

EVALUACIÓN DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA Y EL SECUESTRO DE CARBONO BASADO EN MAPAS COGNITIVOS DIFUSOS

Walter Rubén Torres Tene¹, Crithian Andrés Encalada Sanmartín, Osman Aviv Escala Jordan, Rodrigo Andrés Valarezo Quinaluisa, Stephanie Catalina Beltrán Vera, Segress García Hevia.
Universidad de Guayaquil, Ecuador.

ABSTRACT

Regenerative agriculture represents a promising avenue to address some of the most pressing challenges facing humanity in the 21st century, from soil degradation and biodiversity loss to climate change and food insecurity. By focusing on the restoration and enhancement of agricultural ecosystems, regenerative agriculture not only promotes the sustainability and resilience of agricultural production, but also offers a viable solution for carbon sequestration and climate change mitigation. The promotion and adoption of regenerative practices, backed by research and policy support, can transform agriculture into a positive force for the environment and society. The purpose of this research is to evaluate the use of regenerative agriculture practices in carbon sequestration and soil health, and determine their potential to contribute to climate change mitigation and agricultural sustainability. To carry out this evaluation we apply the Fuzzy Cognitive Maps model that allows the representation of knowledge and making forecasts. To achieve this, we use the evaluation of 27 experts. The inclusion of fuzzy mathematics within the model allows the uncertainty of decision making to be taken into account.

KEYWORDS: Regenerative agriculture, carbon sequestration, decision making, Fuzzy Cognitive Map.

MSC: 03B42, 05C72, 68T30, 94C15, 97M99

RESUMEN

La agricultura regenerativa representa una vía prometedora para abordar algunos de los desafíos más apremiantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, desde la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad hasta el cambio climático y la inseguridad alimentaria. Al centrarse en la restauración y mejora de los ecosistemas agrícolas, la agricultura regenerativa no solo promueve la sostenibilidad y resiliencia de la producción agrícola, sino que también ofrece una solución viable para el secuestro de carbono y la mitigación del cambio climático. La promoción y adopción de prácticas regenerativas, respaldadas por la investigación y el apoyo político, pueden transformar la agricultura en una fuerza positiva para el medio ambiente y la sociedad. El objetivo de esta investigación es evaluar el uso de las prácticas de agricultura regenerativa en el secuestro de carbono y la salud del suelo, y determinar su potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático y la sostenibilidad agrícola. Para realizar esta evaluación aplicamos el modelo de Mapas Cognitivos Difusos que permite la representación del conocimiento y realizar pronósticos. Para lograrlo utilizamos la evaluación de 27 expertos. La inclusión de la matemática difusa dentro del modelo permite tener en cuenta la incertidumbre de la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVES: Agricultura regenerativa, secuestro de carbono, toma de decisiones, Mapa Cognitivo Difuso.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura, una de las actividades más antiguas y fundamentales de la humanidad, ha experimentado una transformación significativa a lo largo de los siglos. Sin embargo, el modelo predominante de agricultura industrial intensiva, que se ha expandido desde la Revolución Verde en la década de 1960, ha generado preocupaciones crecientes debido a sus efectos adversos en el medio ambiente. La degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y la emisión de gases de efecto invernadero son algunos de los problemas críticos asociados con las prácticas agrícolas convencionales. En este contexto, la agricultura regenerativa surge como un enfoque innovador y holístico que busca restaurar la salud del suelo y los ecosistemas, mientras contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático mediante el secuestro de carbono.

La agricultura regenerativa es un sistema de principios y prácticas agrícolas que tiene como objetivo rehabilitar y mejorar la salud y la biodiversidad del suelo, incrementar la resiliencia de los ecosistemas agrícolas y promover la equidad social. A diferencia de la agricultura convencional, que a menudo se centra en la maximización de rendimientos a corto plazo mediante el uso intensivo de insumos químicos y maquinaria pesada, la agricultura regenerativa pone un énfasis especial en la salud a largo plazo del suelo y los sistemas ecológicos.

