. States, transitions and thresholds: Further refinement for rangeland applications. Special Report 1024. Agricultural Experiment Station, Oregon State University, Corvallis (USA). [≤www.ftw.nrcs.usda.gov/glti/pubs.html>](http://www.ftw.nrcs.usda.gov/glti/pubs.html).
11. Stringham, T.K, W.C. Krueger y P. L Shaver. 2003. State and transition modeling: An ecological process approach. *J. Range Manage.*, 56: 106-113.
12. Tugel, A.J. y J.R. Brown. 2001. State and transition ecosystem models: Application to soil survey and dynamic soil properties databases. In: *Proceedings of the National Cooperative Soil Survey Conference*, June 25-29, Fort Collins (USA). pp: 194-201

AGRADECIMIENTOS. Los autores agradecen a Aurelio Báez, Paola Bustos, Lenin Medina y a Crecenciano Chavez su colaboración en los trabajos de campo y a la División General XII de la Unión Europea la financiación del Proyecto *REVOLSO*.

Paz F., Covalada S., Gallardo J.F., Prat Christian, Etchevers J.D., Hidalgo C.

Teoria de estados y transiciones aplicada a suelos volcanicos sometidos a diferentes manejos : 3. Acoplamiento con la temperatura del suelo.

In : Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo. Leon : SLCS, 2007, 7 p. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 17., Leon (MEX), 2007/09/17-21.