
Manuel Glave, Javier Escobal

INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA LA AGRICULTURA ANDINA*

El objetivo central de esta investigación es realizar un balance de los distintos enfoques que se han desarrollado para «medir» la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de producción. A partir de esta sistematización, en el presente artículo sugerimos una metodología para aproximarse a la problemática de la medición de la sostenibilidad.

El documento está dividido en cuatro partes. Una discusión sobre el concepto mismo de sostenibilidad, sus orígenes, criterios para su medición y distintos niveles de análisis se presenta en la primera parte. En la segunda se discuten las características de indicadores de sostenibilidad alternativos, enfatizando cómo es que se ha desarrollado una tendencia dominante en la elaboración de indicadores agregados de sostenibilidad basados en la ponderación de un listado de indicadores parciales. El trabajo continúa con una propuesta metodológica doble: primero, la construcción de un modelo de variable latente, la «sostenibilidad», como denominador común del conjunto de indicadores parciales¹, y, en segundo lugar, la revisión y modelación del «valor presente neto» (social antes que individual) de un proyecto de desarrollo como un indicador robusto de la sostenibilidad del mismo². Finalmente se presentan algunas conclusiones y pautas metodológicas para la validación empírica de esta propuesta en el ámbito de algunos de los proyectos del GDRUPA y/o sus miembros.

* Documento preparado en el marco del proyecto «Políticas integradas para el desarrollo rural sostenible» del Grupo para el Desarrollo Rural y Políticas Agrarias (GDRUPA).

1 Basado en STOCK, James y M. WATSON «A Probability Model of the Coincident Economic Indicators» *National Bureau of Economic Research Working Paper N° 2772*, Cambridge 1993.

2 DE JANVRY, Alain, Elisabeth SADOULET y Blas SANTOS «Project Appraisal for Sustainable Rural Development Notes for IFAD's Operational Guidelines» International Fund for Agricultural Development, enero de 1994 (mimeo).

QUÉ SE QUIERE MEDIR

En los últimos años se ha desarrollado una literatura relativamente amplia sobre el concepto de sostenibilidad y sobre la manera más adecuada de medirlo. Normalmente se identifica como punto de partida para la definición de sostenibilidad el informe de la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo³, *Nuestro futuro común*. La Comisión respondió al encargo de Naciones Unidas y definió «desarrollo sostenible» como «el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades»⁴. Barrantes llama la atención sobre el énfasis puesto en satisfacer necesidades humanas –en particular de los pobres– contenido en el concepto, ya que explícitamente se parte del ser humano –sus necesidades, inventiva e instituciones– para, desde ahí, acercarse a la naturaleza, y no al revés⁵.

El informe de la Comisión Brundtland orientó así los debates hacia el concepto de «sostenibilidad del desarrollo». El término induce a pensar en los «límites al crecimiento económico», o en la necesidad de fijar un límite sobre el número de bienes y servicios consumidos por una generación. De esta manera surge la escuela de la «economía ecológica», que se preocupa por una escala óptima o tamaño de un sistema económico que puede ser «sostenido» por la dotación de recursos. La economía ecológica se basa precisamente en que «el crecimiento económico no puede ser sostenible», ya que los recursos del planeta son finitos, mientras se afirma que el desarrollo económico, entendido como el aumento de la calidad de vida, sí puede ser sostenible⁶. El tamaño del sistema, que impone los límites al crecimiento, estaría limitado a su vez por las leyes de la termodinámica.

Es evidente que mucha de la confusión sobre el concepto –y de la dificultad para operarlo– proviene de la existencia de diferentes niveles de análisis de la sostenibilidad. Es muy distinto hablar de un sistema de producción sostenible que de un ecosistema sostenible, y es más distinto aún referirse a una sociedad sostenible. El enfoque de la Comisión Brundtland apunta a este último nivel más macro. En el ámbito más micro, es

3 Mas conocido como el informe de la «Comisión Brundtland» por el nombre de la canciller de Noruega Gro Harlem Brundtland, quien, por encargo del secretario general de las Naciones Unidas, llevo adelante una investigación acerca de los efectos del desarrollo sobre el medio ambiente entre los años 1983 y 1987.

4 WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED) *Our Common Future*. Oxford University Press 1987, p. 43.

5 BARRANTES, Roxana «Desarrollo Sostenido sostenible sustentable ¿o simplemente desarrollo?», *Debate Agrario* 17 Lima CEPES 1993, p. 2.

6 Robert Costanza, editor *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*. New York: Columbia University Press 1993.

indudable que se cuenta ya con herramientas metodológicas para la medición de la sostenibilidad de sistemas de producción agrícola

En ese sentido, vale la pena repetir la clásica clasificación de Dixon y Fallon⁷, quienes sugieren hasta tres dimensiones de lo sostenible. La primera dimensión se refiere a un solo recurso natural, donde se trata de llegar a niveles de producción sostenible basándose en la tasa de regeneración del recurso. En ese contexto se desarrolló el concepto de «máxima extracción sostenible», utilizado en los casos de recursos naturales renovables como la extracción pesquera y la tala de bosques.

La sostenibilidad se puede referir también al nivel de un ecosistema y, por lo tanto, al equilibrio entre las especies. No es suficiente que un recurso (una especie) sea «manejada sosteniblemente» para garantizar la sostenibilidad del ecosistema. Aquí el problema se restringe a los *stocks* físicos de los recursos.

Por último, la sostenibilidad se puede referir a la idea de «desarrollo sostenible», tal como lo sugiere el informe de la Comisión Brundtland, donde el sentido socioeconómico del término y el énfasis en la calidad de vida no permiten un claro manejo del concepto⁸. Tal como observa Barrantes, la confusión conceptual aparece en el tercer nivel de análisis⁹. Por tanto, habría que comenzar por precisar hasta dónde queremos llegar con el concepto para poder definir mejor de qué manera se puede medir.

Una alternativa interesante es la propuesta por Dasgupta y Goran-Maler, quienes consideran que el cálculo de un índice del *producto interno neto* es la única manera de medir la sostenibilidad de una economía. Ellos afirman que «lo que se persigue es el bienestar presente y futuro, y no es por accidente que el índice que mide esto, cuando se calcula en forma apropiada, es el *producto interno neto* real»¹⁰. El énfasis que ponen en la contabilidad nacional ambiental es claro. Afirman que «si los recursos ambientales se van a equiparar con otros activos de capital, como mínimo ellos deben entrar en la contabilidad del ingreso nacional»¹¹.

7 DIXON, John y Louise A. FALLON «El concepto de sustentabilidad. Sus orígenes, alcances y utilidad en la formulación de políticas» en Joaquín Vial, editor *Desarrollo y medio ambiente. Un enfoque integrador*. Santiago de Chile: CIEPLAN, 1991, pp. 47-66.

8 La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) considera, en su documento principal (*Cuidar la Tierra. Estrategia para el futuro de la vida*, Gland Suiza: UICN/PNUMA/WWF, 1991), que la sostenibilidad se define como «mejorar la calidad de vida humana sin rebasar la capacidad de carga de los ecosistemas». El concepto de «capacidad de carga» no es válido cuando hablamos de recursos no renovables.

9 BARRANTES, R. «Desarrollo Sostenido sostenible sustentable ¿o simplemente desarrollo?» *ob. cit.*, p. 5.

10 DASGUPTA, Partha y Karl GORAN-MALER «El ambiente y los nuevos temas del desarrollo», en Joaquín Vial, editor *Desarrollo y medio ambiente. Un enfoque integrador*. Santiago de Chile: CIEPLAN, 1991, p. 30 (Énfasis nuestro).