Entre las prácticas clave de la agricultura regenerativa se incluyen la rotación de cultivos, la agricultura de conservación, la integración de cultivos perennes y la agroforestería, el uso de compost y biochar, y la gestión holística

Email: walter.torrest@ug.edu.ec

del pastoreo. Estas prácticas no solo ayudan a aumentar la fertilidad del suelo y la biodiversidad, sino que también tienen el potencial de capturar y almacenar carbono atmosférico en el suelo y la biomasa vegetal, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático.

El suelo es uno de los mayores sumideros de carbono del planeta, almacenando más carbono que la atmósfera y la vegetación combinadas [1][2][4]. El carbono en el suelo se encuentra principalmente en forma de materia orgánica, que incluye restos de plantas y animales en diversos estados de descomposición, así como compuestos orgánicos complejos producidos por microorganismos del suelo. La capacidad del suelo para secuestrar carbono depende de varios factores, como su textura, estructura, contenido de arcilla, y la actividad biológica.

Las prácticas de agricultura regenerativa pueden aumentar significativamente el contenido de materia orgánica en el suelo, mejorando así su capacidad de almacenamiento de carbono. Por ejemplo, la incorporación de cultivos de cobertura y la reducción del laboreo minimizan la perturbación del suelo y la pérdida de carbono, mientras que la adición de compost y biochar puede aumentar el contenido de carbono orgánico estable en el suelo. Además, la integración de árboles y arbustos en sistemas agroforestales no solo se traduce en un secuestro de carbono adicional en la biomasa leñosa, sino que también mejora la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua.

A pesar de sus numerosos beneficios, la adopción de la agricultura regenerativa enfrenta varios desafíos. Uno de los principales obstáculos es la falta de conocimiento y comprensión de estas prácticas entre los agricultores y los responsables de políticas. Además, la transición a prácticas regenerativas puede requerir inversiones iniciales significativas en términos de tiempo, esfuerzo y recursos financieros. Sin embargo, las oportunidades para superar estos desafíos son considerables. La creciente conciencia pública sobre los problemas ambientales y el cambio climático, junto con el apoyo de políticas y programas de incentivos, puede fomentar la adopción de la agricultura regenerativa. Además, la investigación continua y la innovación en técnicas y tecnologías agrícolas pueden facilitar la implementación de prácticas regenerativas de manera más efectiva y eficiente.

El objetivo de este artículo es ofrecer un modelo evaluativo sobre el uso de la agricultura regenerativa. Una de las características de este tipo de agricultura es que el conocimiento es fundamental para su efectividad. Este conocimiento debe estar disponible para todos los elementos que forman parte del sistema, incluyendo los cultivadores. Una de las herramientas que permiten representar de forma simplificada y gráfica el conocimiento es el Mapa Cognitivo [13][15][20][21][22]. Esta técnica consiste en grafos dirigidos cuyos vértices representan conceptos y cuyas aristas representan la conexión que existe entre los conceptos que une. Cada arista tiene asociado un valor real $\{-1, 0, 1\}$ tal que -1 significa que los conceptos tienen una asociación inversa, 0 significa que ambos no tienen relación alguna entre sí y 1 se utiliza para representar una relación directa.

B. Kosko fue quien introdujo los Mapas Cognitivos Difusos, donde los tres valores $\{-1, 0, 1\}$ se sustituyen por valores reales en $[-1, 1]$ para indicar grados de asociación [10]. Además, definió un algoritmo donde se realiza el análisis dinámico del Mapa Cognitivo Difuso, que permite hacer predicciones sobre el comportamiento de las diferentes variables que se miden.

El artículo ofrece un modelo de análisis de la relación entre los conceptos fundamentales que forman parte de la Agricultura Regenerativa con el apoyo de los Mapas Cognitivos Difusos. Se incluyen variables de diferentes tipos, como son ecológicas, económicas, sociales, entre otras.

