

Construction of an Environmental Sustainability Index and its application in productive parcels in the Municipality of Dagua

INGENIERIA AGRICOLA

Construcción de un Índice de Sostenibilidad Ambiental y su aplicación en parcelas productivas campesinas del Municipio de Dagua

Danna Sarita-Rengifo^{1§}, Olga Lucía-Baquero², Alexander Gaviria¹

¹*Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de los Recursos Naturales y el Ambiente (EIDENAR), Cali, Colombia*

²*Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (CINARA), Cali, Colombia.*

danna.rengifo@correounivalle.edu.co, olga.baquero@correounivalle.edu.co,

alexander.gaviria@correounivalle.edu.co,

(Recibido: 28 de Marzo de 2019 - Aceptado: 02 de Abril de 2019)

Abstract

Studies on processes of environmental degradation require an holistic approach that integrate aspects of the natural behavior of ecosystems with the social organization; processes that can be quantified and qualified with tools such as indexes and indicators. The structure of the final environmental sustainability index allows analyzing the components of water resources and soil at smallholdings through oriented indicators to evaluate the management and the state of these resources. The technique used in the construction of the index includes: selection of components, indicators and sub-indicators, their respective weights, their measurement and the robustness analysis of the final index. The data collection was made with three methods: survey form, observation and knowledge's dialogue in 6 peasant's smallholdings located in the Centella micro watershed located in the municipality of Dagua, where highly diversified agricultural activities at small scale are mainly developed. Applying the index was obtained that 50% of the plots had high sustainability and the other 50% half sustainability.

Keywords: *Environmental index, Soil and water resources, Sustainability indicators, La Centella.*

Resumen

Los estudios sobre los procesos de degradación ambiental requieren de enfoques holísticos que integren aspectos del comportamiento natural de los ecosistemas con los de la organización social; procesos que se pueden cuantificar y cualificar con herramientas como son los índices e indicadores. La estructura del índice de sostenibilidad ambiental construido permite analizar los componentes del recurso hídrico y el suelo en parcelas productivas mediante indicadores orientados a conocer las formas de manejo y el estado de dichos recursos. Las técnicas empleadas en la construcción del índice comprenden: la selección de componentes, indicadores y subindicadores, sus respectivas ponderaciones, la medida de estos y el análisis de robustez del índice final. Se utilizaron tres métodos para la recolección de datos; instrumento tipo encuesta, observación y dialogo de saberes en 6 parcelas campesinas ubicadas en la microcuenca La Centella en el municipio de Dagua donde se desarrollan principalmente actividades agrícolas, en sistemas diversificados y a pequeña escala. Al aplicar el índice se obtuvo que el 50% de las parcelas presentaron sostenibilidad alta y el otro 50% sostenibilidad media.

Palabras Clave: *Indicadores, Indice, Recurso hídrico, Sostenibilidad ambiental, Suelo.*

1. Introducción

El concepto de sostenibilidad surge como respuesta a las amenazas que enfrenta el planeta por diversas problemáticas socioambientales ⁽¹⁾. Este pretende activar la responsabilidad de la sociedad para enfrentar el conjunto de problemas y desafíos de la humanidad, en proyección a la cooperación y defensa del interés general, visualizando el medio ambiente y el desarrollo en conjunto ⁽²⁾. La noción de sostenibilidad supone comprender que la tierra no es un recurso ilimitado y que el ritmo en el que se están agotando los recursos naturales proyecta un futuro incierto para las próximas generaciones ⁽³⁾. Asimismo, el uso de la naturaleza para el desarrollo de la sociedad se ha centrado en el crecimiento económico, sin cuestionarse los efectos ambientales generados, los cuales se han manifestado con el paso de los años y que se materializan en el cambio climático a través de los eventos extremos (en particular en el trópico aumento de temperatura y en el régimen de lluvias) La frecuencia, intensidad y duración observada de algunos de estos eventos han ido cambiando en la medida que el sistema climático se ha calentado agravándose por factores tanto naturales como antrópicos (p ej., modos internos

de variabilidad climática , cambio climático antropogénico, efectos de aerosoles) ⁽⁴⁾.

Una de las herramientas que permite cuantificar y cualificar la sostenibilidad son los índices, indicadores, y subindicadores ⁽⁵⁾ que reflejan el estado de un sistema (ref 01) y/o de su comportamiento espacio temporal ⁽⁶⁾.

Por otro lado, durante más de 50 años el sector agrícola ha sido influenciado fuertemente por las prácticas de manejo de la revolución verde, las cuales afectan y degradan el recurso hídrico y los suelos ⁽⁷⁾, en esa medida, también se ven afectados los agroecosistemas conformados por comunidades campesinas. Adicionalmente el proceso acelerado de Cambio Climático (CC) que se manifiesta en alteraciones de las condiciones normales de precipitación y temperatura, generando crecientes de caudal y sequías ⁽⁸⁾, desencadenan diferentes problemas socioambientales. Todas estas situaciones deben ser cuantificadas para determinar el grado de deterioro y las posibles causas de afectación de los agroecosistemas campesinos en aras de contribuir a la conservación y restauración de los recursos naturales y la mitigación de impactos ambientales; los índices, indicadores y subindicadores permiten evaluar si las prácticas de manejo responden adecuadamente (en forma

sostenible) a cambios climáticos, culturales, económicos y políticos.