11 *Ibid.* p. 44.

CARACTERÍSTICAS DE LOS INDICADORES Y ENFOQUES ALTERNATIVOS

El término «indicador» suele ser usado en más de un sentido en las distintas ciencias o disciplinas. Normalmente este concepto es asociado a datos, estándares, metas o umbrales. Eswaran, Pushparajah y Ofori definen a los indicadores como «variables cuyo propósito es medir un cambio en un determinado fenómeno o proceso», y mencionan que estos son percibidos como un instrumento analítico que facilita la medición de cambios por los que atraviesa un sistema¹². La cualidad más importante de un indicador sería la de ser objetivamente verificable y replicable¹³.

Para seleccionar los indicadores más adecuados deben tenerse en cuenta las características del sistema que se está evaluando y el grado de precisión que se pretende conseguir en dicha evaluación. En ese sentido, el proceso de selección de indicadores es tan importante como los propios indicadores. Indicadores mal elegidos pueden proveer una apreciación incorrecta del estado de situación del sistema bajo estudio.

Entre las consideraciones prácticas que deben ser tomadas en cuenta para seleccionar indicadores, Eswaran, Pushparajah y Ofori¹⁴ destacan las siguientes:

- La relación costo-beneficio del proceso de toma de datos para construir el indicador
- La capacidad de contar con el indicador a tiempo
- La capacidad de transmitir la información contenida en el indicador

Para determinar los mejores candidatos a convertirse en «indicadores de sostenibilidad» la literatura normalmente ha seguido los siguientes pasos:

1. Seleccionar un número de indicadores «potenciales» o posibles
2. Cada uno de estos indicadores potenciales es evaluado para cerciorarse de su capacidad de reflejar determinadas características del objeto de estudio
3. Asimismo, se desarrollan los valores que toman los umbrales cuantitativos o cualitativos a partir de los cuales se puede admitir que hubo un cambio en el sistema bajo observación
4. Cuando ello es posible, se realiza una evaluación de la sensibilidad del indicador

12 ESWARAN, Hari E. PUSHPARAJAH y C. OFORI «Indicators and their utilization in a framework for evaluation of sustainable land management» Washington, D.C., paper del USDA (Soil Conservation Service), 1992, distribuido en la conferencia electrónica sobre «Indicadores» organizada por INFORUM (1994)

13 Los indicadores también han sido considerados como «indicadores de *performance*» o «indicadores de impacto» cuando han sido utilizados en programas de desarrollo.

14 ESWARAN H. E. PUSHPARAJAH y C. OFORI «Indicators and their utilization in a framework for evaluation of sustainable land management» ob. cit.

5 Finalmente, en la medida que cualquier evaluación o proceso de monitoreo es costoso, la relación costo-beneficio del proceso de creación del indicador es tomada en cuenta como parte integral del proceso de selección del mismo

La literatura sobre «indicadores de sostenibilidad» es bastante amplia, habiéndose desarrollado especialmente durante los últimos dos o tres años

Cabe destacar la discusión que se llevó a cabo a través de la conferencia electrónica sobre indicadores de sostenibilidad (noviembre de 1993 a abril de 1994) moderada por Bob Hart y auspiciada por SANREM CRSP (Sustainable Agriculture and Natural Resource Management Collaborative Research Support Program) Dicha conferencia electrónica contó con la participación activa de algo más de cuarenta investigadores De acuerdo con el propio Hart¹⁵, la agenda de la reunión se basó en la siguiente secuencia de actividades

1 Primero, ponerse de acuerdo sobre un marco conceptual común, luego,

2 Ponerse de acuerdo sobre qué sistema, recurso o fenómeno pretendemos «sostener»

3 Desarrollar un conjunto de indicadores posibles que puedan predecir el estado futuro del sistema

4 Evaluar y seleccionar los indicadores que van a ser medidos

5 Medir y luego usar los indicadores en distintos tipos de análisis

A lo largo de la discusión se hizo evidente que entre los pasos (2) y (3) (poniéndose de acuerdo en qué sostener y desarrollar los posibles indicadores) hacía falta ponerse de acuerdo sobre cómo el o los indicadores serían usados Esta distinción resultó importante, pues en la práctica el uso que se le pretende dar a los indicadores (*i.e.*, señales cualitativas, predictores cuantitativos del estado del sistema) termina afectando el marco conceptual del que se parte Asimismo, saber cómo serán usados los indicadores ayuda a diseñar los criterios de evaluación y selección de los indicadores dentro de la lista de indicadores posibles o potenciales que han sido identificados

Tanto los participantes a esta conferencia como los distintos trabajos revisados para elaborar este documento usan una de las siguientes estrategias para identificar indicadores de sostenibilidad

1 Selección de indicadores a partir de una aproximación intuitiva (subjetiva)

2 Selección de indicadores a partir de un menú construido con base en experiencia previa

3 Selección de indicadores a partir de un modelo causa/efecto o una aproximación analítica

15 HART, Bob «Review of Indicators for Sustainability Discussion» Documento final presentado a la conferencia electrónica sobre indicadores de sostenibilidad (noviembre de 1993 a abril de 1994) organizada por INFORUM

Conocidos los indicadores parciales (sociales, económicos, ambientales, etcétera), usualmente se procede a construir un indicador agregado, para lo cual se determinan las ponderaciones. Dichas ponderaciones pueden ser obtenidas tanto a partir de algún marco teórico como a través de algún método *ad-hoc*. Finalmente, obtenido el indicador agregado que refleja la «sostenibilidad del sistema» se procede a analizar su evolución y a discutir el efecto que tienen los indicadores parciales sobre el agregado así como el impacto de acciones de política sobre ambos.

La primera estrategia para identificar indicadores de sostenibilidad (*i.e.*, selección a partir de una aproximación intuitiva o subjetiva) es usada por Rohner, Preston y Richardson, entre otros. Aquí se plantea que los fenómenos asociados con sostenibilidad son específicos a cada lugar analizado, por lo que el método para elaborar indicadores debe ser desarrollado *in-situ*, siendo poco útil la experiencia desarrollada en otros lugares. Al mismo tiempo, se debe poner énfasis en los «procesos» y la habilidad de administrarlos antes que en los instrumentos (algo así como «hacer camino al andar»).

La segunda estrategia, de hecho la más popular, considera que la experiencia pasada de medir la *performance* de sistemas e indicadores de sostenibilidad nos permite hacer una lista de indicadores posibles de ser usados en un contexto específico. La tarea de aquellos que trabajan evaluando un sistema específico sería la de reducir el tamaño de la lista, escogiendo los indicadores más aparentes y menos costosos de medir.

Entre quienes propugnan esta estrategia destacan Dumanski, Gutiérrez, Li y Baldares. Li¹⁶, por ejemplo, clasifica los indicadores de sostenibilidad en tres indicadores de *recursos* (naturales y sociales), indicadores de *estructura* (estructura económica y ecológica) e indicadores de *beneficios* (ecológicos, económicos y sociales). Por su parte, Baldares¹⁷ clasifica los indicadores a partir de los criterios de *estabilidad*, *equidad*, *resiliencia* y *productividad*. Como anexo 1 a este documento, a modo de ejemplo, se presenta la lista de indicadores sugerida tanto por Li como por Baldares.

A un nivel intermedio entre la primera y segunda estrategias se encuentran los indicadores culturales que recogen las prácticas tecnológicas locales. Estos indicadores del llamado «saber campesino» tratan de medir uno de los aspectos más complejos de la sostenibilidad de los sistemas de producción: la generación de conocimientos a partir de sistemas distintos.

