

Sistema Experto para la Evaluación y Prevención de la Problemática de Contaminación de un Río

Allan Antonio Córdova Duque, Ronny Alfredo Solis Rodriguez, MSc. Carlos Jordán Villamar, PhD. Indira Nolivos Alvarez

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

aacordov@espol.edu.ec, rsolis@espol.edu.ec, cjordan@espol.edu.ec, inolivos@fiec.espol.edu.ec

Resumen

El presente artículo documenta la implementación de un sistema experto que soporta el diseño de estrategias para reducir el nivel de concentración de un contaminante en un río -en este caso nitrógeno- a través de la aplicación de modelos analíticos y expertos que simulan el efecto de diferentes fuentes contaminantes y de la implementación de medidas de manejo ambiental específicas, sobre la calidad del agua del río. Las fuentes contaminantes consideradas, también llamadas "Usos de suelo", son de dos tipos: actividades agrícolas y asentamientos urbanos, los cuales se distribuyen a lo largo del tramo de río. El diseño del ambiente ripariano considera la existencia de una "Zona Protegida" en su parte más baja, donde la concentración de nitrógeno en el río no debe exceder la concentración máxima permitida de 2,44 mg/l. El sistema experto, desarrollado como una aplicación web, permite a un usuario no experto, simular el ambiente ripariano a través de la selección de diferentes distribuciones de uso de suelo a lo largo del río y la aplicación de diferentes medidas de manejo ambiental para el control de los niveles de contaminación por nitrógeno, utilizando una interfaz gráfica interactiva. El sistema incluye información del costo generado por las medidas de manejo de la contaminación aplicadas en el ambiente ripariano.

Palabras Claves: Contaminación hídrica, sistema experto, nitrógeno, prevención de contaminación, fertilizante.

Abstract

This article reports the implementation of an expert system that supports the design of strategies for reducing the level of concentration of a contaminant in a river, in this case nitrogen, through the application of expert analytical models and simulating the effect of different pollution sources and the implementation of specific environmental management measures on water quality of the river. The sources considered pollutants, also called "Uses of soil" are of two types: agricultural and urban settlements, which are distributed along the stretch of river. The design of the environment on the banks of a river considers the existence of a "Protected Area" in its lower part, where the concentration of nitrogen in the river should not exceed the maximum allowable concentration of 2.44 mg/l. The expert system, developed as a web application, allows a novice user to simulate the environment on the bank of a river through the selection of different distributions of land use along the river and the application of different measures environmental management to control the levels of nitrogen pollution, using a graphical user interface. El system includes cost information generated management measures of pollution applied in the environment on the bank of a river.

Keywords: Water pollution, expert system, nitrogen, pollution prevention, fertilizer.

1. Introducción

Los ríos recogen desde tiempos inmemoriales, los contaminantes producidos por la actividad humana. La contaminación hídrica y más específicamente la contaminación en los ríos ha sido uno de los problemas ambientales por mucho tiempo, debido a las actividades agrícolas, la ganadería y los desechos de aguas servidas provenientes de ciudades o asentamientos poblacionales, entre otras.

Los recursos hídricos son de vital importancia para el ser humano, por lo cual resulta de altísima prioridad incursionar en el estudio de la problemática de la contaminación del agua de los ríos a fondo.

Por tanto, la idea de implementar un sistema experto se plantea como alternativa para aportar ayuda a la problemática de la contaminación en ríos, mediante una herramienta que permita realizar desde una perspectiva general una evaluación y prevención del problema.

2. Marco Teórico

El marco teórico nos introduce al conocimiento obtenido en la investigación previa al desarrollo del modelo experto y también tomado en gran parte del modelo mental de los expertos, conocimiento que en un principio se establece como las ideas, conceptos términos o definiciones, que permitieron a la vez establecer un lenguaje común entre el ingeniero del conocimiento y el experto, eliminando ambigüedades que pudiesen ocurrir al ser interpretados.

2.1 Ciclo Hidrológico

El llamado Ciclo Hidrológico en esencia, consiste en que el agua pasa a la atmosfera por evaporación o transpiración y vuelve al suelo por condensación y precipitación [1].

