

La sustentabilidad agrícola: un análisis jerárquico

J.A. ZINCK,¹ J.L. BERROTERÁN,² A. FARSHAD,¹
A. MOAMENI,³ S. WOKABI⁴ Y E. VAN RANST⁵

¹ ITC, PO Box 6, 7500 AA Enschede, Holanda

² Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Zoología Tropical, Caracas, Venezuela

³ Soil and Water Research Institute, North Kargar Avenue, Jalale Ale, Teherán, Irán

⁴ Kenya Soil Survey, KARI, PO Box 14733, Nairobi, Kenia

⁵ Ghent University, Laboratory of Soil Science, Krijgslaan 281 (S8), B-9000 Ghent, Bélgica

Resumen. Como el concepto de sustentabilidad no puede medirse directamente, se requieren indicadores para determinar los niveles y las variaciones espacio-temporales que presenta la sustentabilidad de una determinada actividad. Este artículo analiza la sustentabilidad agrícola en cuatro niveles jerárquicos: el sistema de manejo de la tierra, el sistema de cultivo, el sistema de producción y el sistema del sector agrícola como un todo. Se aplicaron diferentes enfoques metodológicos y técnicas, empleando indicadores simples o compuestos, para evaluar la sustentabilidad agrícola en cada nivel mediante un estudio de caso.

Palabras clave: agricultura sostenible, sistema de manejo de la tierra, sistema de cultivo

Abstract. *This paper brings together several case studies in which different methodological approaches and techniques mobilizing single or composite indicators were applied to assess agricultural sustainability at four hierarchical levels, including the land management system, the cropping system, the farming system, and the agricultural sector system.*

Keywords: *sustainable agriculture, land management system, cropping system*



INTRODUCCIÓN

Agricultura sustentable implica, entre otras cosas, conservación de los sistemas naturales a largo plazo, producción óptima con reducidos costos de pro-

ducción, adecuado nivel de ingreso y beneficio por unidad de producción, satisfacción de las necesidades alimentarias básicas, y suficiente abastecimiento para

cubrir las demandas y necesidades de las familias y comunidades rurales (Brown *et al.*, 1987; Liverman *et al.*, 1988; Lynam y Herdt, 1989). Todas las definiciones de agricultura sustentable promueven armonía ambiental, económica y social para cumplir con el significado del concepto de sustentabilidad. Por ser un concepto, la sustentabilidad no puede medirse directamente, por lo que se requieren indicadores adecuados para determinar el nivel y la duración de la sustentabilidad (Zinck y Farshad, 1995; Bell y Morse 1999). Si se acepta que la agricultura es una jerarquía de sistemas anidados (Fresco, 1986; Conway, 1987; Giampietro y Pastore, 2001), un indicador de sustentabilidad es una variable que permite describir y monitorear procesos, estados y tendencias de los sistemas de producción agrícola en diferentes niveles jerárquicos.

Este artículo reúne y contrasta varios estudios de caso en los cuales se aplicaron diferentes enfoques metodológicos y diferentes técnicas, que emplean indicadores simples o compuestos para evaluar la sustentabilidad agrícola en cuatro niveles jerárquicos, incluyendo el sistema de manejo de la tierra,

el sistema de cultivo, el sistema de producción y el sistema del sector agrícola nacional (cuadro 1) (Zinck *et al.*, 2004). El primer estudio de caso (Irán) analiza el sistema de manejo de la tierra a nivel de unidades de suelo individuales; utiliza gráficos de control de calidad estadístico para evaluar el estado de fertilidad del suelo y su efecto en la sustentabilidad agrícola. El segundo estudio de caso (Kenia) se concentra en el sistema de cultivo a nivel de parcela; emplea el análisis de la brecha de rendimientos para evaluar la sustentabilidad de la productividad de los cultivos. El tercer estudio (Irán) se refiere al sistema agrícola a nivel de la unidad de producción (la finca); hace uso del análisis del balance energético para comparar la sustentabilidad de sistemas agrícolas tradicionales y modernos. El último estudio de caso (Venezuela) concierne al sector agrícola como un todo; utiliza un índice agregado para monitorear la sustentabilidad de la actividad agrícola a nivel regional/nacional. En cada caso se implementa un enfoque metodológico adaptado al nivel jerárquico en estudio. Se pone a prueba su aptitud para evaluar la sustentabilidad y se resaltan sus limitaciones.

CUADRO 1. LA AGRICULTURA COMO JERARQUÍA DE SISTEMAS Y LA SECUENCIA DE LOS ENFOQUES APLICADOS A LA EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD AGRÍCOLA

NIVEL JERARQUICO	UNIDAD	INDICADOR	ENFOQUE / TÉCNICA
Sistema de manejo de la tierra	Unidad de suelo	Propiedad de suelo	Control de calidad
Sistema de cultivo	Parcela	Rendimiento del cultivo	Brecha de rendimientos
Sistema de producción	Finca	Entradas y salidas	Balance energético
Sistema del sector agrícola	Región o país	Índices parciales	Índice agregado
		§ agrodiversidad	
		§ eficiencia del sistema	
		§ recurso tierras	
		§ seguridad alimentaria	

Fuente: adaptado de Zinck *et al.*, 2004.

En condiciones ideales, un intento como el que se propone aquí debería realizarse en el contexto de un solo y mismo país en todos los niveles categóricos de la jerarquía agrícola, para así lograr una correcta agregación e integración de los datos, indicadores y enfoques de evaluación. Hasta ahora, en apariencia, no se ha logrado un intento de esta naturaleza. A menudo se ha discutido y llamado la atención sobre la necesidad de integrar los diferentes enfoques de evaluación, pero más desde un punto de vista conceptual que a través de casos concretos de aplicación, anidados en un marco jerárquico a nivel de un mismo país (Bell y Morse, 1999; Giampietro y Pastore, 2001). Este artículo analiza de manera crítica las bondades y limitaciones de varios enfoques de evaluación de la sustentabilidad agrícola, específicos de cada nivel jerárquico de esta actividad, con el fin de contribuir a que se logre algún día la deseada integración metodológica. Para ello se han empleado datos provenientes de diferentes países.

EL SISTEMA DE MANEJO DE LA TIERRA: GRAFICO DE CONTROL DE CALIDAD

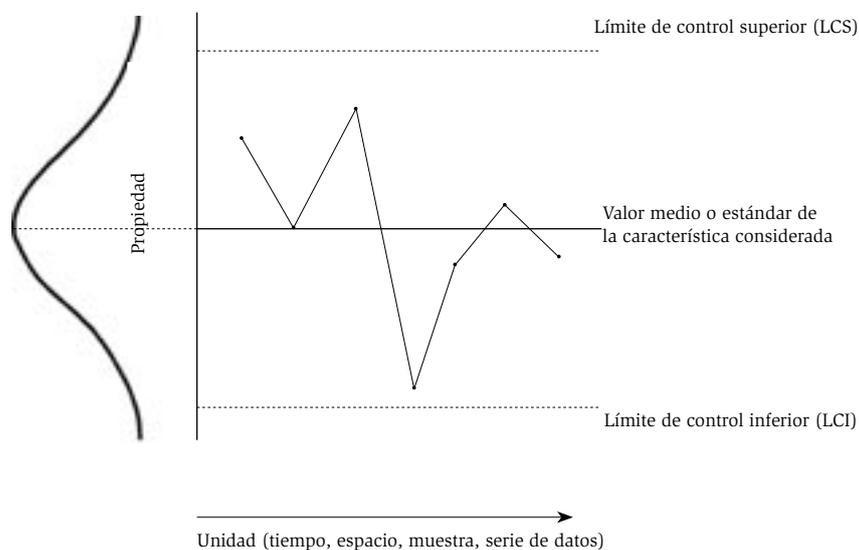
EL ENFOQUE

Usualmente, los agricultores y campesinos, tanto los que laboran en sistemas tradicionales como los que operan en sistemas modernos, adaptan sus prácticas de manejo a las propiedades de cada unidad de suelo. Estas propiedades sufren modificaciones y, a menudo, un claro deterioro provocado

por el uso prolongado y/o intensivo, lo que conduce a cambios en la calidad del suelo. Su estado en determinado momento y su tasa de evolución a través del tiempo proveen indicación sobre la sustentabilidad de un tipo de utilización de las tierras, en una unidad de suelo sujeta a determinadas prácticas de manejo, por comparación con valores de referencia que reflejen aptitud óptima para cultivos específicos. Se han usado métodos estadísticos, incluyendo análisis de regresión y de varianza, para diseñar modelos para las variaciones de las propiedades de suelo en el tiempo y espacio y para evaluar el efecto de los cambios de calidad edáfica causados por un mal manejo. Larson y Pierce (1994) han sugerido que los gráficos de control de calidad estadístico (*statistical quality control charts* o SQC), comúnmente utilizados para controlar la variabilidad de procesos en la industria manufacturera de bienes y servicios, podrían ser instrumentos estadísticos adecuados para evaluar y monitorear los cambios en la calidad del suelo (figura 1).