16 Li, Z. «Sustainable Agriculture in China». Nanjing Institute of Environmental Science, China. Documento presentado a la conferencia electrónica sobre indicadores de sostenibilidad (noviembre de 1993 a abril de 1994) organizada por INFORUM.

17 BALDARES Manuel E. GUTIERREZ, A. ALVARADO y G. BRENES. «Indicadores de sostenibilidad agrícola y de recursos naturales para los países de América Latina y el Caribe». Ponencia presentada al XIII Encuentro Latinoamericano de la Sociedad Econométrica. Caracas, Venezuela. 2 al 5 de agosto de 1994.

en escala, propósitos, fuentes y usuarios. La literatura es amplia acerca de prácticas tecnológicas y, tal como lo discute Mayer, no basta con identificar «prácticas» tecnológicas con saber campesino¹⁸. Recientemente se está trabajando en el diseño de indicadores locales de sostenibilidad (*grassroots indicators*), que permitan incorporar a los sistemas locales de conocimiento como parte de procesos de apropiación de tecnologías y fortalecimiento (*empowerment*) de las poblaciones locales.

La tercera estrategia (*i.e.*, selección de indicadores a partir de un modelo causa/efecto o una aproximación analítica) es usada por varios autores (Cassman, Ehui, Harrington, De Janvry, entre otros). Dicha estrategia se basa en el desarrollo previo de un marco teórico donde el concepto de sostenibilidad puede ser operado casi directamente a partir del marco teórico planteado. Por ejemplo Cassman¹⁹, Ehui²⁰ y Harrington²¹ desarrollan el concepto de sostenibilidad a partir de la productividad total de los factores. Por su parte, De Janvry y otros²² plantean un modelo donde se explicita el concepto de sostenibilidad como un problema de equidad intergeneracional. El indicador que se deduce directamente del marco conceptual propuesto es el valor presente de los recursos de la generación presente *vis-a-vis* los de la generación futura.

Más allá de la habilidad que se tenga para identificar indicadores de sostenibilidad, se hace evidente en la literatura —especialmente aquella basada en los enfoques (1) y (2) mencionados— que se conoce poco sobre cómo hacer la selección final de indicadores y cómo evaluar su desempeño. Nuestra impresión es que aquellos que optan por el enfoque (3) resuelven parcialmente este problema al tener un marco teórico más claro de donde provienen el o los indicadores propuestos.

No hemos encontrado bibliografía que analice cómo deben compararse los costos de medir diferentes indicadores o cuán seguido deben medirse y con qué precisión. A lo más podemos citar a Eswaran, Pushparajah y

18 MAYER Enrique «Recursos naturales, medio ambiente, tecnología y desarrollo», en *Peru. El problema agrario en debate. SEPIA V* Lima. SEPIA/CAPRODA, 1994.

19 CASSMAN, C «Considerations for Selection and Prioritization of Sustainability Indicators» Centro Internacional de la Papa (CIP), Peru. Documento presentado a la conferencia electrónica sobre indicadores de sostenibilidad (noviembre de 1993 a abril de 1994) organizada por INFORUM.

20 EHUI S «How to compute intertemporal and interspatial Total Factor Productivity» International Livestock Centre for Africa. Documento presentado a la conferencia electrónica sobre indicadores de sostenibilidad (noviembre de 1993 a abril de 1994) organizada por INFORUM.

21 HARRINGTON, Larry Peter JONES y Manuel WINOGRAD «Operacionalización del concepto de sostenibilidad. Un método basado en la productividad total» Ponencia del Sexto Encuentro Internacional de RIMISP, Campiñas, Brasil, 11 al 14 de abril de 1994.

22 DE JANVRY, A, E SADOULET y B SANTOS «Project Appraisal for Sustainable Rural Development», *ob. cit.*, DE JANVRY Alain, Elisabeth SADOULET y Blas SANTOS «Project Evaluation for Sustainable Rural Development. Plan Sierra in the Dominican Republic», marzo de 1994 (mimeo).

Ofori²³, quienes sugieren que los criterios para realizar estas tareas son esfuerzo, simplicidad, especificidad, relevancia y confiabilidad

Existe consenso respecto de que el proceso de desarrollar y usar indicadores de sostenibilidad es parte de un proceso mayor de desarrollar alternativas de uso de recursos que sean más sostenibles, lo que a su vez es parte de un proceso mayor de desarrollar sistemas de uso de recursos que permitan alcanzar los objetivos –de hecho conflictivos– que tienen la generación presente y las generaciones futuras. En ese sentido, para enterarnos de cuánto sabemos sobre la construcción de indicadores cabe preguntarse primero cuánto sabemos sobre cómo desarrollar sistemas más sostenibles. Es interesante, así, mencionar las conclusiones que Bob Hart presenta al final de la conferencia electrónica a la que hemos hecho referencia en este documento.

«No quiero ser demasiado pesimista, pero no creo que tengamos una muy buena idea de cómo desarrollar y usar indicadores de sostenibilidad. Tenemos ideas sobre indicadores de degradación de recursos, también sobre viabilidad ecológica y socioeconómica de la finca y sobre indicadores que muestran la viabilidad de los sistemas comunales y sistemas macro-mercantiles, pero no sabemos mucho sobre indicadores de sostenibilidad. Sin embargo, esto no es sorprendente. No tenemos mucha experiencia en el desarrollo de sistemas que sean más sostenibles. Incluso no estamos seguros respecto a que es un sistema sostenible. Esto se debe, al menos parcialmente, a que no estamos seguros sobre que es equidad intergeneracional y si sostenibilidad implica más o menos de este concepto.»

Para muchos, nos hemos complicado la vida al crear el concepto de «sostenibilidad» y tratar de operarlo. Hemos hecho las cosas aun más difíciles exigiendo que este sea un concepto unificador que integre varias propiedades deseables de un sistema. Sin embargo, más allá de este escepticismo es evidente que existe consenso de que necesitamos sistemas de uso de recursos que no degraden el medio ambiente o sistemas locales que sean más equitativos en la distribución de sus beneficios manteniendo el potencial productivo de los recursos naturales locales. Necesitamos desarrollar sistemas rurales alternativos que provean mayores ingresos a los productores sin destruir su base de recursos naturales y sociales. Necesitamos aprender cómo poner en práctica decisiones de política que promuevan todos estos objetivos.

En la siguiente sección se desarrollarán dos aspectos metodológicos que creemos son los más prometedores para operar el concepto de «sostenibilidad». El primero está asociado a la construcción de un indicador agregado a partir de la estrategia (2) mencionada anteriormente (*í e*, selec-

23 ESWARAN H. E. PUSHARAJAH y C. OFORI «Indicators and their utilization in a framework for evaluation of sustainable land management», *ob cit*

ción de indicadores a partir de un menú construido con base en experiencia previa) Esta propuesta metodológica se plantea a partir de la literatura econométrica sobre series de tiempo, y consiste en reemplazar la construcción de un indicador agregado por la estimación de una variable no observada (variable latente) que es la que explica la dinámica de los indicadores parciales que se hubiesen recogido La segunda propuesta metodológica ha sido planteada por De Janvry y otros²⁴ y está asociada a la estrategia (3) (i.e., selección de indicadores a partir de un modelo causa/efecto o una aproximación analítica) Dicha propuesta metodológica introduce la comparación intertemporal de los beneficios que se derivan de un proyecto para operar el concepto de sostenibilidad A diferencia del enfoque típico, que no establece un punto de corte entre lo que es y no «sostenible», De Janvry señala un criterio directo a través del cálculo del valor presente neto

ALGUNAS ALTERNATIVAS METODOLÓGICAS

LA SOSTENIBILIDAD COMO UNA «VARIABLE LATENTE»