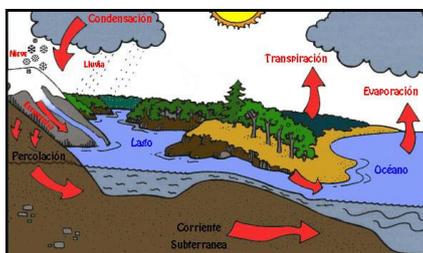


Figura 1.- Ciclo Hidrológico

2.2 Contaminación Hídrica

El ciclo hidrológico comprende toda la biosfera. Por lo tanto, los desechos se introducen en él, los agentes químicos que se aplican al suelo como fertilizantes, pesticidas y sales se lixivian y llegan a las aguas freáticas o escurren a las corrientes fluviales; al igual que ocurre con aceites, grasas y otros materiales que arrojamos o regamos en el suelo.

2.2.1 Ciclo del Nitrógeno

Las formas de Nitrógeno inorgánico más comunes en los ecosistemas acuáticos son el amonio, el nitrito y el nitrato. Estos pueden estar presentes de manera natural en el medio acuático como consecuencia de la deposición atmosférica, la escorrentía superficial y subterránea, la disolución de depósitos geológicos ricos en nitrógeno, la descomposición biológica de la materia orgánica, y la fijación de nitrógeno por ciertos procariontes. Sin embargo, las actividades humanas han alterado de manera significativa el ciclo global del nitrógeno, aumentando su disponibilidad en muchas regiones del planeta como consecuencia de fuentes puntuales o difusas de contaminación [2].

2.2.2 Transporte Físico del Contaminante

Existen algunos modelos que simulan el transporte del contaminante, entre ellos tenemos:

2.2.2.1 Balance de Masas

La masa acumulada en un sistema para una especie dada es igual a la suma del flujo total que entra al sistema (Entrada) y la masa que aparece o se genera debido a la reacción, menos la masa que desaparece como resultado de la reacción menos el flujo de masa que sale del sistema (Salida), ó:

Acumulación = entrada + generación por la reacción - consumo por la reacción - salida [4].

Si el sistema no envuelve una reacción, la ecuación del balance de masa se convierte:

$$A = \sum_{i=1}^n E_i - \sum_{j=1}^n S_j$$

2.2.2.2 Carga Contaminante

La carga contaminante es igual a la concentración del contaminante multiplicada por el caudal del cuerpo de agua: Carga = Concentración X Caudal [5].

$$L=C.Q$$

La concentración de un contaminante en un cuerpo de agua se puede formular como una cantidad de masa en relación con el volumen del cuerpo de agua.

$$c=m/V$$

2.3 Medidas de Control de Contaminación

Presentamos a continuación una descripción de algunas medidas de control y prácticas agrícolas para aminorar la carga de contaminante que llega al río.

2.3.1 Barreras Vivas

La barrera viva es una práctica que ayuda a la conservación del suelo y del agua en la parcela. Son cultivos que se siembran en curvas a nivel, principalmente en las laderas, con el propósito de controlar la erosión. Poseen la característica de que se manejan tupidas en los surcos, con alta densidad; por este motivo actúan como barreras [6].



Figura 2.- Barreras vivas

2.3.2 Zanjas de Ladera

Las zanjas de ladera son canales que se construyen al contorno del terreno siguiendo curvas de nivel o desnivel trazadas con la ayuda del nivel A. También se denominan en muchos sitios como acequia de ladera [7].



Figura 3.- Zanjas de ladera

2.3.3 Siembra en Contorno

Las siembras en contorno o en curvas de nivel son una práctica de conservación de suelos que consiste en preparar las hileras del cultivo en contra de la pendiente siguiendo las curvas a nivel. Así, cada surco o hilera de plantas forma un obstáculo al agua de escorrentía, que al correr libremente, evita que adquiera la velocidad y fuerza necesaria para generar erosión [8].