Cuando se utilizan gráficos de control para evaluar la calidad de suelo, hay que hacer una distinción entre

FIGURA 1: FORMA BÁSICA DEL GRÁFICO DE CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD



Fuente: adaptado de Ryan, 1989; Larson y Pierce, 1994.

límites de control estadístico, calculados con base en procedimientos estadísticos, y límites de control de metas basados en normas de suficiencia o aceptación. Por ejemplo, la media de una población de datos que describe una propiedad de suelo puede estar bajo control estadístico, por encontrarse entre el límite de control superior (LCS) y el límite de control inferior (LCI), fijados generalmente a valores de 3-sigma (3 desviaciones estándar), y sin embargo, caer por debajo de un valor umbral crítico indicando aptitud marginal. En este sentido, se necesitan normas de calidad del suelo para determinar lo que es bueno o malo y detectar si un determinado sistema de manejo de tierras está funcionando a un nivel aceptable de desempeño (Doran y Parking, 1994). El LCS y el LCI para evaluar calidad de suelo y tomar decisiones con respecto al manejo de tierras deberían basarse en niveles de tolerancia conocidos o deseados, o derivarse de la varianza media obtenida a partir de datos de desempeño pasado (Larson y Pierce, 1994).

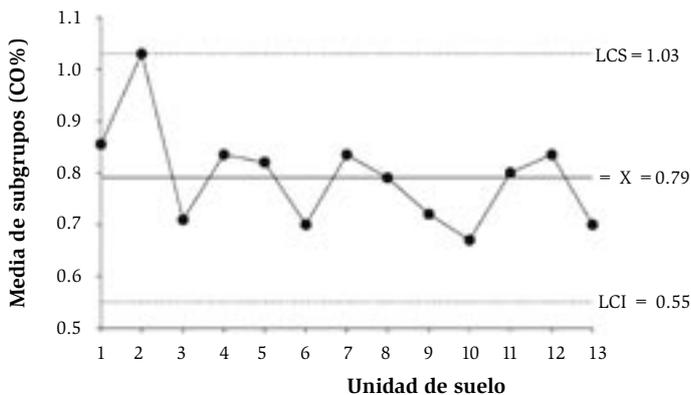
ESTUDIO DE CASO (IRÁN)

Se aplicó la técnica SQC a un conjunto de datos proveniente de la planicie de Marvdasht, una cuenca intramontana semiárida a 1,500 m de altitud, ubicada en la provincia de Fars, en el corazón del antiguo imperio persa, en el suroeste de Irán. Los suelos son esencialmente Aridisoles calcáreos y salinos, localmente asociados con suelos poco desarrollados de tipo Entisol. Las precipitaciones anuales son de 150-200 mm. La temperatura media anual es de 17°C, con veranos calientes e inviernos fríos (Moameni, 1999). Esta área ha sido cultivada por siglos con trigo de riego, lo que ha causado cambios sustanciales en la calidad del suelo. En tiempos recientes se ha intensificado considerablemente el sistema de producción agrícola para satisfacer la creciente demanda de alimentos, con aplicación masiva de agroquímicos y mecanización pesada. Esto ha dado lugar a una severa degradación

de tierras, especialmente a una pérdida de la fertilidad y a compactación del suelo, y ha llevado a plantearse la cuestión de la sustentabilidad del sistema moderno de manejo y uso de las tierras. Para evaluar el grado de severidad de la degradación de tierras se aplicó un esquema sistemático de muestreo de suelos en una cuadrícula de 500 x 500 m, arrojando un total de 2,100 puntos de observación. En cada intersección de la cuadrícula se tomaron muestras compuestas de la capa arable (0-25 cm) para determinación del carbono orgánico, junto con otros aspectos influenciadas por el manejo de las tierras tales como nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible y densidad aparente. La cuadrícula de muestreo se sobrepuso en un mapa de suelos semi-detallado, escala 1:50,000, y para cada unidad de suelo se seleccionó al azar un conjunto de 20 puntos para formar subgrupos estadísticamente representativos de la población de datos con distribución normal. Lo anterior se hizo con el fin de realizar un análisis estadístico y control de calidad (Moameni y Zinck, 1997).

La figura 2 muestra la gráfica del carbono orgánico del suelo. Las medias de los 13 subgrupos considerados, que representan 13 unidades de suelo, caen entre los límites de control superior e inferior. Desde el punto de vista estadístico, la propiedad carbono orgánico se encuentra bajo control y su variabilidad se estabilizó al nivel de 3-sigma. La dispersión de las medias de subgrupos alrededor del valor promedio de todos los subgrupos (0.79%) resulta relativamente estrecha, indicando qué prácticas de manejo similares podrían aplicarse en todas las unidades del mapa de suelos, para mantener el nivel actual de carbono orgánico. Pero el control estadístico no revela si el nivel actual de carbono orgánico es suficiente para garantizar un desempeño rentable y sostenido de los cultivos producidos en el área, porque los límites de control estadístico no corresponden a valores meta. El promedio 0.79% se encuentra por debajo del valor de aceptación para una propiedad edáfica tan dinámica

FIGURA 2. GRÁFICO DE CONTROL DE CALIDAD BASADO EN LÍMITES ESTADÍSTICOS PARA EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO (CO%). SUBGRUPOS DE 20 OBSERVACIONES ESCOGIDAS AL AZAR EN CADA UNIDAD DE SUELO

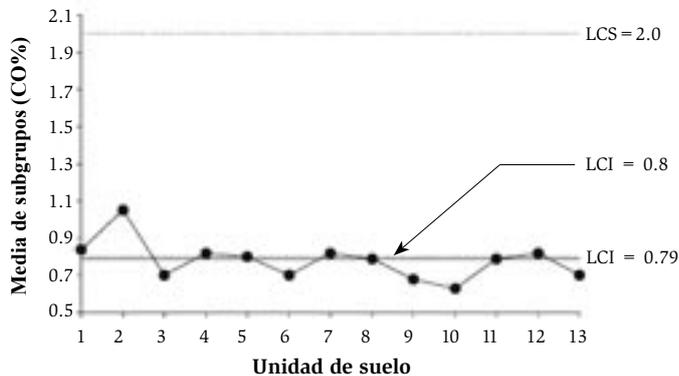


Fuente: adaptado de Moameni y Zinck, 1997.

y tan subordinada al manejo como lo es el carbono orgánico. Inclusive el LCS de 1.03% no se acerca al nivel de adecuación requerido para obtener un buen rendimiento de trigo, el principal cultivo alimenticio en el área.

Con el fin de transformar el gráfico de control estadístico en un gráfico de control de metas, se

FIGURA 3. GRÁFICO DE CONTROL DE CALIDAD BASADO EN LÍMITES DE SUFICIENCIA PARA EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO (CO%). SUBGRUPOS DE 20 OBSERVACIONES ESCOGIDAS AL AZAR EN CADA UNIDAD DE SUELO



Fuente: adaptado de Moameni y Zinck, 1997.

seleccionaron normas de suficiencia de fertilidad para el cultivo de trigo de acuerdo con diversas fuentes bibliográficas (Sys *et al.*, 1991). Para construir el gráfico del carbono orgánico para producción de trigo se adoptaron los valores de 0.8% y 2% como límites de aceptación superior e inferior, respectivamente (figura 3). Los subgrupos 3, 6, 9, 10 y 13 caen por debajo del LCI, mientras que otros subgrupos coinciden con el LCI o se encuentran cerca del mismo. Todas estas unidades de suelo están fuera de control desde el punto de vista de la sustentabilidad, lo cual refleja un manejo inadecuado y un uso

agotador del suelo. El balance de carbono orgánico está fuera de control. Solamente en la unidad de suelo 2 el contenido de carbono orgánico resulta apto para la producción sostenida de trigo. En todas las demás unidades se requiere aplicación masiva de composta y/o estiércol.