Esta sección pretende mostrar que es posible adaptar una metodología actualmente en uso por varias disciplinas de las ciencias sociales (vgr, economía y sociología) para estimar un indicador de sostenibilidad a partir de un conjunto de series de tiempo de relativamente fácil acceso (vgr, series de rendimiento, productividad, erosión, deforestación, etcétera) El modelo que subyace a la metodología propuesta supone que tal tarea es posible debido a que la dinámica de las series incluidas puede ser explicada por un solo factor común (latente) subyacente a todas ellas, el que será interpretado como un indicador del grado de sostenibilidad del sistema

La metodología planteada sugiere que primero se realicen pruebas estadísticas para mostrar que efectivamente solo se requiere especificar una sola variable latente común en el sistema A partir de los resultados obtenidos, es posible especificar un modelo en el que la evolución de las series de tiempo elegidas puede ser explicada por la dinámica de la variable latente

Como se mencionó en la sección anterior, las metodologías de construcción de indicadores parten, normalmente, de la identificación de las variables más fuertemente correlacionadas con las variables objetivo, exigiéndose como requisito que la relación con ellas sea estable a lo largo del tiempo La correlación detectada puede presentar diferentes estructuras de rezago o adelanto respecto de la variable objetivo Estas diferencias determinan que las variables sean clasificadas como *adelantadas*, si su correla-

24 DE JANVRY A, E SADOULET y B SANTOS «Project Appraisal for Sustainable Rural Development», ob cit DE JANVRY A, E SADOULET y B SANTOS «Project Evaluation for Sustainable Rural Development» ob cit

ción mayor es mantenida con períodos futuros de la variable objetivo, *coincidentes*, si la correlación es alta en el período corriente, y *rezagadas*, si su correlación mayor es mantenida con períodos pasados de la variable objetivo

Este tipo de metodología consiste en la elaboración de un índice que resume toda la información proveída por las variables que actúan de indicadores. El índice es un promedio ponderado de las variables seleccionadas, previamente diferenciadas y estandarizadas²⁵. Este indicador serviría como un predictor de la evolución del grado de sostenibilidad del sistema.

En las ciencias sociales, mucho del trabajo estadístico realizado con fines de elevar la calidad predictiva de los indicadores líderes ha recaído en la evaluación de los ponderadores utilizados, realizándose una búsqueda de los pesos óptimos. Dependiendo de cuál haya sido el criterio de optimización, los pesos relativos de cada variable en el indicador agregado tomarán valores diferentes.

El National Bureau of Economic Research (NBER), por ejemplo, ha generado una serie de criterios a los cuales se asocian diversos puntajes que, sumados, dan el peso de cada variable en el índice de actividad económica que ellos pretenden construir. Los criterios seguidos consideran el grado de correlación de la serie de referencia, o indicador, y la variable de referencia, o variable objetivo, su significancia económica, su eficiencia en reproducir los puntos de inflexión de la variable objetivo, la consistencia metodológica de las series, la prontitud en ser publicadas las series estadísticas, entre otros. Como es de suponer, estos criterios contienen un alto grado de arbitrariedad pese a haber sido evaluados permanente y consistentemente durante décadas.

En un intento por poner en práctica la metodología para el caso brasileño en un contexto similar, Contador²⁶ criticó la metodología de construcción de los ponderados, optando por criterios alternativos. La metodología utilizada consideró que el peso de cada variable estaba completamente resumido en su correlación simple con la variable objetivo, de tal manera que el criterio de agregación fuera un criterio estadístico (poblacional) antes que uno arbitrario. Es claro que la elección de la correlación simple como criterio de ponderación ya es, de suyo, arbitraria, teniendo en cuenta, como el mismo autor señala, que este estadístico no es siempre el óptimo²⁷.

25 Las variables son sometidas a transformaciones conducentes a lograr su estacionariedad, lo cual permite la realización del trabajo estadístico sin riesgo de obtener correlaciones espurias.

26 CONTADOR, C. R. «Ciclos económicos e indicadores de actividades en Brasil». Rio de Janeiro: IPEA/INDES, 1977.

27 El autor hace mención al hecho de que la correlación simple puede indicar estructuras de rezago o adelanto entre la variable indicador y la variable objetivo, que no

La construcción de estos «pesos relativos» para cada variable constituye una tarea esencial en tanto es la forma en la cual se discrimina la calidad y cantidad de información poseída por cada serie. Las aproximaciones tradicionales a la construcción de indicadores agregados han considerado que estos son resultado de una agregación de información proveniente de diversos indicadores que reflejan, cada uno de ellos, realidades parciales.

El argumento que postula que las variables indicadores están generadas por un mismo proceso estocástico o que existe correlación entre ellas debido a que están afectadas por la (o las) misma(s) fuerza(s) permite enfocar el problema desde otra óptica. En este contexto, el «indicador de sostenibilidad» no sería el resultado de la agregación de un número arbitrario de variables componentes sino que es un factor que expresa su estructura común o la fuente común de correlación. Esta variable es obviamente no observable y su estimación requiere de una metodología acorde con este supuesto.

Stock y Watson²⁸ han avanzado en esta dirección proponiendo una representación en el espacio de las variables de estado del indicador coincidente (*state space representation*), en la cual el indicador coincidente es una única variable no observada que explica a las variables componentes del indicador. El indicador (factor común) es a su vez generado por un proceso aleatorio perfectamente representable por una estructura AR(p). La estimación hace uso del algoritmo conocido como Filtro de Kalman²⁹.

El planteamiento de que existe un factor común no observado que genera las distintas variables observadas intenta dar un sustento a la existencia de una correlación entre este grupo de variables, y trata de resumir en tal factor común el *grado de sostenibilidad del sistema*. Este factor común presume que los movimientos similares de las variables coincidentes responden a la existencia de fuentes comunes de variación (ya sea en el corto como en el largo plazo), que pueden ser identificadas por algún procedimiento estadístico.

EQUIDAD INTERGENERACIONAL ¿CUESTION DE ETICA O DE EFICIENCIA?

El modelo de De Janvry y otros³⁰ establece criterios claros para la comparación intertemporal de los beneficios que se derivan de un proyecto y, a

siempre se sostienen cuando se descompone a la serie en sus componentes cíclicos. Las variables pueden estar fuertemente correlacionadas solamente en ciclos de determinada frecuencia y que no coinciden con la información aportada por la correlación simple. Esta información requiere el análisis del espectrograma de la serie.

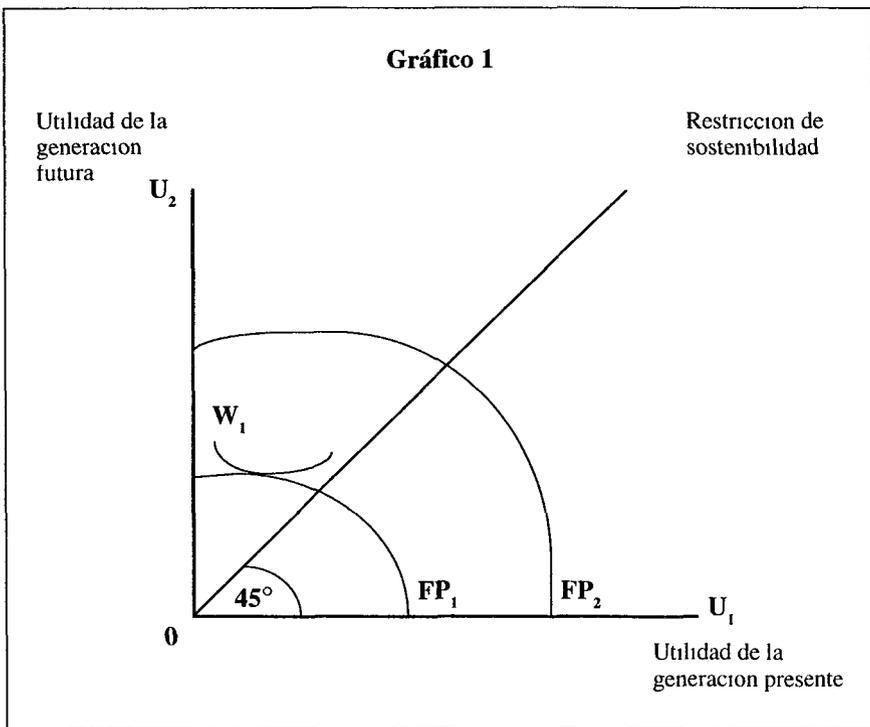
28 STOCK, J y M WATSON «A Probability Model of the Coincident Economic Indicators», ob cit