Este estudio presenta la construcción de un índice de sostenibilidad ambiental, a partir de la interrelación de la producción campesina con el recurso hídrico y el suelo, mediante el manejo de su parcela productiva. En este sentido, el índice es una herramienta para caracterizar las prácticas realizadas en agroecosistemas, mediante indicadores enfocados a evaluar el manejo y el estado del recurso hídrico y el suelo en parcelas productivas campesinas. Se presenta un estudio de caso, aplicado a parcelas campesinas de la microcuenca La Centella del municipio de Dagua en el Valle del Cauca – Colombia.

2. Materiales y Métodos

2.1. Definición de la estructura del índice

El índice de sostenibilidad ambiental es conformado por componentes, indicadores, subindicadores y variables de medida, esquematizados en la Figura 1 y definidos a continuación:

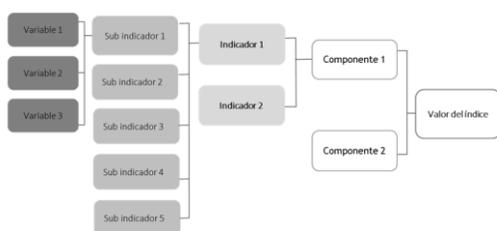


Figura 1. Estructura del índice de sostenibilidad ambiental

Componentes: son aspectos generales en los que se quiere centrar el índice, es decir, las temáticas a evaluar dentro de la investigación. El número de componentes depende de la extensión o profundidad que se le quiere dar al fenómeno estudiado.

Indicadores: son los enfoques específicos o subtemas en los que se quiere centrar el estudio en cada uno de los componentes a trabajar.

Subindicadores: direccionan la investigación hacia lo que se desea estimar o comparar dentro de cada indicador.

Variables de medida: son las alternativas que dan respuesta al subindicador evaluado y las que permiten obtener o estimar el valor del mismo para una posterior ponderación. Estas variables deben ser normalizadas previamente a través de un método de escala categórica ordinal que permite comensurarlas o unificarlas con las mismas unidades de medida.

2.2. Selección de componentes e indicadores del índice

Se seleccionaron indicadores que permiten evaluar de forma cualitativa y cuantitativa el manejo del **recurso hídrico** (conservación de fuentes hídricas, manejo del agua para riego, disposición de los residuos sólidos) y **el suelo** (prácticas de conservación en la finca, tipo de cultivo, control de plagas, mecanización y compactación en el suelo) al considerarse los elementos fundamentales para la producción agrícola.

2.3. Obtención de los valores de las variables

Los valores de las variables fueron determinados con el método de escala categórica ordinal que establece relaciones de orden entre las categorías y permite establecer relaciones de tipo mayor, menor, igual o preferencia entre los individuos⁽⁹⁾. En este caso se asignaron categorías en una escala de 1 a 5, siendo 5 el valor que mejor califica y el 1 el de menor calificación (Tabla 1)⁽¹⁰⁾.

Tabla 1. Valores de calificación para las variables.

| Valor | Clasificación |
|-------|---------------|
| 1 | Muy mala |
| 2 | Mala |
| 3 | Regular |
| 4 | Buena |
| 5 | Muy buena |

2.4. Asignación de pesos

Los pesos permiten asignar diferentes ponderaciones para la obtención del valor final del índice y puede realizarse por métodos basados en la estadística y/o en la participación ⁽¹⁰⁾ y ⁽¹¹⁾. Estos fueron asignados a los subindicadores con un método basado en la participación, a través de la metodología estadística del análisis multicriterio conocido como el Proceso de Analisis Jerárquico (AHP), que normaliza analíticamente el criterio con el cual se lanzan juicios de valor respecto a la importancia de dos o más criterios y de esta manera asignar las ponderaciones correspondientes. El método cuantifica juicios u opiniones de valor sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios en conflicto empleados en el proceso de toma de decisión ⁽¹²⁾.

Este método propone la asignación de valores del 1 al 9, sin embargo, se consideró realizar la calificación de 1 a 5 (Tabla 2) para disminuir la probabilidad de error en la comparación y optimizar el proceso de calificación, el número de comparaciones a realizar se encuentra dado por la Ecuación 1.

$$N_{comparaciones} = \frac{n \times n - n}{2} \quad (1)$$

n = numero de subindicadores a comparar

Tabla 2. Escala de comparación para la determinación de prioridades

| Calificación numérica | Escala de preferencia |
|-----------------------|-----------------------|
| 1 | Igual |
| 2 | Igual – moderada |
| 3 | Moderada |
| 4 | Moderada – fuerte |
| 5 | Fuerte |

Adaptado de ⁽¹³⁾.

