
Análisis multifuncional a un problema hidroambiental complejo. Caso de estudio: Río Naolinco, Veracruz, México

Multifunctional Analysis of a Complex Hydro-Environmental Problem: a Case Study of the Naolinco River, Veracruz, Mexico

Rabindranarth Romero López¹, Ervin Jesús Álvarez Sánchez², Rosario Aldana Franco³ y José Gustavo Leyva Retureta⁴

Sumario: 1. Introducción, 2. Desarrollo de la propuesta, 2.1 Contextualización de la zona de estudio, 2.2 Metodología, 2.3 Propuesta de solución para el vertido del lactosuero en el río Naolinco, 3. Resultados, 4. Conclusiones, Fuentes de información

Resumen

En México, la contaminación de los ríos representa uno de los desafíos ambientales más urgentes y el río Naolinco, en Veracruz, no es la excepción debido a que la actividad económica de la localidad de Miahuatlán está centrada en la producción de queso, y el lactosuero que se genera se vierte al río diariamente, lo que produce una alta contaminación y degrada la calidad ambiental, afectando la flora y la fauna del río. El objetivo de esta investigación es darle un valor de reuso al lactosuero mediante un análisis multifuncional y generar alternativas para disminuir la cantidad vertida al río, proponiendo utilizarlo como materia prima para la producción de biopolímeros, fabricar biofertilizantes, generar gas metano y elaborar una fórmula láctea. Esta propuesta innovadora no solo beneficiaría a la

¹ Ingeniero Civil, maestro en Gestión Integral del Agua, doctor en Ciencias Ambientales. Académico de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México. rabromero@uv.mx <https://orcid.org/0000-0001-8704-9744>

² Ingeniero Mecánico Electricista, maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Académico de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México. eralvarez@uv.mx <https://orcid.org/0000-0002-0790-0429>

³ Ingeniera Mecánica Electricista, maestra en Inteligencia Artificial, doctora en Neuroetología y en Educación. Académica de tiempo completo, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. raldana@uv.mx <https://orcid.org/0000-0002-0503-6024>

⁴ Ingeniero Mecánico Electricista, maestro en Ingeniería Energética y doctor en Ingeniería. Técnico académico de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz, México. guleyva@uv.mx <https://orcid.org/0000-0001-5123-0111>

comunidad y a los productores de queso, sino que también se reduciría la contaminación en el río Naolinco y se mejoraría la calidad ambiental de la región.

Palabras clave: Análisis multifuncional, lactosuero, tratamiento, calidad del agua, mitigación.

Abstract

In Mexico, river pollution is one of the most pressing environmental challenges, and the Naolinco River in Veracruz is no exception. This is largely due to the economic activity in the town of Miahuatlán, which is centered around cheese production. The whey generated from this process is dumped into the river daily, causing significant pollution and degrading the environmental quality, which in turn harms the river's flora and fauna. The goal of this research is to give whey a new purpose by reusing it through a multifunctional analysis and to develop alternatives that reduce the amount being discharged into the river. The proposal includes using whey as a raw material for producing biopolymers, creating a biofertilizers, generating methane gas, and developing a dairy formula. This innovative approach benefits the local community and cheese producers and also help reduce pollution in the Naolinco River and improve the overall region's environmental quality.

Keywords: Multifunctional analysis, whey, treatment, water quality, mitigation.

1. Introducción

La contaminación del agua es un tema de gran interés, ya que aumenta día a día, afecta al medio ambiente y, en consecuencia, a los habitantes. En este caso, dicha contaminación es generada por los desechos de las industrias que vierten sin cuidado hacia los suelos y mantos acuíferos, ocasionando un gran problema ecológico.

Actualmente, los ríos, lagos y lagunas en México se encuentran con altos índices de contaminación, de tal forma que la Unidad Especializada en Hidroinformática y Tecnología Ambiental (HITA) de la Universidad Veracruzana tiene como objetivo proponer soluciones sistémicas en beneficio de la sociedad, dado que actualmente la sociedad se enfrenta a dos problemas ambientales muy importantes.