El presente artículo se divide en una sección de Materiales y Métodos, donde se explican las nociones básicas de la lógica difusa y los Mapas Cognitivos Difusos. La sección siguiente se dedica a exponer el modelo propuesto. La última sección se dedica a dar las conclusiones del trabajo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Lógica Difusa

La Lógica Difusa hereda las características de la lógica booleana y además la generaliza [5][6][8][9][14][17][18]. Mientras que la Lógica Booleana está conformada por un predicado, que es una función p definida sobre un universo X que toma valores en el conjunto $\{0,1\}$. En la Lógica Difusa se tienen valores semánticos en el intervalo $[0,1]$. Específicamente se aplica el Principio de Simultaneidad Gradual tal que un predicado es una función del universo X en el intervalo $[0, 1]$ y las operaciones \wedge, \vee, \neg (de conjunción, disyunción y negación, respectivamente) se definen de tal manera que restringidas al conjunto $\{0, 1\} \times \{0, 1\}$ ($\{0, 1\}$ para \neg) se obtengan las operaciones de la lógica booleana, además de satisfacer los axiomas de Álgebra de Boole. No obstante, el Axioma del Tercero Excluido no se aplica en este caso.

Una de las lógicas difusas se obtiene definiendo las operaciones del siguiente modo:

- $u(p \wedge q) = u(p) \cdot u(q)$,
- $u(p \vee q) = u(p) + u(q) - u(p) \cdot u(q)$,
- $u(\neg p) = 1 - u(p)$.

Donde $u(p)$ es el valor de verdad del predicado p .

Otra lógica difusa se define de una manera diferente como se muestra a continuación:

- $u(p \wedge q) = \min(u(p), u(q))$,
- $u(p \vee q) = \max(u(p), u(q))$,
- $u(\neg p) = 1 - u(p)$.

Los sistemas lógicos difusos antes definidos satisfacen las siguientes propiedades:

$$u(p \wedge q) \leq \min(u(p), u(q)) \quad (1)$$

$$\max(u(p), u(q)) \leq u(p \vee q) \quad (2)$$

Esto se relaciona con las definiciones de t-norma para la conjunción y t-conorma para la disyunción. Otras propiedades de estas se especifican a continuación:

Ambas, $u(p \wedge q)$ y $u(p \vee q)$ no son decrecientes con respecto a cada uno de los argumentos.

En cuanto a la negación, si $u(\neg \neg p) = u(p)$ se dice que es involutiva. También, si $u(q) = 0$, $u(p \wedge q) = 0$ y $u(p \vee q) = u(p)$.

Cuando $u(q) = 1$, se tiene $u(p \wedge q) = u(p)$ y $u(p \vee q) = 1$. $u(p \wedge q)$ y $u(p \vee q)$ son asociativas.

2.2. Mapa Cognitivo Difuso

Definición 1 ([3][10][11][12][16]). Un *Mapa Cognitivo Difuso* (MCD) es una estructura de grafo difuso para representar razonamiento causal. Lo difuso permite representar grados de causalidad borrosa entre objetos causales borrosos.

Específicamente, se trata de nodos que representan conceptos y aristas dirigidas que representan relaciones causales entre los conceptos que unen. Cada arista tiene asociado un peso o valor difuso sobre el grado de causalidad en un intervalo $[-1, 1]$.

Definición 2. ([10]) Un *Mapa Cognitivo Difuso Simple* es un MCD donde los pesos de sus aristas se toman en el conjunto $\{-1, 0, 1\}$.

Si C_1, C_2, \dots, C_k son k vértices, cada uno de los C_j ($i = 1, 2, \dots, k$) se puede representar por un vector (x_1, x_2, \dots, x_k) donde $x_i \in \{0, 1\}$. $x_i = 1$ significa que el vértice C_i está en un estado activado, $x_i = 0$ significa que el vértice C_i está en un estado desactivado, en un tiempo específico o en una situación específica.