La matriz multicriterio fue desarrollada por un panel de 7 expertos que han trabajado con sistemas productivos agrícolas, sostenibilidad y adaptación al CC. Finalmente, se promediaron los valores obtenidos del panel de expertos y se obtuvieron los pesos de cada subindicador.

2.5. Agregación

La agregación del índice de sostenibilidad ambiental se realizó por etapas partiendo de los ítems más detallados (variables de medida) hasta los más generales (componentes) tal y como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Agregación del índice.

| Etapas N° | Ecuación |
|-----------|---|
| 1 | $V_{sub} = (Vv) * (Po) \quad (2)$ |
| 2 | $V_{ind} = (V_{sub1} + V_{sub2} + V_{sub3} + \dots + V_{subn}) \quad (3)$ |
| 3 | $V_{comp} = (V_{ind1} + V_{ind2}) \quad (4)$ |
| 4 | $V_{Indice} = V_{comp1} + V_{comp2} \quad (5)$ |

Dónde:

V_{sub} = Valor del _{indicador}

$V.v$ = valor de la variable estimada en campo

Po = Pesos dados por el panel de expertos

V_{ind} = Valor Indicador

V_{comp} = Valor del componente

2.5. Umbrales de sostenibilidad para el índice

Los umbrales que determinan el grado de sostenibilidad ambiental de cada parcela productiva se estimaron mediante la clasificación estadística de intervalos iguales, que consiste en calcular la amplitud de cada una de las clases mediante la Ecuación 6. En el índice realizado se tomaron 3 clases que permitieron categorizar la sostenibilidad ambiental como alta, media y baja.

$$amplitud\ de\ clase = \frac{Valor\ maximo - Valor\ minimo}{numero\ de\ clases} \quad (6)$$

El valor máximo y mínimo requerido para dicho cálculo se determina mediante la ponderación de valor que puede llegar a tomar cada subindicador (1 y 5 respectivamente) con sus correspondientes pesos.

2.6. Análisis de robustez

Se realizó mediante la simulación de Monte Carlo que permite identificar y valorar el riesgo en la toma de decisiones, método que calcula numerosos contextos o escenarios de un modelo, al escoger repetidamente valores de una distribución de probabilidad para elaborar un pronóstico y analizar el riesgo ⁽¹⁴⁾. Tiene como objetivo examinar la sensibilidad de cada uno de las posibles variables (obtenidas en campo) y conducir a un error en la salida, en aras de conocer los subindicadores con mayor y menor dominio en el resultado ante la modificación de variables (1 a 5) por n combinaciones aleatorias.

La simulación muestra gráficamente el impacto de cada subindicador sobre el resultado final; además, proporciona información estadística con la probabilidad de ocurrencia de diferentes valores, entre mayor sea el número de pruebas mayor confiabilidad tendrá el análisis.

2.7. Estimación del índice de sostenibilidad ambiental

La estimación de los subindicadores cualitativos se realizó con un instrumento tipo encuesta orientado a la identificación de prácticas de manejo y del estado actual del recurso hídrico y del suelo aplicado en cada una de las parcelas productivas.

La calificación de los indicadores cuantitativos (Compactación y transporte de agua en el suelo – capacidad nutritiva del suelo) se realizó a partir de la determinación de propiedades del suelo, tales como: densidad aparente, porosidad, conductividad hidráulica, materia orgánica, Capacidad de intercambio Catiónico y pH.

3. Resultados

3.1. Componentes e indicadores seleccionados

El índice de sostenibilidad ambiental se integra por dos componentes, **suelo y recurso hídrico**, conformados por dos indicadores cada uno, seleccionados como los componentes o aspectos en los que se centra el índice al considerarse las prácticas de manejo y el estado de estos componentes como los de mayor influencia dentro de la dimensión ambiental de la sostenibilidad, ya que son recursos fuertemente degradados debido a la implementación del modelo agroindustrial y con influencia directa en la calidad y cantidad de la producción agrícola en las fincas campesinas, organizados de la siguiente manera:

- ✓ **Componente Suelo:** posee dos indicadores que determinan el estado actual del suelo y las prácticas de manejo realizadas en la unidad productiva a evaluar y cada uno de 5 subindicadores.
- ✓ **Prácticas de manejo del suelo:** la caracterización de las prácticas de manejo del suelo permiten conocer el impacto positivo o negativo generado por la acción humana dentro del agroecosistema. Para el presente índice de sostenibilidad se recopiló las prácticas o formas de manejo en el cultivo (variables de medida) por ser más relevantes o de mayor influencia a la hora de evaluar el estado del suelo. Todas las variables de calificación de este indicador son de tipo cualitativo, su composición y calificación se puede apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición indicador prácticas de manejo.