CONCLUSIÓN

La técnica SQC es útil para evaluar el control que ejercen las propiedades edáficas específicas sobre la sustentabilidad de un determinado tipo de uso y sistema de manejo de las tierras en cada unidad de suelo. Los gráficos de control pueden aplicarse solamente a propiedades individuales de suelo, ya que estas últimas tienen diferentes umbrales de LCS y LCI. Los límites estadísticos son adecuados para monitorear el comportamiento de una población de datos a través del tiempo, pero tienen que ser sustituidos por patrones de aceptación/suficiencia en evaluación de sustentabilidad. Una

limitación importante del SQC es que se requieren amplios conjuntos de datos para permitir la selección al azar de subgrupos a partir de la población total y controlar la distribución normal de los datos.

EL SISTEMA DE CULTIVO: EL ANALISIS DE LA BRECHA DE RENDIMIENTOS

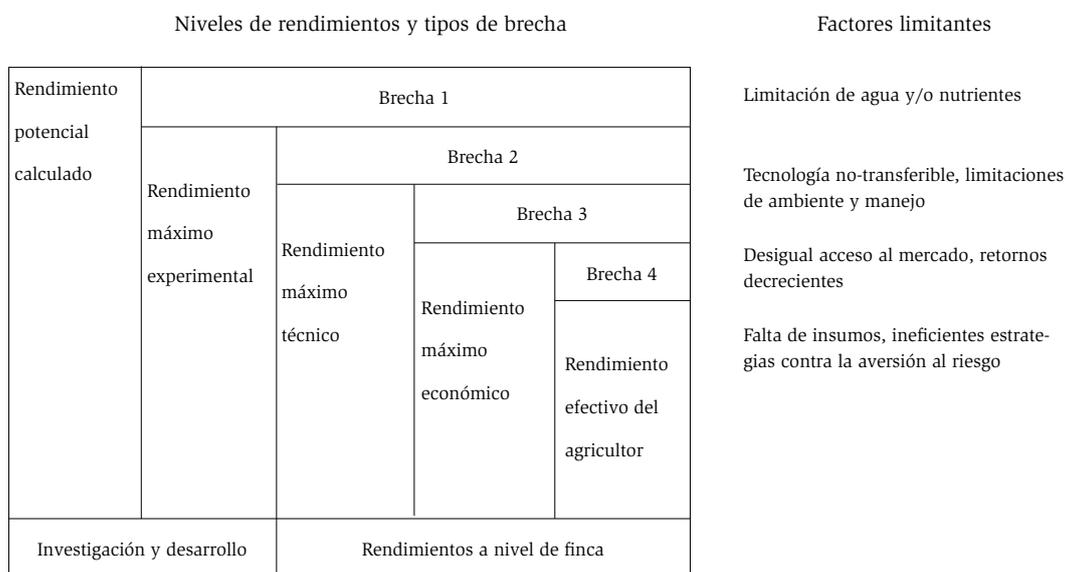
EL ENFOQUE

Una parcela cultivada en el seno de una unidad de producción agrícola incluye usualmente varias unidades de suelo. Las diferencias de propiedades entre unidades de suelo se encuentran a menudo enmascaradas por la aplicación de prácticas de manejo indiferenciadas a un cultivo específico sobre toda la extensión de la parcela. Por lo tanto, el sistema de cultivo representa un nivel escalar apropiado para evaluar la sustentabilidad dentro de la jerarquía de sistemas que constituye la actividad agrícola. El rendimiento es un buen indicador de la productividad de un cultivo,

porque permite evaluar a la vez la sustentabilidad biológica y la sustentabilidad económica de un sistema de cultivo. Rara vez se obtiene el rendimiento máximo de una parcela debido a una serie de limitaciones, tales como: invasión de malezas, inadecuada fertilización, presencia de plagas y enfermedades y mal manejo en general. De esto resulta frecuentemente una brecha entre el rendimiento efectivo y el rendimiento esperado. El análisis de la brecha de rendimientos (ABR) permite medir la distancia entre el rendimiento real de campo y el rendimiento potencial, identificar las causas de la brecha y formular estrategias para elevar los rendimientos obtenidos por los agricultores a niveles más altos de productividad sustentable de las tierras. La brecha de rendimientos ha sido propuesta como un adecuado indicador del manejo sustentable de tierras (Bindraban *et al.*, 2000; Dumanski y Pieri, 2000).

Se han desarrollado modelos conceptuales de los factores que causan y explican las brechas de rendimientos (Gomez, 1979; De Datta, 1981; Tang *et al.*, 1992; Ye y Van Ranst, 2002). La figura 4 muestra un

FIGURA 4. MODELO CONCEPTUAL DE LA BRECHA DE RENDIMIENTOS



Fuente: adaptado de Fresco *et al.*, 1994.

modelo conceptual de esta naturaleza (Fresco *et al.*, 1994), el cual describe las brechas entre rendimiento potencial calculado, rendimiento máximo a nivel de estación experimental y rendimiento efectivo del agricultor. Para explicar la existencia de brechas se invocan factores a la vez biofísicos y socio-económicos.

Para analizar brechas de rendimientos hay que comenzar por establecer niveles, incluyendo rendimientos calculados, experimentales y reales. Existen diversos modelos para predecir o simular rendimientos de cultivos, como modelos estadísticos, determinísticos, estocásticos y empíricos. Entre estos, la modelización determinística de simulación representa un enfoque interesante, que permite predecir niveles de rendimientos por orden consecutivamente decreciente al incrementarse sucesivamente las limitaciones que afectan la producción de los cultivos (por ejemplo, deficiencias de agua, de nutrientes, de prácticas agrícolas). Un ejemplo de modelo determinístico es el enfoque de World Food Studies (WOFOST) (Driessen y Van Diepen, 1987), el cual ha sido utilizado para simular el crecimiento de cultivos anuales bajo diferentes niveles de producción. Los rendimientos obtenidos por agricultores tradicionales y campesinos, que no acostumbran llevar registros de producción, se determinan generalmente con base en mutuo acuerdo entre productor y técnico, por cosecha y pesada de la cosecha durante varios años consecutivos en un área de dimensión conocida en la parcela (técnica del corte de cultivo).

ESTUDIO DE CASO (KENIA)

Se aplicó el análisis de la brecha de rendimientos a un conjunto de datos de Kenia, recolectado en la finca experimental del Embu Regional Research Center y en parcelas campesinas de los alrededores, ubicadas a aproximadamente 1,500 m de altitud en el piedemonte oriental del Monte Kenia (Wokabi, 1994). La precipitación media anual del área es de 1,250 mm, repartidos en dos períodos de lluvia por



año (610 mm durante la estación I de marzo a julio y 400 mm durante la estación II de octubre a enero). El rango de temperatura media anual es de 18 a 21° C. Los suelos son predominantemente Humic Nitisols (Ustic Palehumults) arcillosos, desarrollados a partir de fonolitas meteorizadas, con moderado nivel de fertilidad natural. Las tierras se encuentran distribuidas en pequeñas parcelas en manos de campesinos que practican una agricultura tradicional, con producción destinada mayormente al autoconsumo. Los principales cultivos alimenticios son el maíz, el frijol y los plátanos. Se produce también café para el mercado local. Cada familia cría unas pocas vacas lecheras en establo. Se seleccionó el maíz para conducir el análisis de la brecha de rendimientos, ya que éste es el cultivo alimenticio más importante en el área.

Niveles de rendimientos

Se obtuvieron datos sobre rendimientos experimentales en maíz a partir de una serie temporal de ensayos

de fertilización conducidos durante el período de 1986-1993 (Wokabi, 1994). Se implementó el modelo WOFOST para calcular los rendimientos potenciales máximos y los rendimientos limitados por deficiencia de agua durante el mismo período. La producción de maíz limitada por deficiencia de agua corresponde básicamente a las condiciones de la agricultura de secano y se encuentra, por lo tanto, teóricamente al alcance de los agricultores, si se aplican apropiadas prácticas de manejo. Los datos sobre rendimientos reales a nivel de finca se generaron utilizando la técnica del corte de cultivo, cuando el maíz estaba listo para cosechar en seco, en lotes de 10 x 10 m distribuidos al azar a través de las parcelas de los campesinos durante el período de 1992-1993. Los valores medios de los rendimientos potencial, limitado por agua, experimental y campesino fueron, respectivamente, 12.9, 5.8, 4.4 y 4.1 t ha⁻¹ para las dos estaciones de lluvia combinadas del período 1986-1993.