Si C_m y C_n son dos vértices del MCD, una arista dirigida de C_m a C_n se llama *conexión* y representa la causalidad de C_m a C_n . Cada vértice en el MCD se asocia a un peso dentro del conjunto $\{-1, 0, 1\}$. Si α_{mn} denota el peso de la arista $C_m C_n$, $\alpha_{mn} \in \{-1, 0, 1\}$ entonces se tiene lo siguiente:

$\alpha_{mn} = 0$ si C_m no ejerce ningún efecto sobre C_n ,

$\alpha_{mn} = 1$ si un incremento (decremento) en C_m produce un incremento (decremento) en C_n ,

$\alpha_{mn} = -1$ si un incremento (decremento) en C_m produce un decremento (incremento) en C_n ,

Definición 3 ([10]). Si C_1, C_2, \dots, C_k son los vértices de un MCD. La *matriz de adyacencia* del MCD se define como $E = (\alpha_{mn})$, donde α_{mn} denota el peso de la arista dirigida $C_m C_n$, donde $\alpha_{mn} \in \{-1, 0, 1\}$.

Definición 4 ([10]). Sean C_1, C_2, \dots, C_k los vértices de un MCD. Sea $A = (a_1, a_2, \dots, a_k)$, donde $a_m \in \{-1, 0, 1\}$. A se llama *vector de estado instantáneo* y significa una posición de estado activado-desactivado del vértice en un instante dado.

$a_m = 0$ si C_m está desactivado (no ejerce ningún efecto),

$a_m = 1$ si C_m está activado (ejerce efecto).

Definición 5 ([10]). Sean C_1, C_2, \dots, C_k los vértices de un MCD. Sean $\overrightarrow{C_1 C_2}, \overrightarrow{C_2 C_3}, \overrightarrow{C_3 C_4}, \dots, \overrightarrow{C_{k-1} C_k}$ las aristas del MCD, entonces las aristas constituyen un *ciclo dirigido*.

El MCD se dice *cíclico* si posee un ciclo dirigido. Se dice *acíclico* si no posee ningún ciclo dirigido.

Definición 6 ([10]). Un MCD que contiene ciclos se dice que tiene *retroalimentación*. Cuando existe retroalimentación en el MCD, se dice que este es un *sistema dinámico*.

Definición 7 ([10]). Sea $\overrightarrow{C_1 C_2}, \overrightarrow{C_2 C_3}, \overrightarrow{C_3 C_4}, \dots, \overrightarrow{C_{k-1} C_k}$ un ciclo. Cuando C_m se activa y su causalidad fluye a través de las aristas del ciclo y luego es causa del propio C_m , entonces el sistema dinámico va circulando. Esto se cumple para cada vértice C_m con $m = 1, 2, \dots, k$. El estado de equilibrio para este sistema dinámico se denomina *patrón escondido*.

Definición 8 ([10]). Si el estado de equilibrio de un sistema dinámico es único, entonces se llama *punto fijo*.

Un ejemplo de punto fijo es cuando se comienza un sistema dinámico activándose por C_1 . Si se supone que el MCD se asienta en C_1 y C_k , o sea el estado permanece como $(1, 0, \dots, 0, 1)$, entonces este vector de estado se llama punto fijo.

Definición 9 ([10]). Si el MCD se establece con un vector de estado que se repite en la forma:

$$A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_m \rightarrow A_1,$$

entonces el equilibrio se llama *ciclo límite* del MCD.

Método para determinar los patrones escondidos

Sean C_1, C_2, \dots, C_k los vértices del MCD con retroalimentación. Asígnese que E es la matriz de adyacencia asociada. Se encuentra un patrón escondido cuando C_1 se activa y se da una entrada en forma de vector $A_1 = (1, 0, 0, \dots, 0)$. Los datos deben pasar a través de la matriz E , lo que se obtiene multiplicando A_1 por la matriz E . Sea $A_1 E = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$ con la operación umbral de reemplazar α_m por 1 si $\alpha_m > p$ y α_m por 0 si $\alpha_m < p$ (p es un entero positivo adecuado).

El concepto resultante se actualiza; el vector C_1 se incluye en el vector actualizado transformando en 1 la primera coordenada del vector resultante.

Si se supone $A_1 E \rightarrow A_2$ entonces se considera $A_2 E$ y se repite el mismo procedimiento. Este procedimiento se repite hasta alcanzar un ciclo límite o un punto fijo.

