

Avances de Investigación

Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica

Ney Ríos¹; Aura Y. Cárdenas²; Hernán J. Andrade¹; Muhammad Ibrahim¹; Francisco Jiménez¹; Freddy Sancho³; Elías Ramírez²; Bismark Reyes²; Alfredo Woo²

Palabras clave: sistemas silvopastoriles; bosque secundario; usos de la tierra

RESUMEN

La demanda de agua dulce se duplica cada veinte años, a un ritmo dos veces mayor que el crecimiento de la población mundial. Pese a su gran importancia, el agua es uno de los recursos naturales más degradados a nivel mundial, debido principalmente a la reducción de la cobertura forestal y a los cambios en el uso del suelo que reducen la capacidad de captación y almacenamiento de agua en los mantos acuíferos. En este trabajo, se evaluó la infiltración y la escorrentía superficial en pasturas nativas sobrepastoreadas sin árboles, bancos forrajeros, pasturas mejoradas con árboles y tacotales en la época lluviosa (mayo a noviembre) en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. Los suelos evaluados fueron similares en los sistemas en Nicaragua y Costa Rica (Alfisolos e Inceptisolos, respectivamente). En ambas localidades, los suelos presentan textura franca a franca arcillosa con pendientes moderadas a altas. La escorrentía superficial fue evaluada mediante la instalación de tres parcelas de escorrentía por sistema. La capacidad de infiltración fue estimada mediante el método de inundación o anillos concéntricos, realizando tres pruebas simultáneas en cada sistema. Las pasturas nativas sobrepastoreadas presentaron la mayor escorrentía superficial, la cual fue cuatro y cinco veces más alta que la del tacotal; dos y tres veces mayor que la de la pastura mejorada con árboles; y siete y once veces más que la del banco forrajero en Costa Rica y Nicaragua, respectivamente. El tacotal mostró la mayor capacidad de infiltración en comparación con los demás sistemas, mientras que las pasturas arboladas tuvieron mayor infiltración que las pasturas nativas sobrepastoreadas. Los árboles dispersos en pasturas nativas o mejoradas disminuyen la escorrentía superficial e incrementan la infiltración, favoreciendo la conservación de agua en las fincas ganaderas.

Superficial runoff and infiltration in conventional livestock production and silvopastoral systems in the sub-humid tropics of Nicaragua and Costa Rica

Keywords: silvopastoral systems, secondary forest, land uses

ABSTRACT

Demand for sweet water doubles every twenty years, at twice the rate of world population growth. However, water is one of the most degraded natural resources in the world, due mainly to the decrease in forested lands and changes in land use that reduce the capacity for water reception and storage in aquifer mantels. Superficial runoff and infiltration rates were evaluated in native overgrazed pastures without trees, native pastures with trees, improved pastures with trees and young secondary forests (*tacotal*) in the rainy season in the sub-humid tropics of Nicaragua and Costa Rica. The soils evaluated were similar for land use systems in Nicaragua and Costa Rica (Alfisolos and Inceptisolos, respectively). In both localities, soil texture was loam to clay loam, with a sloping landscape. Surface runoff was estimated with three runoff plots per system. Infiltration capacity was estimated by the double ring infiltration method. Native overgrazed pastures without trees presented the highest surface runoff, which was four and five times greater than that of young secondary forests; two and three times higher than that of improved pasture with trees; and seven and 11 times greater than that of fodder banks in Costa Rica and Nicaragua, respectively. Young secondary forests showed the highest infiltration capacity compared to the other systems, while the pasture with trees had a higher infiltration rate than native overgrazed pastures. Isolated trees in native or improved pastures decrease the surface runoff and increase the infiltration of water, which can lead to water conservation on cattle farms.

¹ CATIE, Costa Rica. Correos electrónicos: jríos@catie.ac.cr (autor para correspondencia), handrade@catie.ac.cr, mibrahim@catie.ac.cr, fjimenez@catie.ac.cr.