Los rendimientos potenciales calculados para la estación I durante el período 1986-1993 son bastante uniformes, con media de 13.3 t ha⁻¹ y un coeficiente de variación de 1%. Los rendimientos calculados con base en deficiencia de agua para el mismo período revelan un coeficiente de variación algo más alto, de 19%, con una media de 5.8 t ha⁻¹. En la estación II los rendimientos potenciales calculados tienen una media de 12.5 t ha⁻¹ y un coeficiente de variación de 1%. Los rendimientos calculados con limitación de agua tienen un coeficiente de variación de 49% y una media de 5.8 t ha⁻¹. El amplio coeficiente de variación de la estación II puede atribuirse a variaciones interanuales de humedad más altas. Los rendimientos experimentales para la estación I durante un período de seis años, con un 50% de probabilidad, se estiman en 4.6 y 3.7 t ha⁻¹ con y sin aplicación de fertilizantes, respectivamente. Para la estación II, los resultados son 3.4 y 2.1 t ha⁻¹. Los rendimientos obtenidos por los campesinos varían entre 2.5 y 3.8 t ha⁻¹, con una

media de 3.4 t ha⁻¹ para la estación I. Para la estación II el rango de variación es 3.8-5.6 t ha⁻¹, con una media de 4.7 t ha⁻¹. En general, las variaciones interanuales no son excesivas, de manera que los valores promedio pueden usarse para el análisis de la brecha de rendimientos.

Brechas de rendimientos

Para el lapso 1986-1993, el cual puede considerarse un período de investigación de mediana duración, la magnitud de las brechas de rendimientos disminuye en el siguiente orden: brecha 4 > brecha 1 > brecha 5 > brecha 2 > brecha 3, para ambas estaciones de lluvia I y II (cuadro 2 y figura 5).

La brecha de rendimientos 1 refiere a la diferencia entre el rendimiento calculado potencial y el rendimiento calculado con deficiencia de agua (116% y 129%). El factor que contribuye más a la brecha de rendimientos es la limitación de humedad. En la determinación del rendimiento potencial se supone que la disponibilidad de humedad es óptima. Si las lluvias son suficientemente abundantes y bien distribuidas, la brecha de rendimientos puede ser pequeña y hasta insignificante en estaciones excepcionalmente favorables. Esta brecha puede estrecharse mediante prácticas agrícolas que faciliten el uso eficiente de la humedad disponible en un ambiente determinado. Tales prácticas incluyen, entre otras, la preparación de la tierra, la siembra y el control de malezas en momentos oportunos, combinados con la aplicación de composta o estiércol para mejorar la estructura del suelo, intensificar la actividad biológica y, por consecuencia, aumentar la capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo.

La brecha de rendimientos 2 se refiere a la diferencia entre rendimiento calculado con deficiencia de agua y rendimiento experimental (23% y 38%). En la determinación del rendimiento limitado por agua se supone que el único factor que restringe el crecimiento

CUADRO 2. NATURALEZA Y MAGNITUD DE LAS BRECHAS DE RENDIMIENTOS DE MAÍZ EN EMBU (1986-1993)

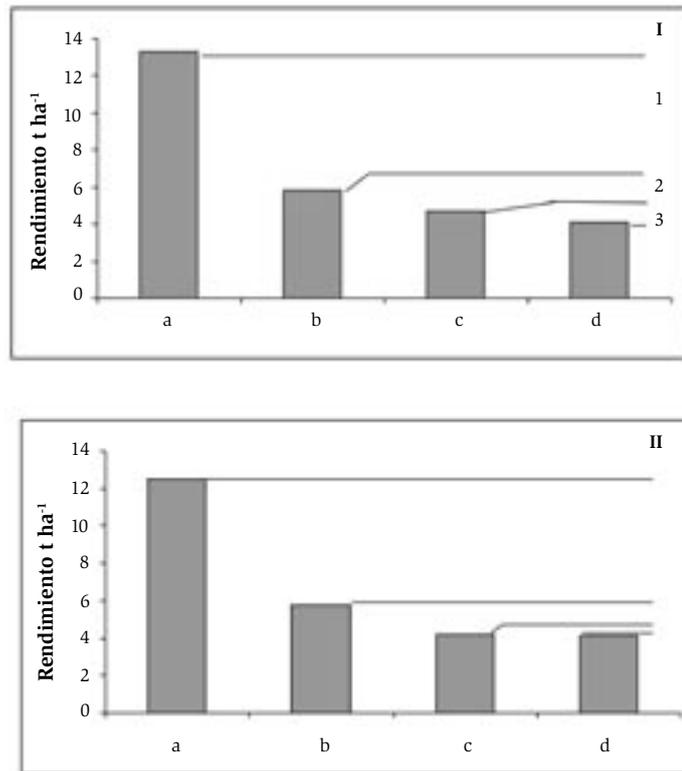
TIPO DE RENDIMIENTO	RENDIMIENTO EN GRANOS (t ha-1)	% DEL RENDIMIENTO POTENCIAL	BRECHA DE RENDIMIENTOS		
			t ha-1	%	No.
<i>Estación de lluvia I</i>					
Rendimiento potencial	13.3	100	7.5	129	1
Rendimiento limitado por agua	5.8	44	1.1	23	2
Rendimiento experimental	4.7	35	0.6	15	3
Rendimiento del agricultor	4.1	31			
Rendimiento potencial	13.3	10			
Rendimiento experimental	4.7	33			
Rendimiento limitado por agua	5.8	38	8.6	183	4
Rendimiento del agricultor	4.1	25			
<i>Estación de lluvia II</i>					
Rendimiento potencial	12.5	100			
Rendimiento limitado por agua	5.8	46	6.7	41	5
Rendimiento experimental	4.2	34	6.7	116	1
Rendimiento del agricultor	4.1	33	1.6	38	2
Rendimiento potencial	12.5	100	0.1	2	3
Rendimiento experimental	4.2	34	8.3	198	4
Rendimiento limitado por agua	5.8	46			
Rendimiento del agricultor	4.1	33	1.7	41	5

Fuente: adaptado de Wokabi, 1994.

del cultivo es la disponibilidad de humedad aportada por las lluvias, tal como ocurre en la agricultura de secano. En condiciones experimentales de secano, el crecimiento del cultivo puede verse afectado no solamente por la escasez de lluvia, sino también por la insuficiencia de insumos (por ejemplo, fertilizantes y estiércol), así como por brotes de malezas, plagas y enfermedades. Esta brecha es relativamente pequeña, lo que indica que las posibilidades de incrementar los rendimientos experimentales de maíz en Embu son limitadas, aún cuando la aplicación de insumos externos fuese óptima.

La brecha de rendimientos 3 describe la diferencia entre rendimiento experimental y rendimiento de los agricultores (2% y 15%). Un desempeño inadecuado de los cultivos a nivel de finca puede resultar de varios factores, tales como: la falta de fertilización, las pérdidas causadas por plagas y enfermedades, los daños a los cultivos por pájaros y animales silvestres, entre otros. Es posible disminuir esta brecha de rendimientos mediante la preparación oportuna de tierras, la aplicación de fertilizantes y estiércol en cantidades adecuadas, el control eficiente de plagas, enfermedades y malezas, y siembra temprana de variedades de

FIGURA 5: BRECHAS DE RENDIMIENTOS EN MAÍZ PARA LAS ESTACIONES DE LLUVIA I Y II EN EMBU



a = rendimiento potencial; b = rendimiento limitado por agua; c = rendimiento experimental; d = rendimiento del agricultor; 1, 2 y 3 = brechas de rendimientos.

Fuente: adaptado de Wokabi, 1994.

maíz adaptadas. Estas actividades de remediación deben ser apoyadas por asistencia técnica, facilidades de crédito y políticas de precios, que estimulen a los agricultores a incrementar los rendimientos de maíz bajo condiciones de sustentabilidad.

La brecha de rendimientos 4 que mide la diferencia entre el rendimiento potencial calculado y el rendimiento experimental (183 % y 198 %), es considerablemente alta y refleja el efecto decisivo de la insuficiencia de lluvia en la disminución de los rendimientos.