3. MODELACIÓN DE LA AGRICULTURA REGENERATIVA USANDO MAPAS COGNITIVOS DIFUSOS

Más allá del secuestro de carbono, la agricultura regenerativa ofrece una serie de beneficios ambientales, económicos y sociales. Uno de los beneficios más destacados es la mejora de la salud del suelo. Un suelo sano es más fértil, tiene una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, y es más resistente a la erosión y la degradación. Esto no solo se traduce en rendimientos agrícolas más sostenibles y resilientes, sino que también reduce la necesidad de insumos externos, como fertilizantes y pesticidas, disminuyendo así los costos de producción y el impacto ambiental.

La biodiversidad es otro aspecto crucial de la agricultura regenerativa. Al promover una mayor diversidad de plantas, animales y microorganismos en los sistemas agrícolas, la agricultura regenerativa ayuda a crear ecosistemas más equilibrados y resistentes a plagas y enfermedades. La diversidad biológica también puede mejorar la polinización y el control biológico de plagas, proporcionando servicios ecosistémicos esenciales para la producción agrícola.

Desde una perspectiva socioeconómica, la agricultura regenerativa puede contribuir a la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. Al mejorar la salud del suelo y aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas, los agricultores pueden producir alimentos de manera más sostenible y enfrentar mejor las fluctuaciones climáticas y económicas. Además, las prácticas regenerativas a menudo requieren una mano de obra más intensiva y conocimientos especializados, lo que puede crear oportunidades de empleo y fomentar la transmisión de conocimientos y habilidades tradicionales y locales.

Los conceptos para tener en cuenta son los siguientes:

1. Secuestro de Carbono en el Suelo:

Descripción: Evaluación de la capacidad del suelo para capturar y almacenar carbono a través de prácticas regenerativas.

Indicadores: Niveles de carbono orgánico en el suelo, tasa de acumulación de carbono, estabilidad del carbono secuestrado.

2. Salud y Fertilidad del Suelo:

Descripción: Análisis de los cambios en la estructura, composición y actividad biológica del suelo bajo prácticas regenerativas.

Indicadores: Contenido de materia orgánica, biodiversidad microbiana, capacidad de retención de agua, nivel de nutrientes.

3. Prácticas de Agricultura Regenerativa:

Descripción: Identificación y evaluación de diferentes técnicas y métodos utilizados en la agricultura regenerativa.

Indicadores: Uso de cultivos de cobertura, rotación de cultivos, agricultura de conservación, agroforestería, compostaje.

4. Impacto Ambiental:

Descripción: Estudio de los efectos de la agricultura regenerativa en el medio ambiente, incluyendo la biodiversidad y la calidad del agua.

Indicadores: Reducción de la erosión del suelo, mejora de la biodiversidad, calidad del agua, reducción de la emisión de gases de efecto invernadero.

5. Productividad Agrícola:

Descripción: Análisis de los rendimientos de los cultivos y la estabilidad de la producción bajo prácticas regenerativas.

Indicadores: Rendimiento de los cultivos, variabilidad de la producción, calidad de los productos agrícolas.

6. Sostenibilidad Económica:

Descripción: Evaluación de la viabilidad económica y los beneficios financieros de la implementación de prácticas regenerativas para los agricultores.

Indicadores: Costos de implementación, retorno de inversión, reducción de costos de insumos, ingresos netos.

7. Resiliencia Climática:

Descripción: Análisis de cómo las prácticas regenerativas mejoran la capacidad de los sistemas agrícolas para resistir y adaptarse a las condiciones climáticas extremas.

Indicadores: Resistencia a sequías, inundaciones y temperaturas extremas, capacidad de recuperación post-desastre.

8. Políticas y Marco Regulatorio:

Descripción: Estudio de las políticas, incentivos y marcos regulatorios que apoyan o inhiben la adopción de la agricultura regenerativa.

Indicadores: Subsidios y programas de apoyo, regulaciones ambientales, campañas de educación y concienciación.