29 La representación matemática de esta metodología es resumida en el anexo 2

30 DE JANVRY A, E SADOULET y B SANTOS «Project Evaluation for Sustainable Rural Development» ob cit

partir de ello, operar la restricción de la sostenibilidad. En el gráfico 1 se observa cómo se alcanza la sostenibilidad en el cuadrante ubicado por encima de la curva de 45° (U_2OS), la cual representa la igualdad entre los VPN de los flujos de utilidad intertemporal alcanzados por las generaciones presentes (U_1) y futuras (U_2). El desarrollo sostenible, por lo tanto, impone una restricción al desarrollo de la actual generación, la cual deberá ubicar su función social de bienestar {denotada por $W(U_1, U_2)$ } en ese cuadrante U_2OS . De esta, la sostenibilidad estaría definida por la siguiente optimización

$$\text{Maximizar } W(U_1, U_2) \text{ sujeto a } U_2 \geq U_1$$



Hay que resaltar aquí que la utilidad viene dada no solo por el uso de un activo natural (valor de uso), sino también por el valor de opción, derivado de mantener las utilidades potenciales del uso del activo posteriormente (incertidumbre acerca del valor futuro del activo natural y acerca de su disponibilidad futura), y por el valor de la existencia del activo. Así, la utilidad que se debe medir respecto a un recurso natural estaría dada por

$$U \{ VO(S), VE(S), VU[pQ(L,K, \Delta s) - \text{Costos variables}] \}$$

donde

- S = *Stock* del recurso natural
- VO = Valor de opción
- VE = Valor de existencia
- VU = Valor de uso
- p = Precio de mercado del recurso
- Δs = Flujo de servicios del *stock* del recurso
- L = Mano de obra
- K = Capital físico

Para que esta utilidad pueda ser al menos mantenida constante a lo largo del tiempo, hay varios problemas que deben tomarse en consideración³¹

- i Sustituibilidad en el proceso de producción entre el recurso natural (Δs) y los factores de producción capital, K, y trabajo, L
- ii Sustituibilidad en la creación de utilidad entre el ingreso neto generado por el recurso (VU) y la conservación del recurso (VO y VE)
- iii El creciente valor atribuido a los valores de existencia y de oportunidad del recurso (VE y VO)
- iv La tendencia acelerada de procesos de desarrollo que, bajo presión poblacional, pobreza y otras variables, crean utilidad para las generaciones presentes en detrimento de la utilidad de las generaciones futuras

Es claro que, de acuerdo con el modelo, el uso del *stock* de capital natural impone una nueva restricción a los proyectos de inversión. La evaluación de proyectos se debe realizar por lo tanto en tres dimensiones, cada una de las cuales requiere distintos ejercicios contables

1 *Evaluación financiera (EF)* Este es el tradicional componente de evaluación de proyectos. Está medido por el «valor presente neto» (VPN) del flujo de costos y beneficios y por la «tasa interna de retorno» (TIR) del proyecto

2 *Evaluación de impacto ambiental (EIA)* El énfasis se traslada hacia las externalidades creadas por el proyecto, particularmente sobre poblaciones no beneficiarias dentro o fuera del área del proyecto. Se busca alcanzar «compatibilidad de incentivos» entre la internalización de esas externalidades y los objetivos del proyecto

3 *Evaluación de la sostenibilidad (ES)* Un nuevo cambio de énfasis esta vez hacia la equidad intergeneracional en el bienestar generado por el proyecto. La sostenibilidad impone una restricción a la actual generación de usuarios del capital natural, impidiendo que sus acciones conduzcan a las sucesivas generaciones a un nivel de bienestar menor al actual. Dado que la sostenibilidad se convierte en una cuestión de ética antes que de eficiencia (como son los dos primeros ejercicios contables, los EF y los

31 Ibid, pp 4-6

EIA), para que se la pueda poner en práctica se necesita previamente generar aceptabilidad de la restricción

De acuerdo con De Janvry y otros, estas tres dimensiones pueden ser combinadas a través de la imposición de impuestos de externalidades y de sostenibilidad a la contabilidad del valor presente neto y tasas internas de retorno. El problema es que existen distintos enfoques para incorporar el criterio de sostenibilidad en estos ejercicios de evaluación de proyectos. Un primer enfoque es el basado en la «ética del bienestar intergeneracional», donde comportamientos altruistas de la actual generación conducirían a una tasa de descuento igual a cero y no habría sustitución entre el bienestar de generaciones sucesivas. Un segundo enfoque considera la necesidad de un «fondo intergeneracional» donde se puedan transferir recursos de generación a generación (hacia atrás o hacia adelante) a través de impuestos, subsidios y la capitalización de un fondo, lo que aseguraría un flujo constante de bienestar a través del tiempo³². Un tercer enfoque es el propuesto por Solow, quien considera que la sostenibilidad se alcanza a través de *stocks* de capital no decrecientes distinguiendo el capital físico del capital humano y del capital natural³³.

El modelo de De Janvry y otros adopta el enfoque de un fondo intergeneracional y es puesto en práctica en la evaluación del Plan Sierra en la República Dominicana. Se formula un modelo de análisis de un proyecto de desarrollo de una cuenca, donde las familias beneficiarias se ubican en la cabecera de la cuenca mientras que las familias de la parte baja de la cuenca son receptoras de las externalidades. El proyecto de desarrollo introduce una serie de innovaciones en las actividades productivas tradicionales, y/o «transiciones» a nuevas actividades productivas. La evaluación del impacto de estas actividades y transiciones se realiza a través del análisis de la factibilidad del proyecto, la aceptabilidad del mismo por parte de las familias beneficiarias y la sostenibilidad vista como un asunto de equidad intergeneracional³⁴.

Factibilidad, aceptabilidad y sostenibilidad

El modelo que acabamos de resumir nos lleva a considerar a la sostenibilidad como un criterio alternativo en la evaluación de proyectos. El modelo necesita, para cada actividad productiva tradicional y transiciones a nuevas actividades productivas, contar con la siguiente información³⁵.

32 PEARCE, D y J WARFORD *World Without End*, ob cit

33 SOLOW, Robert «On the Intergenerational Allocation of Natural Resources», *Scandinavian Journal of Economics*, 88 (1), 1986 pp 141-49

34 PEARCE, D y J WARFORD *World Without End*, ob cit. Estas tres dimensiones no son más que el clásico triángulo de la economía, ecología y sociedad. Muchos autores han incorporado recientemente consideraciones de género como una cuarta dimensión.