Figura 4.- Siembra en contorno

2.3.4 Cultivos de Cobertura y Abonos Verdes

Los cultivos de cobertura y los abonos verdes son cubiertas vegetales que se utilizan como prácticas de conservación de suelo, para conservar, fertilizar y mejorar el terreno. Se siembran en un determinado

momento en el terreno, con la finalidad específica de incorporarlo al suelo durante la época propicia de su desarrollo vegetativo, generalmente, se trata de especies leguminosas, fijadoras de nitrógeno como el frijol [9].



Figura 5.- Cultivos de cobertura y áreas verdes

2.3.5 Planta de tratamiento de aguas residuales

Es una instalación dotada de mecanización y control en la cual se utilizan procesos físicos, biológicos y químicos para tratar aguas residuales [10].

2.3.6 Humedal artificial

Un humedal artificial es una instalación hidráulica por la que circula el líquido a tratar y que se compone de un sustrato y de una vegetación ubicada en canales o en lagunas [11].

2.4 Sistemas Expertos

Los sistemas expertos son programas inteligentes para ordenador que utilizan conocimiento y procedimientos inferenciales en la resolución de problemas.

En un sistema experto se consideran tres componentes básicos, la base de conocimientos, la base de hechos y el motor de inferencias [13].

2.5 Métodos de Representación del Conocimiento

Existen varios métodos para la representación de conocimiento en sistemas expertos, pero solo mencionaremos dos de estos, ya que son los que se utilizaron como métodos de representación de conocimiento en el presente trabajo los cuales son Reglas de Producción y Lógica Difusa.

2.5.1 Reglas de Producción

Es uno de los métodos declarativos de representación del conocimiento más utilizado en el diseño de la base de conocimiento de un sistema experto [14].

Son expresiones lógicas que describen el conocimiento de acuerdo con la lógica proposicional:

IF{expresión lógica 1} THEN{expresión lógica 2}

El Algoritmo de Rete, es un algoritmo de reconocimiento de patrones eficiente para implementar un sistema de producción de reglas [15].

2.5.2 Lógica Difusa

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que evalúa. Es una alternativa a la lógica clásica y fue diseñada precisamente para imitar el comportamiento humano [16].

Un conjunto difuso se define basándose en la idea de que existen conjuntos en los que no está claramente determinado si un elemento pertenece o no al conjunto, sino en cierto grado [17].

La función de pertenencia de un conjunto nos indica el grado en que cada elemento de un universo dado, pertenece a dicho conjunto [17].

3. Metodología

La metodología de desarrollo del presente trabajo está formada de una secuencia de fases que se llevaron a cabo para el desarrollo de la aplicación del sistema experto. La metodología se describe de manera general en el siguiente diagrama.



Figura 5.- Metodología usada para el desarrollo del Sistema Experto

3.1 Conceptualización del Problema

La fase de Conceptualización del Problema consiste básicamente en el planteamiento del problema, el entendimiento del dominio del problema y la terminología usada por el experto.

Dicho esto, el escenario del problema se basa en que existen fuentes de contaminación ubicadas en el entorno cercano a la ribera de un río (riparino), dichas fuentes pueden ser de tipo puntual y no puntual que son producidas por las actividades agrícolas o las poblaciones, las cuales vierten sobre el río un contaminante específico que para nuestro caso de estudio es el nitrógeno.

Previo al contacto con los expertos, recurrimos a investigación y lectura sobre la temática en cuestión para así lograr un entendimiento general del dominio del problema.

3.2 Identificación de los Expertos

La ejecución de esta etapa se llevó a cabo en primera instancia gracias la ayuda de la profesora de la materia de graduación, la Dra. Indira Nolivos quien nos puso en contacto con uno de los expertos en el área química y ambiental, el Director del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales (ICQA) de la

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y posteriormente gracias a la información proporcionada por un contacto en el Club Ecológico de la ESPOL supimos de la existencia de un centro de investigación en el mismo campus de la ESPOL, el CADS (Centro de Agua y Desarrollo Sustentable) para lo cual se consideró que el director del mencionado centro podría facilitarnos ayuda, siendo experto en el área de Ciencias Biológicas Aplicadas, quien también amablemente colaboró como experto en el desarrollo del presente trabajo.