Se consultó a un grupo de 27 expertos en economía regenerativa su opinión sobre la relación causal entre los ocho conceptos que se estudian. Cada uno de ellos debió opinar de acuerdo a los términos lingüísticos que aparecen en la Tabla 1:

Valor de verdad	Categoría
0	Absolutamente falso
0.1	Muy falso
0.2	Falso
0.3	Más o menos falso
0.4	Más falso que verdadero
0.5	Tan verdadero como falso
0.6	Más verdadero que falso
0.7	Más o menos verdadero
0.8	Verdadero
0.9	Muy verdadero
1	Absolutamente verdadero

Tabla 1. Tabla de categorías por valores de verdad. Fuente: [5].

Nótese que los términos lingüísticos tienen asociados un valor de verdad numérico cada uno en el intervalo $[0, 1]$. Estos valores de verdad se usan para realizar los cálculos y son los pesos absolutos que se les asocia a cada arista del grafo. Este es el valor de verdad que responde a la pregunta “¿Es el concepto i ésimo causa del concepto j ésimo?”. La respuesta se da en valores de verdad.

Además de ello, se les pidió a los expertos que especificaran si la evaluación de la relación causal es positiva para significar que la relación entre los conceptos es directa, o negativa para significar que esta relación es inversa. De esta manera las evaluaciones se extienden al intervalo $[-1, 1]$.

Dados dos vértices cualesquiera $C_i, C_j, i, j \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, $\omega_{ijl} \in [-1, 1]$ es el peso asociado a esta arista por el experto l ésimo, $l \in \{1, 2, \dots, 27\}$. Entonces, finalmente a la arista $C_i C_j$ se le asocia el valor de la mediana para el conjunto $\{\omega_{ijl}\}_{l \in \{1, 2, \dots, 27\}}$. Denotemos por $\bar{\omega}_{ij}$ estos valores. De acuerdo a $\bar{\omega}_{ij}$ y $\bar{\omega}_{ji}$, los expertos deben decidir si $\bar{\omega}_{ij} \neq 0$ entonces $\bar{\omega}_{ji} = 0$, o viceversa. La Tabla 2 contiene la matriz de adyacencia del Mapa Cognitivo Difuso obtenido de esta manera:

Concepto	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	0	1	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0
C ₂	0	0	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0
C ₃	0	0	0	1	0.8	0.7	0.6	0
C ₄	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₅	0	0	0	0.6	0	0.7	0.6	0
C ₆	0	0	0	0.6	0	0	0.9	0
C ₇	0	0	0	0.6	0	0	0	0
C ₈	0.2	0.3	0	0.7	0.2	0.6	0.7	0

Tabla 2. Matriz de adyacencia del Mapa Cognitivo Difuso obtenido de la opinión de los expertos. Los subíndices de cada concepto se toman según el orden que aparece en la lista anterior.

El Mapa Cognitivo Difuso se representa gráficamente según la Figura 1, que aparece a continuación.