| Subindicador | Variable | Calificación |
|--------------------|---------------------------------|--------------|
| Sistema de cultivo | Asociación de Cultivos –huertas | 5 |
| | Policultivo – huerta | 4 |
| | Monocultivo | 1 |

| | | |
|----------------------------|--|---|
| | Siembra en sitio | 5 |
| Tipo de siembra | Surcos en sentido de las curvas de nivel | 4 |
| | Surcos en sentido de la pendiente | 1 |
| Tipo de labranza | Cero | 5 |
| | Manual | 4 |
| | Tracción- animal | 2 |
| tipo de insumos utilizados | Maquinaria | 1 |
| | Orgánico | 5 |
| | Combinación química y orgánica | 3 |
| Manejo de residuos | Química | 1 |
| | Reutilización | 1 |
| | Ubicación canecas específicas | 3 |
| | Incinerar | 1 |
| | Enterrar | 1 |

- **Sistema de cultivo:** hace referencia a la modalidad que el agricultor elige para obtener la máxima productividad en su cultivo ⁽¹⁵⁾. Este es de gran influencia en el suelo y en el equilibrio de nutrientes.
- **Tipo de siembra:** es la forma en que los cultivos son organizados en el terreno e influyen en el suelo y en la sostenibilidad ya que la implementación de una siembra inadecuada puede ocasionar deslizamientos, pérdida de nutrientes o contaminación de las fuentes hídricas a causa de la lixiviación de agroquímicos desencadenando múltiples problemas ambientales.
- **Tipo de labranza:** es la forma en la que se adecua el terreno para la siembra en campo. Estos métodos pueden influir entre otras cosas en el grado de compactación del suelo y por ende en la movilidad del agua en su interior.
- **Tipo de insumos utilizados:** hace referencia al tipo de sustancias que se le adicionan al suelo para aumentar su productividad.
- **Manejo de residuos:** Es el tratamiento que se le da a cada uno de los residuos provenientes de actividades agrícolas y su manejo puede influir positiva o negativamente en el manejo del mismo.

✓ **Estado actual del suelo:** éste componente evalúa el estado en el que se encuentra el suelo a fin de identificar los aspectos críticos y potencialidades del sistema evaluado e inferir sobre las posibles causas de las afectaciones encontradas. Este indicador se encuentra conformado por 5 subindicadores en total (Tabla 5) de los cuales 2 son calificados mediante variables de tipo cuantitativo (compactación y transporte de agua en el suelo, capacidad nutritiva del suelo).

Tabla 5. Composición indicador estado actual del suelo.

| Subindicador | Variable | Calificación |
|-----------------------------------|---------------|--------------|
| Cobertura | Mayor del 80% | 5 |
| | Menor de 80% | 3 |
| | Sin cobertura | 1 |
| Erosión | Severa | 1 |
| | Media | 3 |
| Actividad biológica | Sin erosión | 5 |
| | Alta | 5 |
| | Media | 3 |
| Compactación y transporte de agua | Baja | 1 |
| | Excelente | 5 |
| | Buena | 4 |
| | Regular | 3 |
| Capacidad nutritiva del suelo | Mala | 2 |
| | Muy mala | 1 |
| | Muy Buena | 5 |
| | Buena | 4 |
| | Aceptable | 3 |
| | Mala | 2 |
| | Muy mala | 1 |

- **Cobertura:** es el aspecto morfológico del suelo que comprende el recubrimiento de origen natural de la superficie terrestre ⁽¹⁶⁾. Esta variable permite inferir sobre la productividad y la aptitud del mismo y determinar el óptimo estado del suelo en relación con el contenido de materia orgánica, actividad biológica, retención de humedad y estructura.

- **Erosión:** Evalúa el grado de deterioro que presenta el suelo, para generar mecanismos de recuperación en caso de ser necesario.
- **Actividad biológica:** es el proceso mediante el cual los organismos del suelo usan los residuos de las plantas y los derivados de la materia orgánica como alimentos, a medida que se descomponen dichos residuos se liberan los nutrientes del suelo de forma que puedan ser usados por las plantas ⁽¹⁷⁾.
- **Compactación del suelo y transporte de agua en el suelo:** es la pérdida de volumen que sufre una masa de suelo, debido a la acción de fuerzas externas que actúan sobre él, en el uso agrícola intensivo, este fenómeno puede acelerarse y generar problemas severos para el desarrollo de las plantas debido a los implementos de labranza y al recorrido de animales afectando principalmente el tamaño de los poros en particular a los ocupados por aire y agua útil ⁽¹⁸⁾. El estudio de este subindicador es de gran importancia a la hora de evaluar la productividad del suelo y generar acciones de mejora que permitan mantenerlo en óptimas condiciones. Cada una de las propiedades de suelo que intervienen en la evaluación de este subindicador presenta su propia escala de calificación, se normalizó a la escala categórica del índice de sostenibilidad, presentado en la Tabla 6.

Tabla 6. Normalización de valores a la escala del índice

| Propiedad | Calificación | Variable | Calificación |
|-----------------------|--------------|-----------|--------------|
| Porosidad (%) | 55 -70 | Excelente | 5 |
| | 50 -55 | Buena | 4 |
| | < 40 o >70 | mala | 1 |
| Densidad aparente del | 1 – 1,8 | Excelente | 5 |
| | < 1 o >1,9 | Mala | 1 |

| suelo (g/cm^3) | | | |
|--------------------|----------|-----------|---|
| conductividad | > 4,5 | Excelente | 5 |
| ad | 3- 4,5 | buena | 4 |
| hidráulica | 0,5 -1,5 | regular | 2 |
| | < 0,5 | mala | 1 |

- **Capacidad nutritiva del suelo:** estima el estado del suelo para el desarrollo óptimo de los cultivos, conocer la disponibilidad de nutrientes y establecer recomendaciones (prácticas, abonos y/o enmiendas). Este se calificó por el contenido de materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en conjunto (Tabla 7).