² Nitlapán – UCA, Nicaragua. Correo electrónico: auracard@ns.uca.edu.ni.

³ Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: fsancho@cia.ucr.ac.cr.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el cambio más importante en el uso del suelo en el trópico latinoamericano ha sido la conversión de bosques a pasturas (Kaimowitz 1996). Ante este escenario, en muchas regiones de Latinoamérica se ha intentado reconvertir los sistemas tradicionales de producción agropecuaria hacia sistemas intensivos que compatibilicen la producción con las acciones de conservación (Ibrahim 2001). Un manejo adecuado de las pasturas en el trópico debería incluir la introducción del componente arbóreo, o alternar al menos con fragmentos de bosque (Ibrahim et ál. 2001). En Nicaragua, el avance de la frontera agrícola y la falta de planificación y organización adecuadas para la gestión sostenible de los recursos naturales han provocado el deterioro ambiental, especialmente del recurso hídrico (Lorio et ál. 2004).

La cobertura vegetal desempeña un papel importante en la regulación del ciclo hidrológico (Walling 1980). Bajo condiciones de precipitación, la interceptación de la lluvia por las copas de los árboles reduce la cantidad de agua que cae al suelo (Ibrahim et ál. 2001). Asimismo, la presencia de árboles afecta la dinámica del agua de varias formas: i) actuando como barrera que reduce la escorrentía; ii) como cobertura, reduciendo el impacto de las gotas, y iii) como mejoradora del suelo, incrementando la infiltración y la retención de agua (Young 1997). Estos efectos dependen del tamaño del árbol, principalmente de su altura y la cobertura de copa. Un sistema silvopastoril (SSP) es una opción de producción agropecuaria que tiende a incrementar la productividad y el beneficio a los productores, así como a reducir los impactos ambientales negativos de los sistemas tradicionales (Pezo e Ibrahim 1996). Los SSP ofrecen mayores potencialidades que muchos sistemas agrícolas en el manejo de los recursos naturales (Murgueitio 2000). Una de las interacciones más importantes en los SSP es el efecto de los árboles sobre el balance hídrico del sistema (Wilson y Ludlow 1991). El presente estudio tuvo como objetivo estimar la escorrentía superficial e infiltración en sistemas de ganadería convencional y silvopastoril en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación fue realizada en fincas ganaderas de Nicaragua y Costa Rica. En Nicaragua, el estudio se realizó en la microcuenca del Río Paiwitas, Matiguás (12°54'18"-12°52'22"N; 85°40'45"-85°43'10"O; 224-500 msnm). El área presenta una precipitación media de

2200 mm año⁻¹ y una temperatura media anual de 26 °C. En Costa Rica, la investigación se desarrolló en la subcuenca del Río Jabonal, cuenca del río Barranca (10°4'12"-10°12'00"N; 84°38'24"-84°41'24"O; 700 msnm). La zona presenta una precipitación media de 3200 mm año⁻¹, una temperatura media anual de 22 °C y una humedad relativa del 90%. En ambas localidades, la época lluviosa cubre de mayo a noviembre. Los suelos de los sitios se clasifican como Alfisoles e Inceptisoles para Nicaragua y Costa Rica, respectivamente (USDA 1999). Los suelos de ambos sitios son de textura franca a franca arcillosa, quebrados, fuertemente ondulados, con zonas escarpadas y pendientes de entre 20 y 60%.

Sistemas evaluados

Los sistemas se seleccionaron de acuerdo con su representatividad en las zonas de estudio, el tipo de suelo y pendientes de 25 - 35 %, de modo tal que los impactos de los sistemas sobre las variables hidrológicas se debieran al efecto de la vegetación y no a efectos del suelo y/o pendiente.