La brecha de rendimientos 5 corresponde a la diferencia entre rendimiento calculado con deficiencia de agua y rendimiento de los agricultores (41 % y 41 %), y es posiblemente, entre todas, la más importante a

considerar y es indudablemente más significativa, desde el punto de vista de la sustentabilidad, que la brecha de rendimientos 3 que mide lo rezagado de los rendimientos obtenidos por los agricultores en relación con los rendimientos experimentales. El rendimiento simulado con limitación de agua representa una meta realista para la agricultura de secano, alcanzable siempre que se utilicen los insumos necesarios y se apliquen las prácticas de manejo adecuadas. Por lo tanto, la brecha de rendimientos 5 señala la magnitud del esfuerzo necesario para elevar los rendimientos campesinos aproximadamente 40 % por encima del nivel actual, lo que haría la actividad agrícola sustentable.

CONCLUSIÓN

La producción de alimentos puede incrementarse mediante la expansión del área cultivada y/o mediante el mejoramiento de los rendimientos en las superficies ya cultivadas. En muchos países, la posibilidad de aumentar la extensión de tierras arables es limitada debido a que la disponibilidad de tierras no usadas está disminuyendo rápidamente o las tierras todavía disponibles son de calidad marginal o simplemente no son aptas para la agricultura. Si bien existen posibilidades de cultivar tierras de bajo potencial productivo, éstas son generalmente frágiles y susceptibles de degradación cuando se manejan de manera inadecuada. Esto significa que los agricultores deberían esforzarse para obtener rendimientos máximos posibles de cada pedazo de tierras cultivadas, lo que implica el uso de altas cantidades de fertilizantes, plaguicidas y herbicidas. Una aplicación desbalanceada de estos insumos incrementa el riesgo de destruir los ecosistemas naturales y, en consecuencia, de disminuir la sustentabilidad de la productividad de las tierras. Por lo tanto, la meta a alcanzar debería ser la de rendimiento máximo sustentable, no la del máximo rendimiento posible (Schaller, 1993). El análisis de la brecha de rendimientos no indica por sí mismo qué nivel de rendimiento es sustentable, pero apunta a niveles de productividad de los cultivos más altos que los rendimientos de los agricultores, los cuales son alcanzables con insumos adicionales y prácticas de manejo mejoradas. Esto permite identificar oportunidades de rendimiento residual y fijar metas. Si el agricultor logra llevar el rendimiento a un nivel más alto, su actividad agrícola va a ser más lucrativa y, en consecuencia, económicamente más sustentable.



EL SISTEMA DE PRODUCCION: EL ANALISIS DEL BALANCE ENERGETICO

EL ENFOQUE

Uno o más sistemas de cultivo, a veces combinados con otras actividades tales como la cría de ganado o la artesanía, pueden ser considerados como un sistema agrícola a nivel de la unidad de producción (o finca). Un sistema agrícola sustentable es política y socialmente aceptable, económicamente viable, agrotécnicamente adaptable, institucionalmente manejable, y ambientalmente saludable, de acuerdo con el modelo de los seis pilares (Smyth y Dumanski, 1993; Farshad y Zinck, 2001). Satisfacer todos estos requerimientos de sustentabilidad y los correspondientes criterios analíticos es una tarea compleja, tanto que el modelo probablemente nunca va a poder ser aplicado en todos sus componentes a un determinado sistema agrícola o a una región. Métodos parciales de evaluación de la sustentabilidad, que enfocan una faceta en particular, resultan más prácticos de implementar, aunque los mismos puedan generar incertidumbre en cuanto a la sustentabilidad de conjunto de los agro-ecosistemas (Zinck y Farshad, 1995).

El enfoque del balance energético permite aproximarse a la complejidad de un sistema agrícola al expresar insumos y productos en la misma unidad de medición, lo que los hace comparables con fines

de evaluación de la sustentabilidad agrícola. Los agroecosistemas dependen de formas de energía a la vez ecológicas y agrícolas. La energía ecológica incluye la radiación solar para fotosíntesis y condiciones atmosféricas apropiadas, mientras que la energía agrícola incluye componentes biológicos (por ejemplo, mano de obra, estiércol) e industriales. Cuando un sistema natural, capaz de producir cierta cantidad de biomasa portadora de energía, se convierte en agroecosistema, se excede su límite natural de capacidad productiva, por el hecho de habersele agregado insumos energéticos adicionales. Cuanto mayor es la adición de energía externa, tanto más puede sobrepasarse la capacidad natural del sistema, pero en detrimento de su sustentabilidad. Gracias a esta relación, la razón de balance energético de un agroecosistema es un indicador relativamente comprensivo de su sustentabilidad. Ya que los datos sobre consumo de energía resultan a menudo difíciles de obtener o carecen de precisión, el análisis del balance energético (ABE) requiere comprobar esos datos mediante entrevistas múltiples y mediciones directas *in-situ*, como por ejemplo, determinar el rendimiento del cultivo utilizando la técnica del corte directo en la parcela del agricultor.

ESTUDIO DE CASO (IRÁN)

El estudio de caso se desarrolló en el área de Hamadan-Komidjan, un paisaje de planalto enclavado en la cadena montañosa de Zagros a 1,750 m de altitud, en la provincia de Hamadan situada en el oeste de Irán (Farshad y Zinck, 2001). El clima es de tipo estepario semiárido, con veranos suaves e inviernos muy fríos. Las precipitaciones anuales, incluyendo nieve, son de 320-350 mm y la temperatura media anual es de 11° C. Los suelos más comúnmente utilizados para la agricultura son Xerochrepts delgados a moderadamente espesos. El trigo es el cultivo principal en esta área, donde coexisten la agricultura tradicional y la

agricultura moderna, a pesar de que aquella tiende a desaparecer.

La agricultura moderna

Los sistemas agrícolas modernos utilizan agua de pozos profundos y de represas artificiales, semillas mejoradas, maquinaria pesada (por lo menos tractores), fertilizantes químicos, herbicidas y plaguicidas. La introducción de nuevas fuentes de energía, nueva tecnología y maquinaria pesada ha cambiado la relación entre insumos y productos, en comparación con el sistema agrícola tradicional. La producción de cultivos, la cría de animales y las industrias rurales dejaron de ser actividades interdependientes a nivel de finca, como ocurre todavía en la agricultura tradicional.

La agricultura moderna en Irán se basa en una serie de operaciones altamente mecanizadas, que consumen grandes cantidades de energía en términos de mano de obra y uso de maquinaria. La energía consumida para la producción mecanizada de trigo ($41.8 + 10.5 = 52.3 \text{ Gj ha}^{-1}$) es aproximadamente la mitad de la energía producida (99.5 Gj ha^{-1}), lo que arroja una razón de entradas/salidas del orden de 1 a 2 (cuadros 3, 4 y 5).

La agricultura tradicional

La agricultura tradicional utiliza el arado de madera con tracción animal, semillas locales, agua suministrada por *ghanat* (túnel subterráneo para captación y conducción de agua), por *cheshmeh* (manantial) y/o por cosecha del escurrimiento superficial, estiércol y otros insumos internos a la finca, sin maquinaria agrícola pesada y sin agroquímicos. La datación radiométrica (^{14}C) de un suelo enterrado por debajo de escombros apilados alrededor de la boca de un pozo de acceso a un *ghanat* reveló que el túnel que intercepta los acuíferos del piedemonte para conducir el agua a un oasis irrigado, en una planicie adyacente,

CUADRO 3. ENERGÍA DIRECTA CONSUMIDA POR EL SISTEMA MECANIZADO DE PRODUCCIÓN DE TRIGO

INSUMO	TIEMPO (hr ha-1)	NÚMERO DE TRATAMIENTOS	COMBUSTIBLE (L ha-1)	VALOR ENERGÉTICO	ENERGÍA TOTAL REQUERIDA (Gj ha-1)
Pase de arado	5	2	40	42.7 Mj L-1	3,416
Nivelación	1	1	10	42.7 Mj L-1	0,427
Siembra	1	1	15	42.7 Mj L-1	0,640
Riego	7	5-6	150	42.7 Mj L-1	35,227
Cosecha	2	-	40	42.7 Mj L-1	1,708
Transporte	-	-	5	42.7 Mj L-1	0,213
Mano de obra	110	-	-	1.9 Mj hr-1	0,210
Total	126	-	260	-	41,841

Fuente: adaptado de Farshad y Zinck, 2001.

tenía por lo menos 700 años de antigüedad (Farshad y Zinck, 1998). Esto da una idea de la longevidad de los sistemas tradicionales de uso de las tierras y aguas en esta área, antes de su desintegración en tiempos recientes.