Tabla 7. Normalización de valores a la escala del índice

| Propiedad | Calificación | Variable | Calificación |
|-----------------------------|----------------|-----------|--------------|
| Materia orgánica (%) | >3 | Muy Bueno | 5 |
| | 2 - 3 | Aceptable | 3 |
| | < 2 | Muy Malo | 1 |
| CIC (m- eq/100 g de suelo) | > 20 | Muy Bueno | 5 |
| | 10 -20 | Aceptable | 3 |
| | < 10 | Muy Malo | 1 |
| pH | 6,5 - 7 | Muy Bueno | 5 |
| | 6 – 6,5 o 7- 8 | Aceptable | 3 |
| | 5 -6 y 8 -9 | Malo | 2 |
| | < 5 o > 9 | Muy malo | 1 |

- ✓ **Componente Recurso hídrico:** se encuentra conformado por 2 indicadores que evalúan las formas de riego y el estado del recurso hídrico. Este componente constan de 5 subindicadores en total, todos de tipo cualitativo.
- ✓ **Manejo del riego:** este indicador busca conocer la forma en la que se capta, suministra y maneja el agua en las diferentes actividades agrícolas en aras de identificar el impacto que se genera en el estado del recurso hídrico. Los subindicadores y las variables de calificación del mismo se encuentran dadas en la Tabla 8.

Tabla 8. Composición el indicador manejo del riego

| Subindicador | Variable | Calificación |
|------------------------------|----------------|--------------|
| Fuente | Naturales | 3 |
| | Acueductos | 1 |
| | Lluvia | 5 |
| Métodos de captación de agua | Almacenamiento | 5 |
| | Conducción | 4 |
| Forma de riego | Lluvia | 5 |
| | Goteo | 5 |
| | Manual | 2 |
| | Aspersión | 1 |

- ✓ **Estado del recurso hídrico:** busca conocer el estado en el que se encuentran las fuentes hídricas mediante 2 subindicadores y 5 variables consideradas pertinentes para identificar la influencia generada desde las parcelas productivas hacia las fuentes hídricas Tabla 9.

Tabla 9. Composición del estado del recurso hídrico.

| Subindicador | Variable | Calificación |
|---|---|--------------|
| Cobertura | Con vegetación | 5 |
| | Sin vegetación | 1 |
| Generación de contaminantes desde el predio hacia el afluente | No se generan residuos sólidos y líquidos | 5 |
| | Se generan residuos sólidos y líquidos | 3 |
| | Se generan muchos residuos sólidos y líquidos | 1 |

3.2. Obtención de pesos para los subindicadores

Para el análisis multicriterio y la comparación de cada uno los subindicadores se elaboraron tres matrices, dos de ellas pertenecen al componente suelo (una para cada subindicador) y una al componente recurso hídrico conformado por los dos subindicadores en conjunto. Estas matrices

fueron proporcionadas a los expertos mediante una hoja de cálculo, posterior a la asignación de valores se procedió a determinar dos parámetros fundamentales, el **valor propio** para conocer la consistencia de la matriz (CR) (Si $CR < 10\%$ la matriz es consistente) y el **vector propio de la matriz** que mediante su respectiva normalización (división de cada valor sobre la suma de todos los elementos del vector) origina los pesos para cada criterio comparado (pesos de los subindicadores).

Finalmente, todos los valores obtenidos por cada experto se promediaron para conocer la asignación de pesos registrados en la Tabla 10. El subindicador con menor peso fue método de captación de agua para riego y los de mayor calificación fueron sistema de cultivo implementado, erosión y cobertura generadora de agua.

Tabla 10. Pesos obtenidos para el índice de sostenibilidad del recurso hídrico y el suelo.

| Indicador | Subindicador | Pesos |
|-------------------------------|---|-------|
| Prácticas de manejo del suelo | Sistema de cultivo implementado | 0,27 |
| | Tipo de siembra implementado | 0,23 |
| | Tipo de labranza | 0,16 |
| | Tipos de insumos utilizados | 0,17 |
| Estado del suelo | Manejo de residuos | 0,16 |
| | Cobertura | 0,23 |
| | Erosión | 0,27 |
| | Actividad biológica | 0,16 |
| Manejo del riego | Compactación y transporte de agua | 0,16 |
| | Capacidad nutritiva del suelo | 0,18 |
| | Fuente | 0,20 |
| | Métodos de captación de agua | 0,13 |
| Estado del recurso hídrico | Forma de riego | 0,21 |
| | Cobertura generadora de nacimientos de agua | 0,27 |
| | Generación de contaminantes | 0,18 |
| | | |