En Nicaragua, los sistemas evaluados fueron: (i) pasturas nativas sobrepastoreadas (PNS; pastos bajo pastoreo continuo sin presencia de árboles); (ii) banco forrajero de gramíneas (BFG; instalado hace 6 años, pasto 'King grass' bajo corte y acarreo sin presencia de árboles); (iii) pasturas mejoradas con árboles (PMA; establecidas hace 2 años con *Brachiaria brizantha* y alta densidad de árboles, es decir, más de 30 árboles ha⁻¹ y una riqueza de 30 especies de árboles); (iv) tacotal pastoreado (TAC; establecido hace 17 años, sin presencia de pastos, con una riqueza de 23 especies de árboles y arbustos, bajo pastoreo rotacional o ramoneo).

En Costa Rica, los sistemas evaluados fueron: (i) pasturas nativas sobrepastoreadas (PNS; pastura de *Paspalum* spp. establecida hace 10 años; no presenta árboles y se maneja bajo pastoreo continuo; presenta signos evidentes de compactación y erosión); (ii) banco forrajero (BF; establecido hace 14 años con *Cratylia argentea* y manejado mediante corte y acarreo); (iii) pastura mejorada con árboles (PMA; instalada hace 10 años y dominada por *Brachiaria decumbens* usado en pastoreo rotativo, con una densidad de árboles mayor a 30 individuos ha⁻¹ y una riqueza de 4 especies de árboles); (iv) tacotal (TAC; establecido hace 30 años y bajo manejo selectivo de la regeneración natural. Este sistema presentó una abundancia mayor a 50 árboles ha⁻¹ y una riqueza de 14 especies de árboles).

Variables evaluadas

Caracterización de la vegetación

Se caracterizó la estructura horizontal y vertical de los sistemas en Costa Rica. La caracterización horizontal se realizó mediante un muestreo en una parcela de 20 x 50 m, la cual fue dividida en subparcelas de 10 x 10 m. En cada subparcela, con ayuda de un marco metálico de 0,50 x 0,50 m y mediante la observación directa, se estimó el porcentaje de cobertura de pasto, maleza y de suelo desnudo (sin cobertura herbácea viva). La caracterización de la estructura vertical se realizó mediante la estimación del porcentaje de cobertura vegetal en tres estratos de altura (0-2, 2-9 y 9-20 m); en la que se evaluó la riqueza y abundancia de árboles y arbustos mediante la identificación y el conteo de los individuos. Asimismo, se estimó la altura y el diámetro a la altura del pecho (dap) de los árboles, así como la cobertura arbórea, con el uso de un densitómetro.

Escorrentía superficial

Se establecieron tres parcelas de escorrentía (5 x 10 m) en sitios de pendiente similar en cada uso del suelo. Al final de la parcela de escorrentía se instaló una manguera que recolecta el agua y la lleva a un recipiente almacenador (Figura 1a). La pérdida de agua escurrida durante lluvias mayores a 20 mm se evitó usando dos recipientes; en el segundo recipiente se recolectó solamente una fracción del agua escurrida, 1/15 y 1/8 del primer recipiente para Costa Rica y Nicaragua, respectivamente (Figura 1b). La fracción de agua por recolectar se estimó mediante el cálculo de la posible agua escurrida en el área de la parcela de escorrentía

ante un posible evento 10% superior al de la máxima precipitación registrada en la zona. Las mediciones se registraron por las mañanas (6:00–9:00 h) durante los meses de septiembre a noviembre. La medición del volumen de agua escurrida de las parcelas de escorrentía se realizó con una regla graduada, midiendo el nivel del agua en el Recipiente 2 (Figura 1b). El agua de este recipiente se evacuó después de cada lectura. El Recipiente 1 se mantuvo lleno de agua durante todo el período de evaluación. Asimismo, se verificó que los recipientes quedaran nivelados para la próxima lectura; en el primero para asegurar una pérdida de agua equitativa, y en el segundo para realizar la lectura del nivel de agua. Se llevó a cabo un mantenimiento diario de los bordes de la parcela para evitar la entrada y salida de agua de la parcela. El cálculo de la escorrentía superficial de la parcela de escorrentía se hizo midiendo el volumen en el segundo recipiente, el cual fue multiplicado por la cantidad de salidas del primer recipiente (8 y 15 para Nicaragua y Costa Rica, respectivamente). La precipitación se midió mediante un pluviómetro de 127 mm de capacidad, instalado en la parte superior de cada parcela de escorrentía.