Una unidad de producción tradicional es un sistema complejo de actividades interrelacionadas y ejecutadas por una familia. El sistema incluye tres componentes principales: la producción de cultivos, la cría de ganado y la artesanía. La integración funcional y la distribución temporal de estas actividades exigen que todos los miembros del núcleo familiar participen en las labores de tiempo completo durante todo el año. Los animales domésticos más comunes son bueyes, vacas, ovejas, cabras, gallinas y palomas. Se producen huevos, carne, productos lácteos, harina de trigo y cebada, legumbres, frutos, cuero y lana. Esta amplia variedad de productos generados en la finca permite mitigar los riesgos climáticos (por ejemplo, períodos de sequía) y económicos (por ejemplo, fluctuaciones de los precios de mercado).

La agricultura tradicional consume poca energía (6.1 Gj ha⁻¹) para producir una cantidad relativamente grande (46.8 Gj ha⁻¹). Esto da una razón de entradas/salidas del orden de 1 a 8, que es mucho mejor que la razón de 1 a 2 alcanzada por el sistema mecanizado (cuadros 6 y 7). Si se asumiera que la razón de 1:8 del sistema tradicional representa el umbral de sustentabilidad en esta región, entonces el sistema mecanizado se encontraría al borde de la insustentabilidad. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el sistema moderno produce dos veces más trigo por unidad de superficie que el tradicional, lo que lo hace más apto para satisfacer, por lo menos a corto plazo, la creciente demanda del mercado. Desafortunadamente, la maquinaria pesada utilizada en la agricultura moderna causa severa compactación de suelo, la cual lleva, en última instancia, a una disminución de los rendimientos. Mediante modelos de simulación, se ha estimado que la reducción del rendimiento del trigo podría ser del orden de dos toneladas por hectárea como consecuencia del efecto de la mecanización sobre el deterioro de la porosidad del suelo (Farshad *et al.*, 2000).

CUADRO 4. ENERGÍA INDIRECTA CONSUMIDA POR EL SISTEMA MECANIZADO DE PRODUCCIÓN DE TRIGO

INSUMO	CANTIDAD (KG HA-1)	VALOR ENERGÉTICO (MJ KG-1)	ENERGÍA TOTAL REQUERIDA (GJ HA-1)
Nitrógeno (N)	34	75	2,550
Fósforo (P)	48	13	0,624
Insecticida	1	180	0,180
Semilla	250	18	4,500
Maquinaria	30	87	2,610
Total	-	-	10,464

Fuente: adaptado de Farshad y Zinck, 2001.

CUADRO 5. ENERGÍA GENERADA POR EL SISTEMA MECANIZADO DE PRODUCCIÓN DE TRIGO

PRODUCCIÓN	RENDIMIENTO (KG HA-1)	VALOR ENERGÉTICO (MJ KG-1)	ENERGÍA GENERADA (GJ HA-1)
Grano	3.750	14	52,5
Paja	4.700	10	47,0
Total	-	-	99,5

Fuente: adaptado de Farshad y Zinck, 2001.

CONCLUSIÓN

El análisis del balance energético tiene la ventaja de expresar todos los parámetros de entrada y salida del sistema agrícola en una sola y misma unidad de medición. Esto permite elaborar razones de entradas/salidas y comparar diferentes sistemas agrícolas en términos cuantitativos para evaluar su sustentabili-

CUADRO 6. ENERGÍA CONSUMIDA POR EL SISTEMA TRADICIONAL DE PRODUCCIÓN DE TRIGO

INSUMO	VALOR ENERGÉTICO	CANTIDAD (HA-1)	ENERGÍA TOTAL REQUERIDA (GJ HA-1)
Mano de obra	2.1 Mj hr-1	330 horas	0,69
Tracción animal	2.9 Mj hr-1	190 horas	0,56
Maquinaria	0.4 Mj L-1	60 L gasoil	0,024
Fertilizante	60 Mj kg-1	50 kg	2,99
Estiércol	1 kj kg-1	1.600 kg	0,002
Semilla	14 Mj kg-1	130 kg	1,795
Total	-	-	6,061

Fuente: adaptado de Farshad y Zinck, 2001.

CUADRO 7. ENERGÍA GENERADA POR EL SISTEMA TRADICIONAL DE PRODUCCIÓN DE TRIGO

PRODUCCIÓN	VALOR ENERGÉTICO (MJ KG-1)	CANTIDAD (KG HA-1)	ENERGÍA GENERADA (GJ HA-1)
Grano	14	2.000	28,438
Paja	9	2.000	18,400
Total	-	-	46,838

Fuente: adaptado de Farshad y Zinck, 2001.

dad. El concepto de flujo de energía representa una buena base para examinar un sistema agrícola desde el punto de vista económico y ambiental, sin embargo, toma en cuenta un número limitado de los criterios contemplados en el modelo de los seis pilares. Un enfoque más holístico para evaluar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas necesitaría implementar conjuntamente técnicas complementarias para asegurar

el efecto de transversalidad a través del modelo de los pilares.

EL SISTEMA DEL SECTOR AGRÍCOLA: EL ÍNDICE

AGREGADO DE SUSTENTABILIDAD

EL ENFOQUE

El conjunto de los sistemas agrícolas que operan en una región o sobre un territorio nacional conforma un sector de actividad o de producción llamado el sector agrícola. Para evaluar la sustentabilidad de un área tan compleja como ésta es necesario utilizar una amplia gama de indicadores para asegurar que todos los aspectos pertinentes estén bien cubiertos. Por coherencia, los indicadores pueden agruparse en familias de criterios que describen los componentes biofísicos, agronómicos, sociales, económicos y políticos del sector agrícola. A este nivel superior de la jerarquía de los sistemas agrícolas, cuatro dominios de criterios adquieren particular relevancia: la agrobiodiversidad, la eficiencia del agrosistema, el uso del recurso tierra y la seguridad alimentaria. Los siguientes indicadores resultan apropiados para medir estos criterios: (1) para la agrobiodiversidad: el índice de dominancia de cultivos, el factor de la agrobiodiversidad regional de cultivos, la variabilidad genética de los cultivos, la variabilidad de la superficie ocupada por los cultivos principales; (2) para la eficiencia del agrosistema: el rendimiento, la brecha de rendimientos, la razón ingreso/costo, el índice de paridad; (3) para el uso del recurso tierra: una serie de razones areales tales como la disponibilidad de tierras/demanda de tierras, la demanda de tierras/tierras cultivadas, tierras cultivadas/tierras deforestadas, tierras degradadas/tierras cultivadas, tierras cultivadas/habitante, tierras regadas/tierras regables; y (4) para la seguridad alimentaria: el índice de producción *per capita*, población agrícola/población total, exportación/importación de bienes agrícolas, y producción de alimentos/suministro de alimentos.

Los indicadores individuales y los índices parciales, calculados con base en unos pocos indicadores, son apropiados para describir componentes específicos o aspectos particulares del sector agrícola, pero resultan limitados para evaluar el sector en conjunto. Hay, por lo tanto, una necesidad de integrar los índices parciales en expresiones más comprensivas de la sustentabilidad. En este contexto, la sustentabilidad de conjunto del sector agrícola a nivel nacional puede ser evaluada mediante un índice agregado, que se obtiene promediando los valores normalizados de los indicadores seleccionados para el efecto del cálculo. Un índice de esta naturaleza sería capaz de aproximar con una sola figura cuantitativa el nivel de sustentabilidad del sector agrícola en un momento determinado y monitorear su evolución en el tiempo, no obstante toda la reserva involucrada en tal simplificación. Este tipo de enfoque se aplicó en el estudio de caso de Venezuela (Berroterán y Zinck, 1997, 2000).

Con el propósito de cuantificar el nivel de sustentabilidad/insustentabilidad alcanzado por la agricultura venezolana durante las últimas dos o tres décadas, se seleccionaron indicadores provistos de series temporales de datos más largas que 20 años para establecer índices parciales. Un plazo de 20 años corresponde aproximadamente al término largo (> 25 años) considerado por Smyth y Dumanski (1993) para el manejo sustentable de las tierras, mientras que este mismo plazo es intermedio entre los términos establecidos por Lal *et al.* (1990) para la sustentabilidad de la productividad agrícola (5-10 años) y la sustentabilidad de la estabilidad ambiental (50-100 años). En el presente estudio de caso, sólo unos pocos indicadores satisficieron el requerimiento del plazo de registro (> 20 años). Los índices parciales que los describen se normalizaron entre 0 y 1 en relación con sus valores máximos. Promediando estos índices parciales se generó un índice agregado de sustentabilidad para años consecutivos, de acuerdo con el método aplicado a los sistemas agrícolas por Hansen y Jones (1996). La

media aritmética de los índices parciales normalizados representa una aproximación gruesa pero razonable de la sustentabilidad del sector agrícola a nivel de una región o de un país. Se representaron gráficamente los valores promedio del índice de sustentabilidad para intervalos de dos y cinco años, respectivamente, para mostrar la tendencia evolutiva de la sustentabilidad en el tiempo.