3.3. Umbrales de sostenibilidad ambiental

El valor mínimo obtenido es 2,98 y 14,9 es el valor máximo que puede llegar a alcanzar el índice de sostenibilidad ambiental y la amplitud es de 3,97. Los umbrales se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Umbrales de sostenibilidad para el índice de sostenibilidad del Recurso Hidrico y el suelo

| Nivel de sostenibilidad | Intervalo |
|-------------------------|--------------|
| Alta | 10,93 - 14,9 |
| Media | 6,96 -10,93 |
| Baja | 2,98 -6,96 |

3.4. Análisis de Robustez

Para analizar la sensibilidad de cada una de las variables en el valor final del índice se empleó una distribución estadística de Poisson, adecuada para la representación de datos discretos al describir el número de veces que un evento ocurre en un intervalo determinado (en este caso 1 a 5); se realizaron 10.000 ensayos con valores aleatorios para la modelación de los diferentes escenarios y para la realización de la gráfica de sensibilidad la cual muestra las perturbaciones dinámicas creadas después de una simulación, es decir, los múltiples supuestos son impactados simultáneamente y las interacciones son capturadas con las fluctuaciones de los resultados. En este sentido se identificó que el indicador con mayor influencia en el resultado final es la cobertura generadora de nacimientos de agua al presentar una variación del 13,98% sobre el valor del índice final, seguido por la erosión con 11,18%; asimismo se observó que el subindicador con menor afectación sobre el resultado es, métodos de captación de agua para riego con 2,69% de variación sobre el valor del índice (Figura 2).

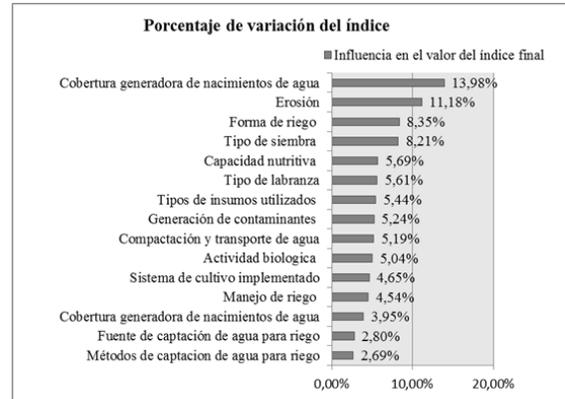


Figura 2. Análisis de sensibilidad

3.5. Estimación del índice de sostenibilidad ambiental en parcelas productivas de la microcuenca La Centella

El índice se aplicó a seis parcelas productivas de la microcuenca La Centella en el municipio de Dagua (Figura 3), partiendo de dos criterios: distribución espacial (parte alta, media y baja de la microcuenca) y agricultura como principal fuente de ingreso para el sustento familiar. La microcuenca presenta alturas que van desde los 1.050 msnm hasta los 1.700 msnm, con precipitaciones medias de 1.210 mm/año, la extensión total de la microcuenca es de 1.814,1 hectáreas (ha), la red de drenaje de la microcuenca está conformada por las quebradas La Virgen, Centella y Aguas Calientes, la principal actividad económica es la agricultura a pequeña escala, seguida de la ganadería ⁽¹⁹⁾.

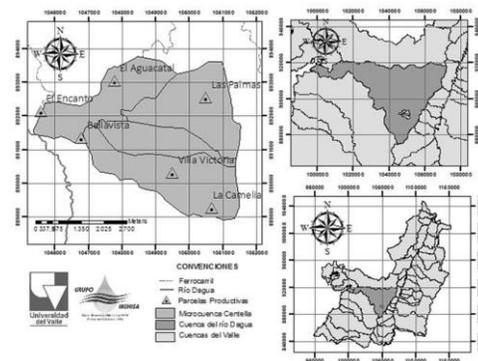


Figura 3. Ubicación geográfica de las parcelas productivas evaluada.

Los resultados obtenidos en cada finca (Figura 2) indican que el estado del recurso hídrico es impactado negativamente por las fincas El Encanto, Villa Victoria, Las Palmas y Bellavista, las tres primeras mostrando diferencias de más del 60% y la última del 48% sobre el valor esperado para este indicador. Estos valores se derivan principalmente del inadecuado manejo de los residuos sólidos y líquidos que afectan la calidad del agua, al igual que la falta de cobertura generadora de agua; situación que a largo plazo conlleva a una disminución en el recurso hídrico. En lo referente al manejo del riego se encuentran valores mínimos en las fincas La Camelia y El Aguacatal con desviaciones de 43% y 38% (*respectivamente*) del valor teórico esperado.

Estas desviaciones ocurren debido al bajo valor que presenta el subindicador forma de riego al realizarse de manera manual y que evidencia poca eficiencia al uso racional del agua. En este indicador se resalta la implementación de un sistema de riego por goteo en la finca Bellavista quien presenta una acertada calificación en el mismo, al igual que las otras fincas que, aunque no alcanzan a obtener el valor ideal poseen una buena valoración frente a este aspecto.