Infiltración

La capacidad de infiltración se estimó a través del método de inundación o anillos concéntricos. Se realizaron tres pruebas simultáneas en cada sistema evaluado, haciendo las pruebas en la parte superior, media y baja de cada parcela de escorrentía. El método consiste en instalar dos cilindros: uno interno, de 30 cm de diámetro y 30 cm de altura, y uno externo, de 50 cm de diámetro



Figura 1. Sistema de recolección y drenaje de la parcela de escorrentía en Esparza, Costa Rica

con una altura de 20 cm. El anillo externo se introdujo en el suelo hasta 5 cm de profundidad y el interno hasta 10 cm. Durante todo el tiempo de la prueba, el anillo externo se mantuvo con una lámina de agua de 5 cm. El anillo interno fue llenado y ahí se realizó la lectura con ayuda de una regla graduada, a intervalos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos. El nivel mínimo de agua del anillo interno fue de 7 cm. Se promedió la velocidad de infiltración por sistema para cada intervalo de tiempo. Una vez obtenidos los datos, se ajustó una curva usando la ecuación de Kostyakov, $I = at^{b-1}$ (Henríquez y Cabalceta 1999), donde I es la infiltración (cm h^{-1}), t es el tiempo (horas), a es el intercepto y b la pendiente de la curva. Se estimó la velocidad de infiltración promedio a una hora después de iniciado el proceso de infiltración.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza con tres muestras para la escorrentía superficial y la infiltración. Se probó un modelo de regresión donde la variable independiente fue el tiempo y la dependiente la velocidad de infiltración. Con la finalidad de conocer el grado de correlación entre la cobertura vegetal y los parámetros hidrológicos evaluados, se realizó un análisis de correlación entre estas variables recolectadas en Costa Rica. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa InfoStat (2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Escorrentía superficial

La escorrentía superficial fue estadísticamente diferente en los sistemas evaluados ($p < 0,05$) en ambas localidades. Las PNS presentó una escorrentía superficial entre 28 y 48%, la cual fue de cuatro a cinco veces mayor a la del tacotal (7 y 10,5% para Costa Rica y Nicaragua, respectivamente), de dos a tres veces mayor a la de la pastura mejorada con árboles y de siete a once a veces mayor que la del banco forrajero. Aunque la menor escorrentía se encontró en bancos forrajeros y sistemas con árboles, el mayor impacto en la disminución de escorrentía se encontraría al sustituir pasturas nativas por mejoradas (Figura 2).

La escorrentía superficial en los sistemas de uso del suelo en Costa Rica estuvo influenciada por la cobertura arbórea y su área basal ($R = -0,71$, $p = 0,01$; $R = -0,67$, $p = 0,02$, respectivamente), mostrando que el incremento en la cobertura arbórea disminuye la escorrentía superficial. Estos resultados son congruentes con los reportados por Hong (1978) y Humphreys (1991), quie-

nes concluyen escorrentía superficial está inversamente relacionada con la cobertura vegetal. De esta forma, en áreas con un alto porcentaje de suelo desnudo, como en las pasturas nativas sobrepastoreadas (PNS), se observa que la escorrentía superficial es mayor a cualquier intensidad de precipitación que en los sistemas con componente arbóreo (PMA). En los BF se observaron los niveles más bajos de escorrentía (Figura 3), a pesar de estar en su mayoría desprovistos de árboles. Esto se debe posiblemente a la alta densidad de pastos y a la elevada cobertura del suelo con hojarasca producto de los cortes y acarreos, que disminuye el impacto de las gotas de agua sobre el suelo y la velocidad del escurrimiento. Además del efecto de los factores físicos —tales como topografía, cobertura vegetal, pendiente y tipo de suelo— sobre la escorrentía superficial, existen factores antropogénicos, como el tipo de manejo. En los sistemas ganaderos, se evidencia que las pasturas arboladas pueden disminuir considerablemente la escorrentía superficial y, por consiguiente, contribuir a disminuir la erosión y aumentar la retención de agua en el suelo.