ESTUDIO DE CASO (VENEZUELA)

Aproximadamente 80% del territorio venezolano está por debajo de los 400 m de altitud, con temperaturas medias superiores a los 25° C y un régimen de lluvias estacional. Una amplia parte de la producción agrícola se realiza en las planicies de los Llanos, al norte del río Orinoco, especialmente la de cereales que incluyen maíz, arroz y sorgo. El 85% del PIB se deriva de la explotación del petróleo y de la minería. Debido a que la agricultura genera solamente 5% del PIB, una parte sustancial de los alimentos tiene que ser importada.

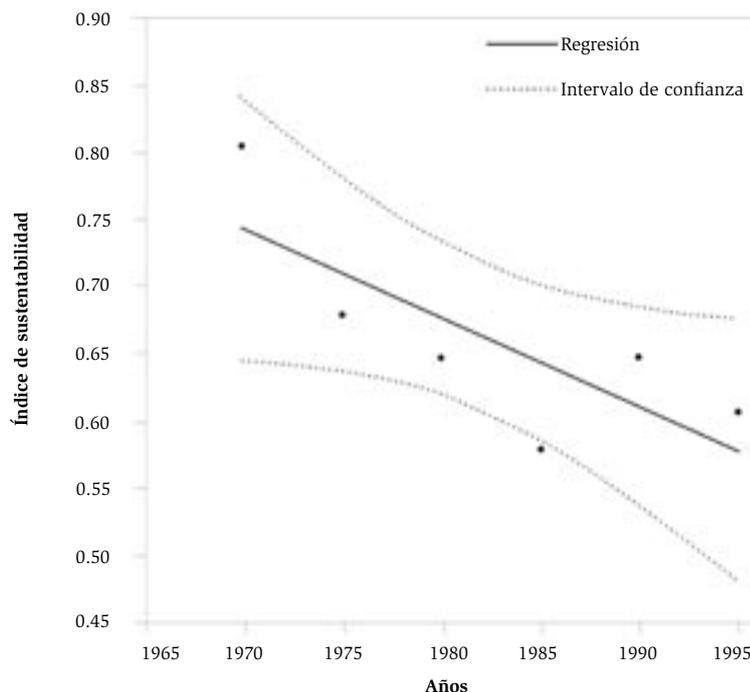
Varios indicadores individuales e índices señalan que la agricultura venezolana tiende hacia un estado de insustentabilidad: bajo índice de dominancia de cultivos (0.06), bajo factor de agrobiodiversidad regional de cultivos (0.24), insuficiente variación de los principales grupos de cultivos en el tiempo (0.23-0.30), bajo desempeño de los principales cultivos en relación con su productividad potencial (0.43) a pesar de que la producción por hectárea aumentó de 25-50%, baja razón de ingreso/costo (1.1-1.28), bajo índice de paridad (0.6-0.75), desfavorable razón de disponibilidad de tierras/demanda de tierras, deficiente uso de las tierras para el abastecimiento de la demanda de alimentos, baja superficie cultivada por habitante (0.08 ha), desfavorable razón de tierras cultivadas/tierras deforestadas, baja razón de tierras regadas/tierras regables (0.22), alta razón de tierras degradadas/tierras cultivadas (0.76), insuficiente

producción de alimentos en relación a la demanda (< 0.5) con tasas de crecimiento negativas, baja razón de exportación/importación (0.19), baja estabilidad del índice de producción de cereales *per capita*, baja proporción de población agrícola (0.09) con tasa de crecimiento negativa.

Seis de estos indicadores están provistos de registros de datos de largo plazo (> 20 años). Estos son los siguientes: la proporción de población agrícola, el índice relativo de producción de cereales *per capita*, el rendimiento de cereales, la producción total de alimentos, la superficie agrícola total y la superficie agrícola por habitante. Estos son los indicadores que se utilizaron para establecer un índice agregado de sustentabilidad (IAS) para intervalos de dos y cinco años. Los valores del índice correspondientes a intervalos de dos años resultaron altamente variables, lo que limitó su idoneidad para establecer un modelo de regresión al nivel de confianza de 95% y obligó a incrementar este nivel a 99% para poder incluir toda la información disponible en el rango de confianza. Esta alta variabilidad temporal del índice refleja la baja estabilidad del sector agrícola nacional y su limitada sustentabilidad. En cambio, los valores del índice calculados para intervalos de cinco años resultaron ser menos variables y pudieron ser ajustados a una regresión lineal con pendiente negativa ($IAS = 13.8583 - 6.657968 * \text{año}$) (figura 6). Lo anterior sugiere que un intervalo de cinco años es un tiempo mínimo para detectar tendencias de sustentabilidad a largo plazo (> 25 años) y mejorar las estimaciones para años futuros. Sin embargo, el análisis de la variabilidad interanual no deja de ser relevante para la evaluación de la estabilidad del sector agrícola a corto plazo.

El grado de desarrollo sustentable puede expresarse en términos de clases de probabilidad tales como fuertemente sustentable (> 0.70), débilmente sustentable (0.59-0.70) y no sustentable (< 0.59). De acuerdo con este criterio, la sustentabilidad agrícola en Venezuela ha sido sólida hasta mediados de la

FIGURA 6. INDICE AGREGADO DE SUSTENTABILIDAD DEL SECTOR AGRÍCOLA, VENEZUELA ($R^2 = 0.62$)



Fuente: adaptado de Berroterán y Zinck, 2000.

década de 1970-1980, pero se debilitó posteriormente. La tendencia de la sustentabilidad agrícola a deteriorarse con el tiempo no podrá mitigarse si no cambian las actuales condiciones de monocultivo de cereales, la creciente degradación de tierras, la baja eficiencia económica y los bajos niveles de producción, en comparación con la productividad genética de los cultivos y a pesar del uso intensivo de insumos.

CONCLUSIÓN

A pesar de sus evidentes limitaciones intrínsecas, un simple índice agregado puede dar una visión del nivel de sustentabilidad alcanzado por el sector agrícola a nivel regional o nacional, así como ayudar a detectar cambios en el tiempo. Los indicadores componentes tienen que escogerse de acuerdo con la disponibilidad de datos, la sensibilidad de estos

a cambios temporales y su capacidad de describir en forma cuantitativa el comportamiento del sector agrícola como un todo. El índice necesita ser afinado integrando indicadores adicionales y atribuyendo pesos diferenciales a los indicadores para reflejar mejor su relevancia y dinámica.

CONCLUSION GENERAL

La agricultura es una jerarquía de sistemas cuya sustentabilidad puede evaluarse mediante indicadores simples o una combinación de indicadores. En este artículo se aplicaron varios enfoques metodológicos comprensivos, combinando indicadores, a cuatro niveles escalares de la actividad agrícola, incluyendo el sistema de manejo de la tierra, el sistema de cultivo, el sistema de producción y el sistema del sector agrícola.



La pertinencia de los gráficos de control de calidad para evaluar la sustentabilidad del sistema de manejo de las tierras aumenta cuando se utilizan estándares de aceptación/suficiencia como umbrales, en vez de los habituales límites estadísticos de 3-sigma. En el caso de Marvdasht (Irán), las propiedades edáficas, tanto físicas como biológicas y químicas, se han deteriorado severamente debido al monocultivo de trigo durante siglos. Los gráficos de control de calidad revelaron que, si bien el contenido de carbono orgánico está bajo control estadístico, también se encuentra muy por encima de los límites de control de sustentabilidad debido a que, en la agricultura moderna, se ha descuidado o abandonado la aplicación periódica de abonos orgánicos.