3.3 Adquisición del Conocimiento

Este proceso se llevó a cabo mediante entrevistas presenciales con los expertos, en las que se realizaron preguntas abiertas, relacionadas con la temática de contaminación hídrica y se establecieron las definiciones de los términos usados en el dominio del problema. Esto conllevó a la definición de las variables del sistema experto, las cuales se enlistan a continuación:

- Caudal del Río
- Área de Terreno de Granja
- Cultivo
- Pendiente del Terreno
- Clima
- Número de Habitantes en Población
- Porcentaje de Pérdida por Escorrentía
- Carga de Contaminante

3.4 Representación del Conocimiento

Es la fase en la cual se realizó el desarrollo de representación del conocimiento adquirido de los expertos, y el desarrollo del modelo que permitirá el proceso de inferencia y razonamiento por parte del sistema experto.

Gracias al modelo mental adquirido en la fase anterior por parte del experto, se procedió a realizar la representación del conocimiento mediante reglas de producción, para así poder alimentar la base de conocimiento de nuestro sistema experto.

Escorrentía		PendienteNivel			
		Suave	Media	Alta	Pronunciada
Clima	Seco	Ligera	Moderada	Moderada	Severa
	Lluvioso	Moderada	Severa	Severa	Muy severa

Tabla 1. Reglas de producción Escorrentía

	Cultivo					
	Arroz	Azúcar	Banana	Café	Maiz	Soja
DosisNitrogenoFertilizante (Kg)	68	150	250	90	46	50
CicloCultivo	Corto	Corto	Largo	Largo	Corto	Corto

GananciaPorHectarea	350	600	200	550	425	350
---------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 2. Reglas de producción Cultivo

Con respecto a la técnica de lógica difusa, se diseñó un mecanismo de inferencia difusa con el fin de estimar el Porcentaje de Pérdida de Nitrógeno en Fertilizantes por Escorrentía.

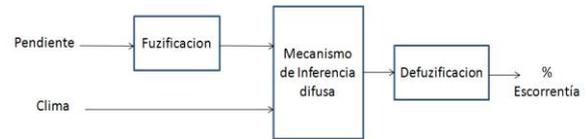


Figura 6.- Esquema general del módulo difuso

Clima	Lluvioso	Seco
-------	----------	------

Tabla 3. Variable de entrada clima

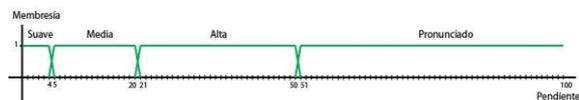


Figura 7.- Variable de entrada pendiente



Figura 8.- Variable de salida "Porcentaje de escorrentía"

3.5 Diseño de la Aplicación

En esta sección describiremos el esquema general de la aplicación y la interacción entre sus respectivos módulos.

Debido a que existía el requerimiento de que el sistema experto sea una aplicación web, se optó por hacer uso de la arquitectura cliente – servidor.

La arquitectura cliente servidor es un modelo de aplicación distribuida en el que las tareas se reparten entre los proveedores de recursos o servicios, llamados servidores, y los demandantes, llamados clientes.

Este tipo de arquitectura de desarrollo es muy común para estos casos de aplicaciones web, como es en el presente caso para la implementación del sistema experto, en el que se necesita de un cliente, el cual para el caso de una aplicación web se ejecuta en el browser o navegador web y un servidor, el cual es un

- ActividadAgricola
- ConjuntoDifuso
- Cultivo
- Escorrentia
- Pendiente
- Poblacion
- PracticaAgricola
- Rio
- SistemaTratamientoResidual

3.8 Validación

En esta fase se realizó la validación de la aplicación con uno de los expertos, esta fase consistió en realizar pruebas de la aplicación junto con el experto, para así determinar el grado de aceptación de los resultados obtenidos y si este es acorde con el razonamiento del experto. Una vez observados los resultados por parte del experto, este consideró que eran coherentes y en una escala del 1 al 5, donde 1 es bajo y 5 es alto, le dio una calificación de 4 como grado de aceptación.