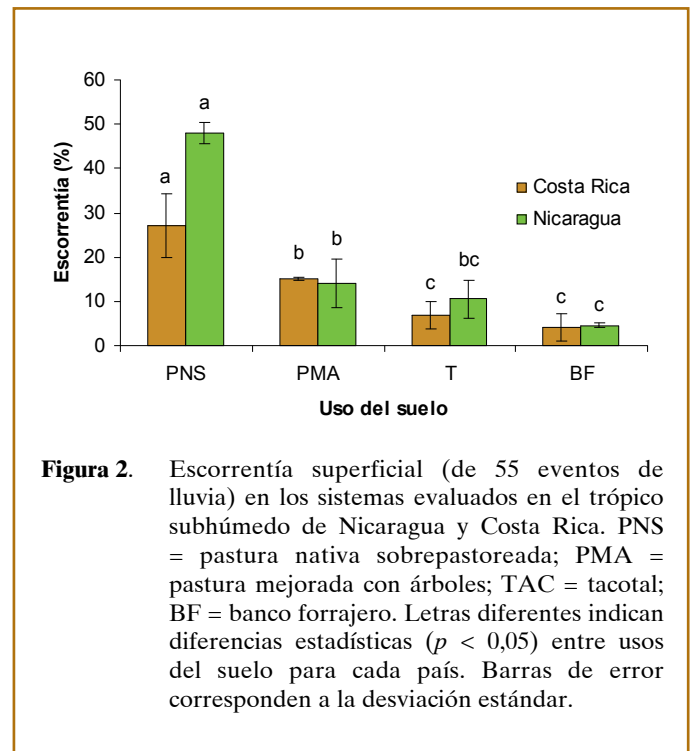


Figura 2. Escorrentía superficial (de 55 eventos de lluvia) en los sistemas evaluados en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. PNS = pastura nativa sobrepastoreada; PMA = pastura mejorada con árboles; TAC = tacotal; BF = banco forrajero. Letras diferentes indican diferencias estadísticas ($p < 0,05$) entre usos del suelo para cada país. Barras de error corresponden a la desviación estándar.

Capacidad de infiltración

El tacotal mostró la mayor infiltración en comparación con los demás sistemas. Las pasturas arboladas tuvieron mayor infiltración que las pasturas nativas sobrepastoreadas (Cuadro 1). Esto coincide con los resultados de Suárez de Castro (1980), quien encontró una eficiencia de infiltración del 68,9 y 24,7% en bosques y pasturas,

Cuadro 1. Capacidad de infiltración promedio en sistemas de producción ganadera y en un tacotal en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica

Sistema	Nicaragua			Costa Rica		
	Ecuación	R ²	Infiltración promedio (cm h ⁻¹)*	Ecuación	R ²	Infiltración promedio (cm h ⁻¹)*
PNS	$I = 0,08t^{-0,82}$	0,73	0,03	$I = 0,35 t^{-0,88}$	0,65	0,07
BF	$I = 0,39t^{-0,68}$	0,85	0,46	$I = 1,06 t^{-0,75}$	0,76	0,75
PMA	$I = 0,34t^{-0,58}$	0,68	0,81	$I = 0,25 t^{-0,71}$	0,8	0,23
TAC	$I = 0,34t^{-0,55}$	0,71	0,96	$I = 2,91 t^{-0,68}$	0,87	3,54

Nota:* Infiltración promedio a 1 hora de iniciada la prueba. PNS = pastura nativa sobrepastoreada; BF = banco forrajero de gramíneas; PMA = pastura mejorada con árboles; TAC = tacotal pastoreado.