35 DE JANVRY, A E SADOULET y B SANTOS «Project Appraisal for Sustainable Rural Development» ob cit, pp 3-4

	Primera generacion (1)		Segunda generacion (2)	
	Parte alta	Parte baja	Parte alta	Parte baja
Valor presente neto	VPN_1^a	VPN_1^b	VPN_2^a	VPN_2^b
Ingreso anual promedio	y_1^a	y_1^b	y_2^a	y_2^b
Ingreso sostenible anual	$\bar{y}_1^a = rVPN_1^a$	$\bar{y}_1^b = rVPN_1^b$		

De esta manera, para la evaluación de las tres dimensiones de un proyecto, a saber, la factibilidad, la aceptabilidad y la sostenibilidad, estas se pueden definir de la siguiente manera

1 *Factibilidad* Se logra simplemente si la actividad o transición recomendada obtiene ganancias sociales netas medidas por VPN_1 . Así,

- para actividades tradicionales
Factibilidad privada $VPN_1^a \geq 0$ o $y_1^a \geq 0$
- para transiciones a nuevas actividades
Factibilidad privada $\Delta y_1^a \geq 0$
Factibilidad social $\Delta y_1^a + \Delta y_1^b \geq 0$

donde Δ representa el cambio generado por la nueva actividad

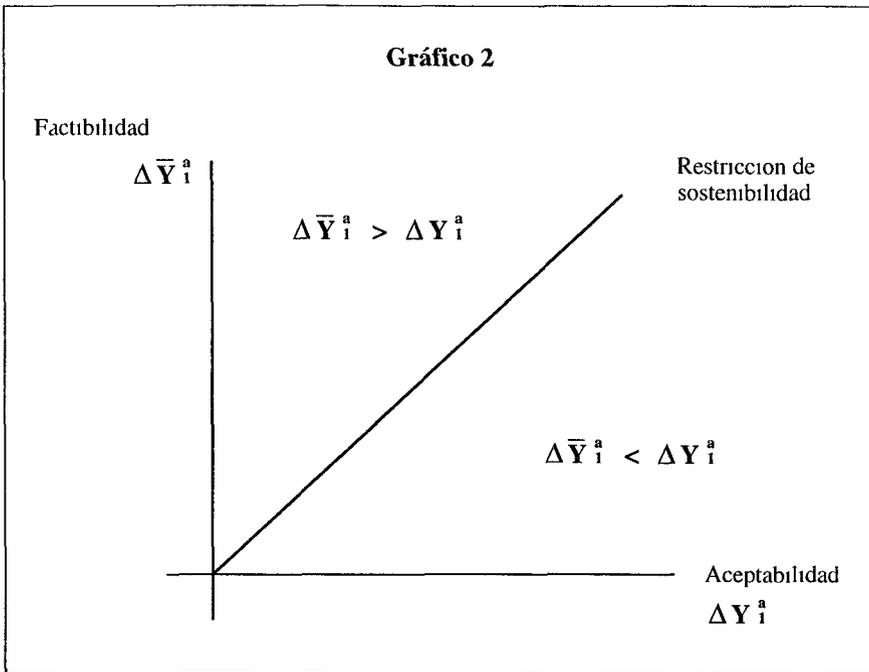
2 *Aceptabilidad* Se logra a través de la compatibilidad de incentivos en la adopción de la nueva actividad, es decir, si aumenta el ingreso anual promedio de las familias beneficiarias. Así,

- para actividades tradicionales
Aceptabilidad directa $y_1^a \geq 0$
- para transiciones a nuevas actividades
Aceptabilidad directa $\Delta y_1^a \geq 0$
pero después de internalizar las externalidades producidas en la parte baja de la cuenca $\Delta y_1^a + \Delta y_1^b \geq 0$,
y después de internalizar las ganancias de sostenibilidad en la parte baja de la cuenca $\Delta y_1^a + \Delta y_1^b \geq 0$

3 *Sostenibilidad* Se logra si las ganancias sociales netas para la siguiente generación no son menores que las ganancias para la generación presente. Así,

- para actividades tradicionales
 $VPN_1^a \leq VPN_2^a$ o $y_1^a \leq y_2^a$ o $y_1^a \leq y_1^a$
- para transiciones a nuevas actividades
Sostenibilidad directa $\Delta y_1^a \geq \Delta y_1^a$
pero después de internalizar las externalidades producidas en la parte baja de la cuenca $\Delta y_1^a + \Delta y_1^b \leq \Delta y_1^a + \Delta y_1^b$

El gráfico 2 resume estas tres dimensiones en la evaluación de proyectos de desarrollo. Ahí se presenta otra vez la nueva restricción de sostenibilidad, ahora de manera combinada con la factibilidad y aceptabilidad del proyecto



La aplicación de este modelo en la evaluación del Plan Sierra muestra una serie de peculiaridades asociadas a su implementación. En primer lugar, se combina una noción de tiempo continuo en el criterio de sostenibilidad y, al mismo tiempo, se tiene que asumir un marco temporal intergeneracional (de veinte años como ruptura generacional), lo que genera, por un lado, la necesidad de contar con una serie de tiempo de por lo menos veinte años (y, si no existe, simularla hacia adelante), y, por otro lado, cierta arbitrariedad acerca de la brecha generacional. En segundo lugar, el modelo muestra que la transferencia intergeneracional de recursos requiere de la intervención del Estado, al margen de que existan o no mercados de capitales. Finalmente, cuando una actividad no es factible ni sostenible el modelo no resuelve el *impasse*, por lo que queda pendiente el diseño institucional requerido para la transferencia intergeneracional de recursos.

Los resultados del ejercicio son muy interesantes. Para cada una de las actividades tradicionales y transiciones recomendadas se realizan los tres cálculos. Se encuentra que si bien es cierto que la difusión de ciertas actividades requiere de un adecuado manejo de impuestos y subsidios, la mayoría de las transiciones recomendadas son factibles, generan ganancias sociales significativas, y las ganancias sociales tanto de la parte alta como de la parte baja son fácilmente sostenibles en el tiempo³⁶. Se demuestra

³⁶ Ibid p 9

que todas las actividades tradicionales son rentables en la parte alta y crean externalidades negativas en la parte baja. Sin embargo, las pérdidas debidas a las externalidades son menores que las ganancias alcanzadas en la parte alta, por lo que las externalidades deberían ser fácilmente internalizables. Para el caso de las transiciones se muestra un panorama similar, aunque con pérdidas externas menores y con alto potencial para internalizarlas.

CONCLUSIONES

El objetivo central de este documento ha sido realizar un balance de los distintos enfoques que se han desarrollado para «medir» la sostenibilidad de los sistemas de producción agrícola. De la revisión de la literatura se hace evidente que existe muy poca experiencia práctica sobre cómo desarrollar y cómo usar estos indicadores. Esta constatación nos lleva a concluir que el proceso de construcción de indicadores de sostenibilidad deberá ser, necesariamente, un proceso iterativo. En este proceso tanto la definición de «lo sostenible» como las metodologías más adecuadas para estimar un indicador que refleje la sostenibilidad del sistema deben estar en constante evaluación. Será también clave en este proceso entender mejor las relaciones causa-efecto que condicionan la evolución de los sistemas bajo análisis. La contribución del saber local en este proceso no deberá ser ignorada.

El documento muestra cómo es que se ha desarrollado una tendencia dominante en la elaboración de indicadores agregados de sostenibilidad basados en la utilización simultánea de un conjunto de indicadores parciales (normalmente asociados a aspectos bio-productivos, sociales, económicos, ambientales, etcétera). Esta tendencia está asociada al hecho de que existen distintas maneras de entender «lo sostenible» y que, muchas veces, se superponen en un mismo estudio varias de estas dimensiones. Siguiendo a Dixon y Fallon³⁷, se ha reconocido que hay hasta tres dimensiones de lo sostenible, dependiendo de si se hace referencia a un solo recurso natural, a un ecosistema o a un sistema jerárquico superior, en donde cabe referirse al concepto de desarrollo sostenible. Esta tendencia a superponer planos conceptuales ha llevado, lamentablemente, a que abunden estudios donde el indicador de sostenibilidad es operado como una gran lista de indicadores parciales.