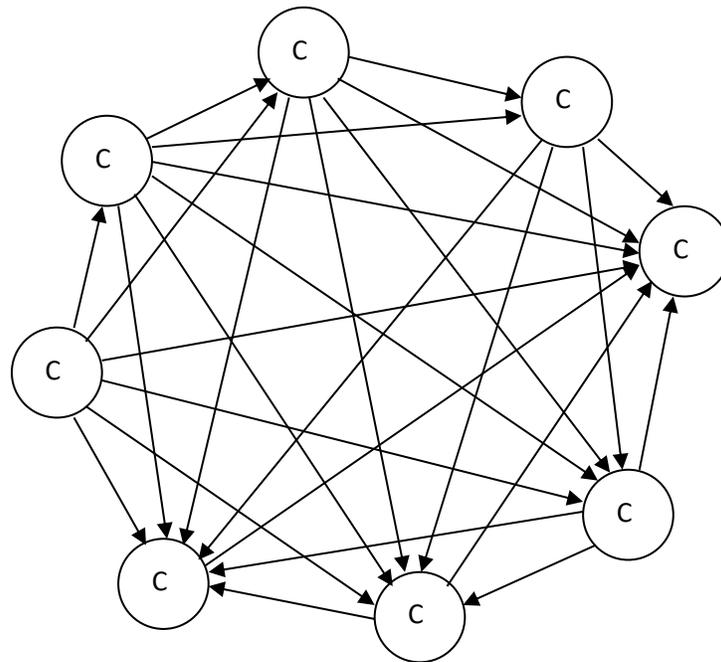


Figura 1: Representación gráfica del Mapa Cognitivo Difuso obtenido del estudio para la Agricultura Regenerativa. Se excluyeron los valores de los pesos de las aristas para hacer más comprensible el gráfico.

A continuación se realiza el análisis del Mapa Cognitivo Difuso con ayuda del método para determinar los Patrones Escondidos, tomando el valor umbral $p = 3$.

C_3 se toma como concepto fundamental para el estudio que se realiza. Los cálculos se realizan con el apoyo del software Octave 4.2.1. Este es un software libre que soporta el lenguaje .m de Matlab y contiene paquetes de cálculo numérico, como lo tiene Matlab [7][19].

Partiendo de $A_1 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$ se tiene:

$A_2 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1)$. Esto quiere decir que con legislar e implementar un marco propicio para la agricultura regenerativa, no es suficiente para que se active esta.

Si se toma $A_1 = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1)$ se tiene $A_2 = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1)$. Por tanto una agricultura regenerativa en un marco legal apropiado no es suficiente para activar el resto de las variables.

Tomando en esta ocasión $A_1 = (1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 1)$ se tiene $A_2 = (1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1)$.

Por tanto, todos los nodos, excepto el quinto, se activan si se parte de $A_1 = (1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1)$.

O sea, activando los nodos 1, 2, 3, 5 y 8, se activarán los nodos 4, 6 y 7.

4. CONCLUSIONES

La situación agrícola actual demanda de una manera diferente de cultivar. Los métodos tradicionales de la agricultura han provocado graves problemas de infertilidad del suelo, daños al clima, a los ecosistemas, a la alimentación, sociales, entre muchos otros. Esto sucede por la falta de visión holística del problema. La agricultura regenerativa es una solución viable, pero que necesita de la integración de todos los factores que forman parte del problema. En este artículo se determinaron ocho variables claves para la implementación de la agricultura regenerativa, incluyéndola a ella misma. Se consultaron a 27 expertos quienes evaluaron la relación causal entre estas ocho variables. Se utilizó la herramienta de los Mapas Cognitivos Difusos para representar el conocimiento sobre el tema y se aplicó el método de los patrones escondidos. Se puede concluir que es necesario trabajar en las variables Secuestro de Carbono en el Suelo, Salud y Fertilidad del Suelo, Prácticas de Agricultura Regenerativa, Productividad Agrícola y Políticas y Marco Regulador. Esto implica realizar un trabajo económico, jurídico, político, social, científico, agrícola, entre otros. De

esta manera se obtendrán resultados en el Impacto Ambiental, la Sostenibilidad Económica y la Resiliencia Climática, que es el objetivo de estas políticas.

RECEIVED: JULY,2024.
REVISED: AUGUST, 2024.