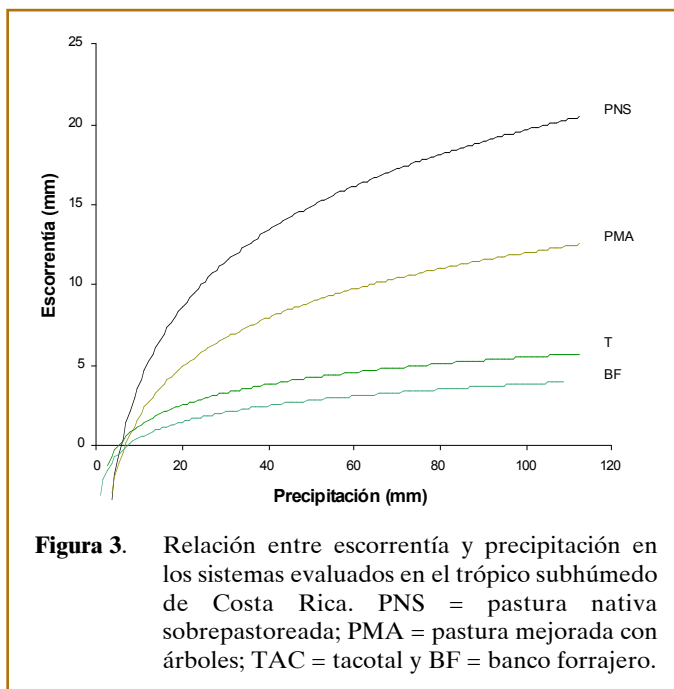


Figura 3. Relación entre escorrentía y precipitación en los sistemas evaluados en el trópico subhúmedo de Costa Rica. PNS = pastura nativa sobrepastoreada; PMA = pastura mejorada con árboles; TAC = tacotal y BF = banco forrajero.

respectivamente. Se observó una tendencia similar en el banco forrajero de gramíneas, las cuales a pesar de no tener cobertura arbórea sí presentan una alta cobertura de suelo. En las pasturas nativas sobrepastoreadas, se observó una capacidad de infiltración baja debida principalmente al sobrepastoreo, que conduce a la compactación de los suelos y disminuye el espacio poroso y la capacidad de infiltración (Singh y Gupta 1990, Takar et ál. 1990).

La capacidad de infiltración estuvo influenciada por la cobertura arbórea ($R = 0,75, p = 0,01$) y por el área basal ($R = 0,78, p < 0,01$). Los sistemas con mayor cobertura presentaron los mayores valores de infiltración, debido quizás al efecto esponja del *mulch* que se encontraba

sobre el suelo, el cual permite que el agua se mantenga a lo largo de la lluvia (Musgrave y Nichols 1942, Adams 1966). La intensidad del pastoreo en los sistemas ganaderos (PNS, PNA y PMA) es un factor que pudo afectar la capacidad de infiltración, debido principalmente a la compactación del suelo por el pisoteo del ganado (Singh y Gupta 1990, Takar et ál. 1990).