En el estado del suelo se distingue mayor afectación en la finca El Encanto y El Aguacatal que en común presentan problemas de erosión generando diferencias sobre el valor esperado en un 47,2 % la primera y en un 31,6% la segunda; además, Las Palmas y Villa Victoria presentan buen grado de calificación en donde se destacan aspectos del manejo de coberturas y la actividad biológica y como aspecto negativo se tiene la mediana erosión de ambas. Finalmente, de Bellavista y la Camelia se puede decir que frente a este indicador su dificultad radica en la capacidad nutritiva del suelo, siendo necesario la aplicación de enmiendas. La parcela productiva con mejores prácticas de manejo del suelo es Villa Victoria; El Aguacatal y Bellavista

presentan exactamente las mismas condiciones alejándose en un 37% de lo requerido y manifestando dificultades debido a la aplicación de insumos de origen químico y al mal manejo de los residuos producidos. También se observa que El Encanto es la finca con menor calificación en este indicador y sus aspectos a mejorar tienen relación con el tipo labranza.

De acuerdo a lo descrito anteriormente de manera general se puede decir que los aspectos a mejorar con mayor prioridad tienen que ver con las coberturas protectoras de agua, la forma de riego, la tendencia a la erosión y el manejo de los residuos generados.

El índice presenta sostenibilidad media (50% de las fincas) y alta (50% de las fincas), como se puede observar en la Figura 4. Las fincas con un nivel de sostenibilidad alta son; Villa Victoria, La Camelia y Bellavista presentando valores de 11,45, 11,37 y 10,95 respectivamente. Por otro lado, las fincas Las Palmas, El aguacatal y El Encanto presentan una sostenibilidad media con valores de 10,31, 10,29 y 7,25. Si bien algunas fincas presentan una clasificación alta dentro de la escala de la sostenibilidad, se puede apreciar que existen grandes desviaciones respecto al valor ideal ^(14,9) por lo que se identifican varios aspectos a mejorar.

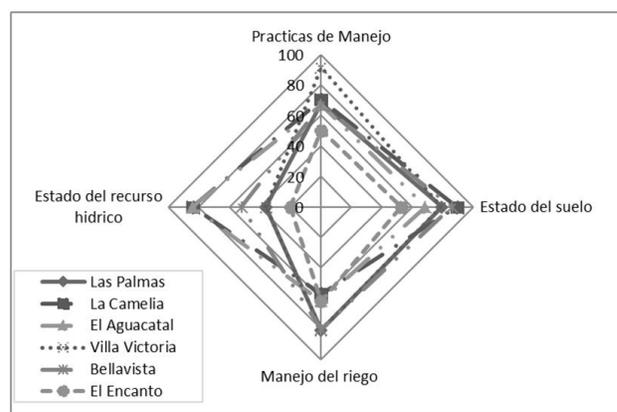


Figura 4. Valores obtenidos por indicador para las parcelas productivas evaluadas.

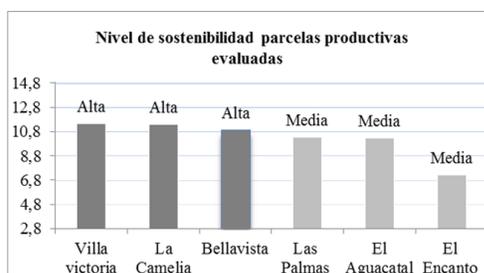


Figura 5. Jerarquización de las parcelas productivas de acuerdo a su nivel de Sostenibilidad.

4. Conclusiones

Los subindicadores e indicadores que evalúan cada componente se encuentran encaminados a conocer las prácticas de manejo mediante 13 subindicadores cualitativos que recogen las variables que intervienen en los procesos de producción y en el estado de los recursos y 2 subindicadores cuantitativos dentro del componente suelo que se encuentran integrados cada uno por las propiedades físicas y químicas consideradas pertinentes para el análisis de su fertilidad, almacenamiento y drenaje de agua.

El 50% de las parcelas productivas estudiadas presentaron sostenibilidad alta, identificando potencialidades en el estado del suelo, donde se destacan aspectos como el manejo de coberturas, la adecuada capacidad nutritiva, la no presencia de erosión y unas condiciones adecuadas de aireación y movilidad del agua en el interior del suelo para el óptimo desarrollo de las plantas. El otro 50% de las fincas evaluadas revelan una sostenibilidad media, evidenciando falencias en torno al recurso hídrico y a las prácticas de manejo del suelo; respecto a la primera se puede decir que es el aspecto de mayor impacto al observarse con frecuencia la emisión de agentes contaminantes a las fuentes hídricas, así como una forma de riego inadecuada que a largo plazo constituye un riesgo para el desarrollo de la comunidad; en cuanto a la segunda las afectaciones más marcadas se relacionan con la

falta de coberturas en el suelo, problemas de erosión y el mal manejo de los residuos sólidos.