PARAMETROS GENERALES		
Entradas	Clima=lluvioso Caudal del río= 500 m³/s Pendiente = 19 %	
	FUENTES DE CONTAMINACIÓN	
	Granja Agrícola	Cultivo=Banana Hectáreas= 500
	Población	Habitantes= 100000
Salidas	Mensaje de la Aplicación "Felicitaciones el Contaminante no ha excedido el límite permitido"	
	Concentración del Contaminante en el Río	0.029 mg/l
	Carga Contaminante Aportada por Granja Agrícola	5.170x10 ¹¹ mg/año
	Carga Contaminante en Aguas Residuales	4.55 x 10 ¹¹ mg/año

Tabla 4. Prueba realizada con el experto

4 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un sistema experto para afrontar la problemática de la contaminación, para esto se hizo uso de las técnicas de Reglas de Producción y Lógica Difusa para la representación del conocimiento de los expertos, así como la inferencia y la reproducción del razonamiento según la lógica de los expertos. En el desarrollo del sistema experto como una aplicación web, se utilizaron las tecnologías de programación de HTML5, CSS3 y JavaScript para el diseño de la interfaz gráfica, así como la plataforma de PHP con la herramienta PHP Business Rules como

motor de inferencia, pero más allá de todos los aspectos técnicos que podemos mencionar, al final el resultado de este trabajo fue un modelo experto que era capaz de ejemplificar estrategias que puedan implementarse para combatir la problemática de la contaminación.

Con lo cual podemos comentar lo que consideramos como puntos relevantes observados en el proceso de desarrollo de este trabajo los siguientes:

1. Comprobamos que la fase de adquisición del conocimiento realizada con el experto es crucial para obtener el resultado esperado del sistema experto.

2. El uso y la combinación en la base de conocimiento de reglas difusas, facilitó la representación de las variables lingüísticas que intervienen en los procesos inmersos en la problemática para el diseño del modelo.

3. Basados en los resultados de las pruebas efectuadas en el proceso de validación y la opinión del experto, podemos concluir que el sistema experto cumple con los objetivos planteados y puede ser utilizado como una herramienta de aprendizaje en la temática de hidrología y contaminación hídrica.

En el desarrollo del presente trabajo se recorrió un camino relativamente extenso en el proceso de investigación, análisis y diseño del sistema experto, mas aún las barreras que pudieron haberse presentado en este proceso fueron franqueadas, nos queda como resultado de este trabajo, mas allá del éxito que sea relativamente aceptable o no, la experiencia y el aprendizaje adquirido del dominio del problema.

5 Recomendaciones

Bajo la experiencia que nos ha dejado la investigación del presente trabajo y como aporte para futuros trabajos podemos proponer como recomendaciones lo siguiente:

- Vincular la base de conocimiento del Sistema Experto con una base de datos climática con la finalidad de que este realice la evaluación con datos reales.
- Incluir en el Sistema Experto una base de datos que tenga valores de los caudales de los principales ríos del país.
- Ampliar la base de conocimiento para que el Sistema Experto pueda trabajar con otras sustancias que podrían ser consideradas contaminantes además del nitrógeno.
- Agregar al análisis nuevas variables definidas como constantes en el presente trabajo, tales como: el tipo de suelo y la carga contaminante de nitrógeno de actividades ganaderas, lo cual permitiría realizar una

mejor estimación de la variable escorrentía y de la concentración de nitrógeno en el agua.