En este sentido, la propuesta de construcción de un modelo de variable latente —la «sostenibilidad»— como denominador común del conjunto de indicadores parciales no debe sustituir al necesario proceso de ponerse de acuerdo sobre qué sistema, recurso o fenómeno pretendemos «sostener» y cuál es el marco conceptual que relaciona las variables que se pretenden medir con el fenómeno o proceso bajo estudio. En este contexto, la pro-

37 DIXON, J y L A FALLON «El concepto de sustentabilidad», *ob. cit.*

puesta de un modelo de variables latentes es tan solo una metodología de agregación alternativa. La segunda propuesta metodológica, en cambio, muestra cómo es posible desarrollar un marco conceptual del cual se deriva explícitamente el indicador de sostenibilidad. Así, se presenta la metodología esbozada por De Janvry, Sadoulet y Santos usando el valor presente neto (social antes que individual) de un proyecto de desarrollo como un indicador robusto de la sostenibilidad del mismo.

A pesar de esta confusión en la literatura, es importante reconocer que existe consenso en ella acerca de que el proceso de desarrollar y usar indicadores de sostenibilidad es parte de un proceso mayor para desarrollar alternativas de uso de recursos que sean más sostenibles, lo que a su vez es parte de un proceso mayor que tiene como fin desarrollar sistemas de uso de recursos que permitan alcanzar los objetivos –de hecho conflictivos– que tienen la generación presente y las generaciones futuras.

Sin embargo, pese a que la incorporación del impacto ambiental en las metodologías de evaluación de proyectos de desarrollo o sistemas de producción puede ser vista como una restricción adicional, debe también ser entendida como una manera de crear oportunidades de nuevas iniciativas de política para el desarrollo rural a partir de la internalización de los costos ambientales. Las nuevas oportunidades aparecen en la medida que los potenciales «beneficiarios» con el cumplimiento de la restricción de sostenibilidad pueden recibir una carga tributaria con la cual financiar nuevas oportunidades de inversión para el desarrollo rural. Dichos beneficiarios pueden encontrarse fuera del ámbito del proyecto, entendido este como el espacio físico (externalidades) o su tiempo de ejecución (sostenibilidad). De esta manera se amplía la capacidad de desarrollo de la sociedad.

El desafío consiste precisamente en el diseño de una metodología de evaluación de sistemas productivos que combine adecuadamente los criterios de *factibilidad financiera*, *aceptabilidad social* y *sostenibilidad*, entendida esta última como equidad intergeneracional. Más importante aun conocida esta metodología, queda pendiente el diseño de mecanismos institucionales para alcanzar la trilogía de la factibilidad, aceptabilidad y sostenibilidad cuando los proyectos o sistemas parten de un punto fuera de ella o no logran alcanzarla.

Anexo 1

Algunos indicadores de sostenibilidad propuestos en la literatura

LISTA PROPUESTA POR LI

INDICADORES DE RECURSOS

Indicadores de recursos naturales

- Tamaño y composición de la tierra
- Temperatura activa acumulada por sobre los 10 grados centígrados por año
- Lluvia por año
- Tiempo de sol
- Total disponible del recurso agua
- Porcentaje de cobertura vegetal
- Tamaño de la tierra utilizable

Indicadores de recursos sociales

- Número de trabajadores agrícolas
- Extensión de la infraestructura vial
- Maquinaria agrícola
- Energía eléctrica usada por hectárea
- Recursos usados por persona

INDICADORES DE ESTRUCTURA

Indicadores de estructura ecológica

- Distribución porcentual de los distintos cultivos (incluyendo granos, cultivos comerciales, cultivos «ecológicos»)
- Distribución porcentual de cultivos, pastos, forestales
- Proporción de animales domésticos que se alimentan de vegetales
- Proporción de fertilizantes que son de origen orgánico
- Porcentaje de energía primaria utilizada

Indicadores de estructura económica

- Estructura del valor de producción
- Estructura de la mano de obra agrícola
- Estructura de costos de la producción agrícola

INDICADORES DE BENEFICIO

Indicadores de beneficio ecológico

- *Ratio* de utilización de los recursos en el sistema
- *Ratio* de utilización de mano de obra en el sistema
- *Ratio* de utilización de energía solar en el sistema
- *Ratio* de transformación de materia en alimento
- *Ratio* de transformación de energía en alimento

- Rendimiento de los cultivos por hectárea
- *Ratio* de insumo-producto
- Balance nutricional del suelo (*i e*, N, P, K, etcétera)
- Porcentaje de pastos y recursos forestales
- Estructura de la demanda energética del productor
- Índice compuesto de polución ambiental en el medio rural

Indicadores de beneficio económico y social

- *Ratio* económico de insumo-producto
- Productividad de la tierra y de la mano de obra en el sistema
- Tasa de ganancia sobre la inversión
- Tasa creciente del valor de producción total
- Ingreso per cápita
- Índice de protección de los recursos naturales

LISTA RESUMEN DE INDICADORES PROPUESTOS POR BALDARES

Indicadores propuestos	Indicador de sostenibilidad	Indicador de referencia	Se relaciona con	Parametro que estima
1 Tasa anual de deforestacion del bosque cerrado		1	2	Estabilidad
2 Intensidad del impacto de la deforestacion	1			Resiliencia
3 Numero de habitantes por Ha de bosque cerrado		1	4	Equidad
4 Indice de racionalidad en el uso de la tierra	1			Productividad
5 Indice de produccion ag./Ha (1979 81 = 100)	1			Productividad
6 Indice de prod agr/trab agr (1979 81 = 100)		1	9 10 18 19	Equidad
7 Fertilizantes (kg/Ha)		1	5	Estabilidad
8 Plaguicidas (kg/Ha/año)		1	5	Estabilidad
9 Tasa crec promedio anual PIBA/hab (\$@1980)		1	6 5	Estabilidad
10 % PIBA con relacion al PBI		1	6 9	Estabilidad
11 Recursos renovables de agua subterranea/hab (103 m ³) por año	1			Productividad
12 % poblacion con acceso al agua potable	1			Equidad
13 % superficie nacional protegida	1			Resiliencia
14 % del numero de especies animales amenazadas		1	13	Equidad
15 % del numero de taxones de plantas raras y amenazadas		1	13	Equidad
16 Tasa anual de crecimiento de la poblacion total	1			Productividad
17 Densidad demografica (hab./Ha) total	1			Estabilidad
18 Densidad demografica (hab./Ha) rural		1	6 16	Equidad
19 Relacion de salarios medios de las zonas rurales y urbanas	1			Equidad
20 Consumo de energia/hab (kg equiv de petroleo)	1			Equidad
21 Relacion entre la capac pot de carga demografica y la densidad poblac	1			Estabilidad
22 % presupuesto nacional dedicado a la educacion	1			Productividad
23 % presupuesto nacional dedicado a la salud	1			Productividad
24 % presupuesto nacional dedicado al sector social		1	23 24	Productividad
25 Coeficiente de Gini para ingresos	1			Equidad
26 Indice de libertad humana	1			Resiliencia
27 Suministro calenco diario como porcentaje de los requerimientos	1			Equidad
28 Coeficiente de Gini para tenencia de la tierra	1			Equidad
29 % de la deuda externa total desembolsada en relacion al PBI	1			Estabilidad
30 Deuda externa total desembolsada per capita (\$)		1	30	Equidad
31 % de la deuda con relacion a las exportaciones	1			Resiliencia
32 Indice de terminos de intercambio	1			Estabilidad
33 % de hogares en situacion de pobreza	1			Productividad
34 Indice de desarrollo humano	1			Equidad
35 Graduados en ciencias como % de graduados	1			Resiliencia

Anexo 2

Estimación de un indicador de sostenibilidad mediante un modelo dinámico de variables latentes

REPRESENTACIÓN DEL INDICADOR DE SOSTENIBILIDAD EN EL ESPACIO DE LAS VARIABLES DE ESTADO

La representación en el espacio de las variables de estado permite relacionar una variable o grupo de variables que son consideradas *inputs* con un grupo de variables que se denominan *outputs*. Las variables consideradas como *inputs* pueden ser no observables aun cuando generen al grupo de variables observables consideradas *outputs*. Tal representación es una forma compacta de expresar un sistema de ecuaciones en diferencia o diferenciales de orden finito como un proceso markoviano de primer orden.