La aplicación del índice en las seis parcelas productivas muestra una aproximación al contexto de la microcuenca, partiendo de su similitud con las otras fincas que componen el sector en cuanto a cultivos predominantes, prácticas de manejo y problemáticas ambientales; así como los aspectos críticos por trabajar. En este sentido el índice puede ser aplicado en fincas campesinas que presenten características similares (topografía, modos de producción y condiciones climáticas) a las de esta investigación.

5. Referencias

- (1) Macedo B. El concepto de sostenibilidad [Internet]. 2005. Available from: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000162177>.
- (2) Organización de Estados Iberoamericanos OEI. Sostenibilidad [Internet]. Programa de Acción global. 2014 [Consulted 2018/05/22]. Available from: <https://www.oei.es/historico/decada/accion.php?accion=1>.
- (3) Troyer W. Preserving Our World: A Consumer's Guide to the Brundtland Report [Internet]. Ontario, Canada: Warglen International Communications, Inc; 1990. 131 p. Available from: <http://nrt-trn.ca/preserving-our-world>.
- (4) National Academies of Sciences Engineering and Medicine. Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change [Internet]. Washington, DC: The National Academies Press; 2016. Doi: 10.17226/21852. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/21852/attribution-of-extreme-weather-events-in-the-context-of-climate-change>.

- (5) Sarandón SJ, Flores CC. Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: Una propuesta metodológica. *Agroecología* [Internet]. 2009;4:19–28. Available from: <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/117131>.
- (6) Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial. *Climasig* [Internet]. [Consulted 2018/05/15]. Available from: <http://www.climasig.es/metod1.html>
- (7) Altieri MÁ, Nicholls CI. Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. *Agroecología* [Internet]. 2012;7(2):65–83. Available from: <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182861>.
- (8) IPCC. Cambio climático y biodiversidad. Documento V del IPCC [Internet]. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; 2002. 93 p. Available from: <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>.
- (9) Fernandez S. Tablas de contingencia. In: *Análisis de variables categoricas* [Internet]. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de ciencias económicas y empresariales; 2011. p. 58. Available from: <http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/CUALITATIVAS/CONTINGENCIA/tablas-contingencia.pdf>.
- (10) Juwana I, Muttill N, Perera B. Indicator-based water sustainability assessment — A review. *Sci Total Environ* [Internet]. 2012;438:357–71. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.093. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/art>
- <icle/pii/S0048969712011874?via%3Dihub>
- (11) OECD, Commission EU and JRC-E. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide* [Internet]. OECD; 2008. 162 p. Available from: https://www.oecd-ilibrary.org/economics/handbook-on-constructing-composite-indicators-methodology-and-user-guide_9789264043466-en.
- (12) Roche H, Vejo C. *Métodos Cuantitativos Aplicados a la Administración: Análisis Multicriterio en la Toma de Decisiones*. [Internet]. Montevideo: Universidad de la Republica, Facultad de Ciencias Económicas y de Administración; 2005. p23. Available from: https://feparunsa.files.wordpress.com/2012/07/amc_aplicado_administracion.pdf.
- (13) Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int J Serv Sci* [Internet]. 2008;1(1):83–98. Doi: 10.1504/IJSSCI.2008.017590. Available from: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=17655>.
- (14) Recursos en project Management. *Método de Montecarlo en proyectos* [Internet]. Available from: <https://www.recursoenprojectmanagement.com/metodo-de-montecarlo/>
- (15) Cotler H, Fregosos DA. *Sistemas de producción agropecuaria*. In: *Atlas de la cuenca Lerma-Chapala Construyendo una visión conjunta* [Internet]. Primera Ed. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología; 2006. p. 198. Available from: <http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/163?show=full>.
- (16) CVC. *Corporación Autónoma Regional*

del Valle del Cauca. Guía explicativa de la temática de cobertura y uso del suelo [Internet] 2012, 5 p. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/285665346/Guia-Explicativa-de-La-Tematica-de-Cobertura-y-Uso-Del-Suelo>.

- (17) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible. Materia orgánica y actividad biológica [Internet] 2006: 1-28p. Disponible en: [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-104576/1.%20Materia%20org%C3%A1nica](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-104576/1.%20Materia%20org%C3%A1nica%20y%20actividad%20biol%C3%B3gica.pdf)

[ca%20y%20actividad%20biol%C3%B3gica.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-104576/1.%20Materia%20org%C3%A1nica%20y%20actividad%20biol%C3%B3gica.pdf)

- (18) Pioneer Argentina SRL. Boletín Técnico Pioneer - Compactación del suelo [Internet]. 2001; 1-4p. Available from: https://www.pioneer.com/CMRoot/International/Argentina/productos_y_servicios/Boletin_Compactacion_de_suelo.pdf.
- (19) Alcaldía Municipal de Dagua. Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) 2001 - 2010 [Internet]. Dagua; 2001. Disponible en: <http://daguavalledelcauca.micolombiadigital.gov.co/planes/plan-basico-de-ordenamiento-territorial>.



Revista Ingeniería y Competitividad por Universidad del Valle se encuentra bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - Debe reconocer adecuadamente la autoría, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de una manera que sugiera que tiene el apoyo del licenciador o lo recibe por el uso que hace.