5 Referencias

- [1] Bernard J. Nevel y Richard T. Wright, "Ciencias Ambientales: Ecología y Desarrollo Sostenible", Pearson Educación, México, 1999, pág. 270.
- [2] J.A. Camargo, A. Alonso, "Contaminación por Nitrógeno inorgánico", Universidad de Alcalá, España, 2007, pág. 99.
- [3] Stanley E. Mahanan, "Introducción a la Química Ambiental", Reverte, Mexico, 2007, pág. 22.
- [4] Earth System Science Education in the 21st Century, "Earth System and Pollution", <http://esse21.usra.edu/ESSE21/PUPRModule/Spanish%20pdf/Capitulo%20%20Agua.pdf>, Fecha de Consulta: Marzo 2012.
- [5] Agencia de Medio Ambiente, "Metodología para la Evaluación Aproximada de La Carga Contaminante", 1998, pág. 4-12
- [6] "Barreras vivas", <http://coin.fao.org/cms/media/10/13195641664990/barrerasfinal.pdf>, pág. 3, Fecha de Consulta: Abril 2012.
- [7] "Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas", <http://es.scribd.com/doc/63807092/9/Zanjas-de-ladera>, pág. 25, Fecha de Consulta: Abril 2012.
- [8] "Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas" <http://es.scribd.com/doc/63807092/9/Zanjas-de-ladera>, pág. 34, Fecha de Consulta: Abril 2012.
- [9] "Manual de Buenas Prácticas para el Manejo de Cuencas Hidrográficas" <http://es.scribd.com/doc/63807092/9/Zanjas-de-ladera>, pág. 27, Fecha de Consulta: Abril 2012.
- [10] J.Glynn Henry y Gary W. Heinke, "Ingeniería Ambiental", Prentice Hall Hispanoamerica S.A., pag. 456
- [11] Mariano Seoáñez Calvo, "Tratado de Gestión del Medio Ambiente Urbano", Ediciones Mundi-Prensa, pág. 101
- [12] Ana Millán Jiménez, "Mente, Cerebro e Inteligencia Artificial", EDITUM, España, 1993, pág. 5
- [13] Raúl Pino Díez, Alberto Gómez Gómez, Nicolás De Abajo Martínez, "Introducción a la Inteligencia Artificial", Universidad de Oviedo, España, 2001, pág. 11.
- [14] Rafael Lahoz-Beltrá, "Bioinformática: Simulación, vida artificial e inteligencia artificial", Ediciones Díaz de Santos, 2004, pág. 354
- [15] David Wood, "Linking Enterprise Data", Editor David Wood, USA, Virginia 2010, pág. 131-132.
- [16] "Lógica difusa", http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/amirez_r_o/capitulo3.pdf, pág. 17, Fecha de Consulta: Enero 2012.
- [17] Angélica Urrutia, Marcela Varas, "Modelo de Datos Difusos en UML", www.inf.udec.cl/~mvaras/papers/2002/fuzzy-wbd-chile-02.pdf, Universidad de Concepción, Chile, 2002, Fecha de Consulta: Mayo 2012.
- [18] María Olmo Castillo, "Tutorial de Introducción de Lógica Borrosa", <http://www.dma.fi.upm.es/java/fuzzy/tutfuzzy/contenido3.html>, Universidad, Politécnica de Madrid, España, 2008, Fecha de Consulta: Mayo 2012.
- [19] Sergio Luján Mora, "Programación de aplicaciones Web", Editorial Club Universitario, 2002, pág. 49
- [20] JQuery, "jQuery Home Page", <http://jquery.com/>, Fecha de Consulta: Enero 2012.
- [21] Redips, "REDIPS.drag Documentation", <http://www.redips.net/javascript/redips-drag-documentation/>, Fecha de Publicación: Julio 2011, Fecha de Consulta: Enero 2012.
- [22] Ángel Cobo, Patricia Gómez, Daniel Pérez, Rocío Ochoa, "PHP y MySQL: Tecnología para desarrollo de aplicaciones Web", Ediciones Díaz de Santos, 2005, pág. 99
- [23] PHP Rules, "PHP Business Rules", <http://phprules.sourceforge.net/>, Fecha de Consulta: Febrero 2012.
- [24] CRISTALAB, "Programación Orientada a Objetos (OOP) con JavaScript", Fecha de Publicación: Octubre 2007, <http://www.cristalab.com/tutoriales/programacion-orientada-a-objetos-oop-con-javascript-c2321/>, Fecha de Consulta: Enero 2012.