La representación, en su forma más general, consta de dos grupos de ecuaciones. En el primer grupo se presenta un vector de variables generado por un proceso autorregresivo de primer orden, un conjunto de variables exógenas y un vector aleatorio que representa el término de perturbación. Estas variables son llamadas de estado y se podrían escribir de la siguiente manera

$$x_t = \phi_t x_{t-1} + \gamma_t z_t + G v_t \quad (1)$$

x es un vector j -dimensional, z , vector de variables exógenas, es de dimensión k , y v , término de perturbación, es m -dimensional. Este grupo de ecuaciones es llamado ecuaciones de transición.

El segundo grupo de ecuaciones relaciona las variables observadas con el vector de variables de estado (no observables). Dicho sistema de ecuaciones considera la posibilidad de introducir otras variables explicativas y un término de perturbación. Formalmente se expresa como

$$y_t = \alpha_t x_t + \beta_t z_t + e_t \quad (2)$$

donde y es un vector de dimensión p , x es un vector j -dimensional, z es k -dimensional y v tiene dimensión m . Esta ecuación es llamada ecuación de medida.

Se considera, adicionalmente, que v_t y e_t se distribuyen como una normal multivariada, siendo independientes entre ellas

$$\begin{bmatrix} v_t \\ e_t \end{bmatrix} \sim N \left[0, \begin{bmatrix} Q_t & 0 \\ 0 & R_t \end{bmatrix} \right]$$

Si se asume que ($\gamma = \beta = 0$) y que R y Q son matrices diagonales, las variables observadas pueden considerarse como simples señales o efectos de las variables de estado, que son las que finalmente generan el proceso. Esta presentación será de utilidad más adelante.

El algoritmo del filtro de Kalman permite estimar las variables de estado, dada la información de las variables observables representadas en la ecuación de medida. Estas ecuaciones hacen uso de la información contenida en las matrices de parámetros de las ecuaciones de transición y medida, y en la matriz de varianzas de los términos de perturbación. Esta información es asumida como conocida *a priori* y sin ella es imposible hacer uso del algoritmo. En tal sentido, como se verá en la siguiente sección, la necesidad de especificar la forma de las ecuaciones y los valores de los parámetros exige, adicionalmente, la presentación de una metodología que permita hacerlo.

El filtro de Kalman consta de un sistema de ecuaciones llamadas de predicción que pueden presentarse de la siguiente forma:

$$x_{t|t-1} = \phi_t x_{t-1} + \gamma_t z_t \quad (4)$$

$$P_{t|t-1} = \phi_t P_{t-1} \phi_t^T + G_t Q_t G_t^T \quad (5)$$

$$y_{t|t-1} = \alpha_t x_{t|t-1} + \beta_t z_t \quad (6)$$

$$H_t = \alpha_t P_{t|t-1} \alpha_t^T + R_t \quad (7)$$

donde $x_{t|t-1} = E[x_t | I_{t-1}]$, P_t es la matriz de varianza correspondiente al estimado de x_t , y H_t la correspondiente al estimado de y_t . Estas ecuaciones se conocen como ecuaciones de predicción, y están acompañadas por otras llamadas de actualización que permiten la acción iterativa del algoritmo. Estas ecuaciones son las siguientes:

$$x_{t|t} = x_{t|t-1} + P_{t|t-1} \alpha_t^T H_t^{-1} (y_t - y_{t|t-1}) \quad (8)$$

$$P_{t|t} = P_{t|t-1} - P_{t|t-1} \alpha_t^T H_t^{-1} \alpha_t P_{t|t-1} \quad (9)$$

ESPECIFICACIÓN DE UN MODELO APLICADO PARA IDENTIFICAR UN INDICADOR DE SOSTENIBILIDAD PARA UNA REGIÓN ESPECÍFICA

A continuación se presenta la metodología utilizada para identificar un indicador de sostenibilidad para una región específica. La aproximación

seguida recoge los planteamientos hechos por Watson y Engle³⁹ y por Stock y Watson⁴⁰

Consideremos que y_t es un vector que contiene cuatro variables observables (vgr, productividad total de factores, tasa anual de deforestación, intensidad de uso del suelo, balance energético) expresadas como tasas de variación porcentual. Se asume que cada una de estas series sigue el siguiente comportamiento

$$y_{it} = \alpha_t S_t + e_{it} \tag{10}$$

donde $E[e_{it} e_{jt}] = 0$, $E[e_{it} S_t] = 0$, para todo t , i diferente de j , e_t es un vector de cuatro términos de perturbación, S_t es el indicador de sostenibilidad expresado como tasa de variación porcentual, y se considera como el único factor que genera, en el largo plazo, a las series observables

Se considera que S_t es generado por un proceso AR(p) y el término e_{it} por un proceso AR(q). Esto es,

$$S_t = \sum_{i=0}^{i=p} \phi_i S_{t-i} + v_t \tag{11}$$

$$e_{it} = \sum_{j=1}^{j=q} \rho_{ij} e_{it-j} + \mu_{it} \tag{12}$$

Para presentar este modelo en su representación en el espacio de las variables de estado es preciso determinar una ecuación de transición y una ecuación de medida. La ecuación de transición incluye las variables no observadas, S_t y sus rezagos. En la ecuación de medida se expresan las variables observadas como función de las no observadas. Si esto es así, la ecuación de transición puede escribirse como

$$X_t = \begin{bmatrix} S_t \\ e_{1t} \\ e_{1t-1} \\ e_{2t} \\ e_{2t-1} \\ e_{3t} \\ e_{3t-1} \\ e_{4t} \\ e_{4t-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \emptyset & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{11} & \rho_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_{21} & \rho_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{31} & \rho_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_{41} & \rho_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (X_{t-1}) + v_t \tag{13}$$

Por su parte, la ecuación de medida se puede escribir como

$$Y_t = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} (X_t) \quad (14)$$

$$Y_t = [y_t^1 y_t^2 \quad y_t^4]^T$$

Donde

$$\begin{bmatrix} v_t \\ e_t \end{bmatrix} \sim N \left[\emptyset, \begin{bmatrix} Q & \emptyset \\ \emptyset & R \end{bmatrix} \right], Q = \begin{bmatrix} \sigma_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2_1 & 0 \\ - & - & - \\ 0 & 0 & \sigma^2_4 \end{bmatrix}, R = \emptyset_{4 \times 4} \quad (15)$$

Esta forma de presentar el modelo permite utilizar fácilmente las ecuaciones del filtro de Kalman presentadas en (4)-(7). A través de ellas se pueden calcular los errores de predicción del modelo.