CONCLUSIONES

- La cobertura del suelo en fincas ganaderas del trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica afectó positivamente la tasa de infiltración y negativamente la escorrentía superficial. El efecto de la vegetación sobre estas características hidrológicas se observa en sistemas con alta cobertura de suelo producto del mantillo y/o la cobertura vegetal.
- Los incrementos en la cobertura arbórea contribuyen a disminuir la escorrentía superficial con la consecuente disminución del potencial de erosión hídrica. La escorrentía superficial podría reducirse notablemente al transformar pasturas nativas sobrepastoreadas en pasturas mejoradas arborizadas; además, este sistema podría generar productos maderables para el consumo en la finca o la venta en mercados locales. La cobertura arbórea, más que la herbácea, contribuye a incrementar la infiltración en el suelo. El incremento de la eficiencia de infiltración de agua de lluvia es muy significativo en el balance hídrico, favoreciendo la disponibilidad de agua para la planta y mejorando la recarga hídrica.
- Se evidencia que los sistemas silvopastoriles brindan beneficios hidrológicos al contribuir a la infiltración y disminuir la escorrentía superficial en los mantos acuíferos de zonas de recarga, lo que beneficia la recarga y sustento del agua subterránea.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adams, J. 1966. Influence of mulches on runoff, erosion and soil moisture depletion. *Soil Science* 30: 110-14.
- Henríquez, C; Cabalceta G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, CR. 122 p.
- Hong, A. 1978. Evaluation of the use of vegetative covers for soil conservation in FELDA. *Agricultural Journal of Malaysia* 51:335 -342.
- Humphreys, L. 1991. *Tropical pasture utilization*. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 202 p.
- Ibrahim, M. 2001. Potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales. Conferencia electrónica en potencialidades de los sistemas silvopastoriles para la generación de servicios ambientales (en línea). Roma, IT, FAO. Consultado 1 ene. 2007. Disponible en: <http://www.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/conferencia.htm>
- _____; Schlonvoigt, A; Camargo, J; Souza, M. 2001. Multi-strata silvopastoral systems for increasing productivity and conservation of natural resources in Central America. *In* Gomide, JÁ; Mattos, WRS; Da Silva, RSC. eds. *International Grassland Congress (19)*. Proceedings. Brasil, FEALQ. p. 645 – 650.
- InfoStat. 2002. InfoStat. Versión 1.1/Profesional. Manual del usuario. Grupo Infostat, FCA. Argentina, Universidad Nacional de Córdoba. p. 64–80.
- Kaimowitz, D. 1996. Livestock and Deforestation Central America in the 1980s and 1990s: A Policy Perspective. Indonesia, CIFOR. 88 p.
- Lorío Berrios, AL. 2004. Procesos organizativos, regulación y tecnología para el manejo y conservación del recurso hídrico y mitigación de la sequía, subcuenca del río aguas calientes, Nicaragua. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 150 p.
- Murgueitio, E. 2000. Sistemas agroforestales para la producción ganadera en Colombia. *Pastos y Forrajes* 23(3):235 - 250.
- Musgrave, G; Nichols, M. 1942. Organic matter in relation to land use. *Soil Sci. Soc. Am. Proc* 7:22-28.
- Pezo, D; Ibrahim, M. 1996. Sistemas Silvopastoriles: una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. *In* Foro Internacional sobre “Pastoreo intensivo sobre zonas tropicales” (I, 1996, Veracruz, MX). Memoria. Morelia, MX. p 39.
- Singh, R; Gupta, M. 1990. Impact of grazing on infiltration in forest ecosystems. *Journal of Tree Sciences* 9(2):82 - 85.
- Suárez de Castro, F. 1980. Conservación de suelos. San José, CR, IICA. 315 p.
- Takar, A; Dobrowski, J; Thurow, T. 1990. Influence of grazing, vegetation life-form, and soil type on infiltration rates and inter-rill erosion on Somalian rangeland. *Journal of Range Management* 43(6):486 – 490.
- USDA. 1999. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 869 p.
- Walling, E. 1980. Water in the catchment ecosystem. *In* Water quality in catchment ecosystem. New York, US, John Wiley. p. 1-47.
- Wilson, JR; Ludlow, MM. 1991. The environment and potential growth of herbage under plantations. *In* Shelton, HM; Stür, WW. eds. *Forages for plantations crops*. Camberra, AU, ACIAR. p. 10-24. (ACIAR Proceedings No. 32).
- Young, A. 1997. *Agroforestry systems for soil management*. 2 ed. New York, US, CAB Internacional. 320 p.