El análisis de la brecha de rendimientos, tal como se aplicó en el caso de Embu (Kenia), muestra que los rendimientos de maíz obtenidos por los agricultores son sustancialmente inferiores a los rendimientos experimentales y calculados. Las brechas más amplias son entre los rendimientos potenciales calculados y los rendimientos experimentales (media = 191 %) y entre los rendimientos potenciales calculados y los rendimientos calculados con deficiencia de agua (media = 123%). Esto refleja el efecto negativo de factores tales como la insuficiencia de lluvia, la fertilización inapropiada, el inadecuado control de los ataques de plagas y enfermedades, y otras deficientes prácticas

de manejo. El rendimiento simulado con deficiencia de agua es una meta realista en agricultura de secano, alcanzable si se aplican adecuados insumos y prácticas de manejo. Por lo general, el análisis de la brecha de rendimientos no indica por sí mismo qué nivel de rendimiento es sustentable, pero sí señala oportunidades de rendimiento residual que pueden contribuir a hacer la actividad agrícola más provechosa y, por lo tanto, económicamente más sustentable.

El análisis del balance energético, desarrollado en el caso de Hamadan (Irán), tiene la ventaja de expresar todos los parámetros de insumos y productos en una sola y misma unidad de medición. Las razones de entradas/salidas permiten comparar el desempeño de los diferentes sistemas de producción agrícola vigentes en un área. El sistema tradicional, con una razón de 1:8 parece ser más sustentable que el sistema moderno, con una razón de 1:2. Pero la agricultura mecanizada produce rendimientos más altos y es, por lo tanto, más apta para satisfacer por lo menos a corto plazo, la creciente demanda del mercado de consumo. Esto subraya que el análisis del balance energético no cubre todas las facetas de la sustentabilidad agrícola y tiene que ser combinado con otras técnicas para asegurar un enfoque más holístico.

Finalmente, se utilizó un índice agregado para evaluar la sustentabilidad del sector agrícola a nivel nacional. Todavía no se dispone de algoritmos afinados que permitan colocar pesos diferenciales a indicadores individuales o índices parciales. Sin embargo, en el estudio de caso de Venezuela, un simple índice agregado, basado en la media de una serie de indicadores normalizados, muestra inequívocamente que la sustentabilidad del sistema del sector agrícola ha declinado constantemente durante las últimas décadas.

En este ensayo, los diversos enfoques empleados resultaron apropiados para escalas específicas. Sin embargo, se requiere todavía hacer un gran esfuerzo con fines de integrarlos en un marco metodológico coherente, que permita navegar a través de los niveles jerárquicos del macrosistema agrícola y tomar en cuenta los muchos requerimientos involucrados en un modelo holístico de la sustentabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Bell, S. y S. Morse. 1999. *Sustainability indicators. Measuring the immeasurable*. Earthscan Publications, Londres, Gran Bretaña, 175 pp.
- Berroterán, J.L. y J.A. Zinck. 1997. Indicators of agricultural sustainability at national level. A case study of Venezuela. *ITC-Journal* 1997-3/4, ITC, Enschede, Holanda, CD-ROM, 28 pp.
- . 2000. Indicadores de la sustentabilidad agrícola nacional cerealera. Caso de estudio: Venezuela. *Revista Facultad de Agronomía, LUZ*, Maracaibo, Venezuela, No 17: 130-154.
- Bindraban, P.S., J.J. Stoorvogel, D.M. Jansen, J. Vlaming y J.J.R. Groot. 2000. Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81: 103-112.
- Brown, B., M. Hanson, D. Liverman y R. Merideth. 1987. Global sustainability: toward definition. *Environmental Management* 11(6): 713-719.
- Conway, G.R., 1987. The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems* 24: 95-117.
- De Datta, S.K. 1981. *Principles and practices of rice production*. John Wiley, New York, EE.UU.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. *Defining and assessing soil quality*. SSSA Special Publication No. 35, Madison, Wisconsin, EE.UU., pp.3-21.
- Driessen, P.M., Van Diepen, C., 1987. WOFOST, a procedure for estimating the production possibilities of land use systems. En: K.J. Beek, P.A. Burrough y D.E. McCormack, D.E. (eds.). *Quantified land evaluation procedures*. ITC Publication No. 6, ITC, Enschede, Holanda, pp.100-105.
- Dumanski, J. y C. Pieri. 2000. Land quality indicators: research plan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81: 93-102.
- Farshad, A. y J.A. Zinck. 1998. Traditional irrigation water harvesting and management in semiarid Western Iran: a case study of the Hamadan region. *Water International* 23: 146-154.
- . 2001. Assessing agricultural sustainability using the six-pillar model: Iran as a case study. En: S. Gliessman (ed.). *Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies*. CRC Press, Boca Raton, pp.137-151.
- Farshad, A., J.A. Zinck y G. Stoops. 2000. Computer-assisted image analysis to assess soil structure degradation: a case study of Iran. Proceedings, International Conference on Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and Management, 9-11 March 1999, IIRS, Dehradun. Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency, India, pp.221-229.
- Fresco, L., 1986. *Cassava in shifting cultivation. A systems approach to agricultural technology development in Africa*. Royal Tropical Institute, Amsterdam, Holanda.
- Fresco, L.O., H. Huizing, H. Van Keulen, H. Luning y R. Schipper. 1994. *Land evaluation and farming systems analysis for land use planning*. FAO, Roma, Italia, 209 pp.
- Giampietro, M. y G. Pastore. 2001. Operationalizing the concept of sustainability in agriculture: Characterizing agroecosystems on a multi-criteria, multiple scale performance space. En: S. Gliessman (ed.). *Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies*. CRC Press, Boca Raton, pp.177-202.
- Gomez, K.A. 1979. *On-farm assessment of yield constraints: methodology for identifying constraints to high yield*. International Rice Research Institute, Los Baños, Filipinas.
- Hansen, J. y J. Jones. 1996. A systems framework for characterizing farm sustainability. *Agricultural Systems* 51: 185-201.

- Lal, R., B. Ghuman y W. Shearer. 1990. Sustainability of different agricultural production systems for a rainforest zone of southern Nigeria. *Transactions of 14th Int. Congress Soil Science*, Vol. 6: 186-191. Kioto, Japón.
- Larson, W.E. y F.J. Pierce. 1994. *The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management*. SSSA Special Publication No. 35, Madison, Wisconsin, EE.UU., pp.37-51.
- Liverman, D., M. Hanson, B. Brown y R. Merideth. 1988. Global sustainability: toward measurement. *Environmental Management* 12(2): 133 -143.
- Lynam, J. y R. Herdt. 1989. Sense and sustainability as an objective in international agricultural research. *Agricultural Economics* 3: 381-398.
- Moameni, A., 1999. Soil quality changes under long-term wheat cultivation in the Marvdasht plain, south-central Iran. Tesis de doctorado, Ghent University, Bélgica, 284 pp.
- Moameni, A. y J.A. Zinck. 1997. Application of statistical quality control charts and geostatistics to soil quality assessment in a semi-arid environment in south-central Iran. *ITC-Journal 1997-3/4*, CD-ROM, 26 pp.
- Ryan, T. 1989. *Statistical methods for quality improvements*. John Wiley, EE.UU., 437 pp.
- Schaller, N. 1993. Sustainable agriculture and the environment. The concept of agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 46: 1-30.
- Smyth, A. y J. Dumanski. 1993. FESLM: An international framework for evaluating sustainable land management. FAO, World Soil Resources Report 73. Roma, Italia.
- Sys, C., E. Van Ranst y J. Debaveye. 1991. *Land evaluation part 1: Principles in land evaluation and crop production calculations*. Agricultural Publications No.7, General Administration for Development Cooperation, Brussels, Bélgica, 274 pp.
- Tang, H., E. Van Ranst y C. Sys. 1992. Modelling approach to predict land production potential for irrigated and rainfed wheat in Pinan County, China. *Soil Technology*, 5: 213-224.
- Wokabi, S. 1994. Quantified land evaluation for maize yield gap analysis at three sites on the eastern slope of Mount Kenya. Tesis de doctorado, Ghent University, Bélgica. ITC Publication 26, ITC, Enschede, Holanda, 289 pp.
- Ye, L. y E. Van Ranst. 2002. Population carrying capacity and sustainable agricultural use of land resources in Caoxian County (North China). *Journal of Sustainable Agriculture* 19(4): 75-94.
- Zinck, J.A. y A. Farshad. 1995. Issues of sustainability and sustainable land management. *Canadian Journal Soil Science* 75: 407-412.
- Zinck, J.A., J.L. Berroterán, A. Farshad, A. Moameni, S. Wokabi y E. Van Ranst. 2004. Approaches to assessing sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 23 (4): 87-109.

Este artículo se recibió el 21 de febrero de 2005. Su revisión final se aceptó el 20 de junio de 2005. Las imágenes son de Jeff T. Alu y Rene Asmussen.