REFERENCIAS

- [1] ABBASI, T., and ABBASI, S. A. (2011). Decarbonization of fossil fuels as a strategy to control global warming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, 1828-1834.
- [2] ALGASHAMY, H. A. A., ABBAS, S. Q., GHASSAN, A., and CHORNOMORDENKO, I. (2024). La Huella De Carbono De La Industria Iraquí: Navegando El Camino Hacia La Sostenibilidad. **Investigación Operacional**, 45, 181-202.
- [3] BAKHTAVAR, E., VALIPOUR, M., YOUSEFI, S., SADIQ, R., and HEWAGE, K. (2021). Fuzzy cognitive maps in systems risk analysis: a comprehensive review. **Complex & Intelligent Systems**, 7, 621-637.
- [4] CAÑETE, M. A. (2023). Los mercados voluntarios de carbono en el sector agrario. **Olint: Revista de plantaciones superintensivas de olivo**, 2023, 60-61.
- [5] CHEN, X., HU, Z., and SUN, Y. (2022, June). Fuzzy logic based logical query answering on knowledge graphs. In **Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence** (Vol. 36, No. 4, pp. 3939-3948).
- [6] DELGADO, M., PAZ, F. y TUPIA, M. (2021). Sistemas de lógica difusa para la evaluación de usabilidad de sitios web de gobierno electrónico: Una revisión sistemática. **Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação**, E41, 141-154.
- [7] EATON, J. W., BATEMAN, D., and HAUBERG, S. (1997). **Gnu octave** (p. 42). London: Network theory.
- [8] JANARTHANAN, R., BALAMURALI, R., ANNAPOORANI, A., and VIMALA, V. (2021). Prediction of rainfall using fuzzy logic. **Materials Today: Proceedings**, 37, 959-963.
- [9] KAMBALIMATH, S., and DEKA, P. C. (2020). A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources. **Applied Water Science**, 10, 1-14.
- [10] KOSKO, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. **International journal of man-machine studies**, 24, 65-75.
- [11] MOHAMMADI, H. A., GHOFRANI, S., and NIKSERESHT, A. (2023). Using empirical wavelet transform and high-order fuzzy cognitive maps for time series forecasting. **Applied Soft Computing**, 135, 109990-109990.
- [12] MOURHIR, A. (2021). Scoping review of the potentials of fuzzy cognitive maps as a modeling approach for integrated environmental assessment and management. **Environmental Modelling & Software**, 135, 104891-104891.
- [13] PARK, S. A., MILLER, D. S., NILI, H., RANGANATH, C., and BOORMAN, E. D. (2020). Map making: constructing, combining, and inferring on abstract cognitive maps. **Neuron**, 107, 1226-1238.
- [14] PECKOL, J. K. (2021). **Introduction to fuzzy logic**. Hoboken : John Wiley & Sons.
- [15] PEER, M., BRUNEC, I. K., NEWCOMBE, N. S., and EPSTEIN, R. A. (2021). Structuring knowledge with cognitive maps and cognitive graphs. **Trends in cognitive sciences**, 25, 37-54.
- [16] POCZETA, K., PAPAGEORGIOU, E. I., and GEROGIANNIS, V. C. (2020). Fuzzy cognitive maps optimization for decision making and prediction. **Mathematics**, 8, 2059-2059.
- [17] SERRANO-GUERRERO, J., ROMERO, F. P., and OLIVAS, J. A. (2021). Fuzzy logic applied to opinion mining: a review. **Knowledge-Based Systems**, 222, 107018-107018.
- [18] SHARMA, S., and OBAID, A. J. (2020). Mathematical modelling, analysis and design of fuzzy logic controller for the control of ventilation systems using MATLAB fuzzy logic toolbox. **Journal of Interdisciplinary Mathematics**, 23, 843-849.
- [19] TREJO, J. T., PÉREZ, A. F., HUAMÁN, M. C., QUIROZ, J. A., HUAMÁN, R. T., and OLIVERA, V. B. (2021, March). Experiences in the Usage of Octave on Improving Learning Mathematics in an Engineering Faculty. In **2021 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)** (pp. 1-4). IEEE.
- [20] UGLEV, V., SYCHEV, O., and GAVRILOVA, T. (2022, June). Cross-cutting support of making and explaining decisions in intelligent tutoring systems using cognitive maps of knowledge diagnosis. In **International Conference on Intelligent Tutoring Systems** (pp. 51-64). Cham: Springer International Publishing.
- [21] WANG, M. Z., and HAYDEN, B. Y. (2021). Latent learning, cognitive maps, and curiosity. **Current Opinion in Behavioral Sciences**, 38, 1-7.
- [22] WHITTINGTON, J. C., MCCAFFARY, D., BAKERMANS, J. J., and BEHRENS, T. E. (2022). How to build a cognitive map. **Nature neuroscience**, 25, 1257-1272.