El primero está asociado a la variabilidad climática en donde los volúmenes y distribución espaciotemporal del agua están cambiando a través del tiempo; por ejemplo, hay sequías más severas o fenómenos hidrometeorológicos de mayor intensidad; en segundo término, podemos observar los altos índices de contaminación que hay en los cuerpos de agua.

Por lo tanto, la finalidad de esta investigación es proponer una solución novedosa basada en un análisis multifuncional y teniendo como caso de estudio el río Naolinco. Para ello es necesario conocer el problema fondo, con el propósito de realizar propuestas que permitan disminuir la contaminación en la región y que los habitantes puedan contar con recursos naturales con una mejor calidad.

Esta investigación fue realizada en conjunto con la École de Technologie Supérieure y la Universidad Veracruzana, a través del intercambio de conocimiento y tecnología entre ambas instituciones, permitiendo así la movilidad entre profesores y estudiantes para formular diversas alternativas que permitan la mejora de la calidad ambiental.

En este contexto, la relevancia de esta investigación radica en el cambio de paradigma en la resolución de un problema ambiental común como la contaminación de ríos en México.

Actualmente, el municipio de Miahuatlán, Veracruz, México, es un importante productor de queso, el cual es transportado, en su mayoría, a Ciudad de México. Desafortunadamente, el residuo generado por su elaboración, el lactosuero, es vertido al río Naolinco sin algún tratamiento previo, generando la contaminación del río y, en consecuencia, afectaciones en la flora, la fauna y en la calidad del agua, debido a los desechos industriales de ciertas empresas que producen leche y sus derivados (Sosa, 2015).

El lactosuero representa cerca del 90% del volumen total de la leche empleada; sin embargo, mantiene aproximadamente el 55% de todos los nutrientes originales, entre los que destacan la lactosa, las proteínas solubles, las grasas y las sales minerales (González et al., 2017).

Debido a lo anterior, el principal objetivo de esta investigación se centró en realizar una propuesta de solución para un problema hidroambiental complejo a través de un análisis multifuncional para disminuir el impacto del lactosuero en el río Naolinco.

2. Desarrollo de la propuesta

En el municipio de Miahuatlán se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con la finalidad de mitigar el impacto del lactosuero y aguas negras en el río Naolinco (ver figura 1), pero desafortunadamente los costos de operación y mantenimiento fueron muy elevados y la PTAR terminó abandonada.

En la figura 2 se muestra el esquema tradicional para el tratamiento de aguas residuales en el municipio de Miahuatlán, en donde las queserías (F) vierten el lactosuero al río

Figura 1. Planta de tratamiento de aguas residuales

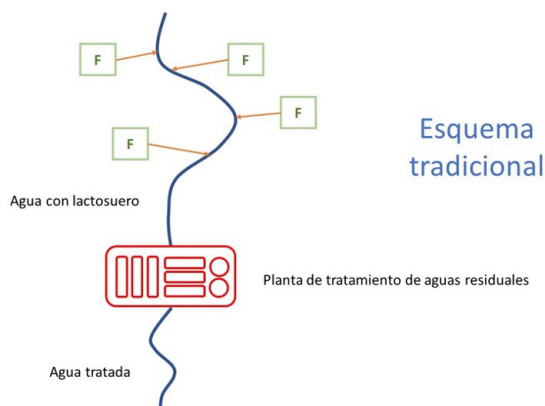


Nota. Tomada de Diario de Xalapa, 2021: <https://oem.com.mx/diariodexalapa/local/hacen-lado-a-alcalde-y-limpian-agua-que-consumen-comision-del-agua-contaminacion-aguas-negras-potable-15516673#!>

Naolinco, y posteriormente se instaló una PTAR para tratar el agua; cabe señalar que esta propuesta, no solucionó el problema.

En este contexto, la Universidad Veracruzana, en conjunto con la École de Technologie Supérieure, propusieron implementar un enfoque multisistémico y multifuncional para ofrecer una solución innovadora, teniendo como objeto de estudio al lactosuero.

Figura 2. Esquema tradicional en el tratamiento de aguas residuales



A continuación, se describe la propuesta científica en tres subtemas: contextualización de la zona de estudio, metodología y resultados.

2.1 Contextualización de la zona de estudio

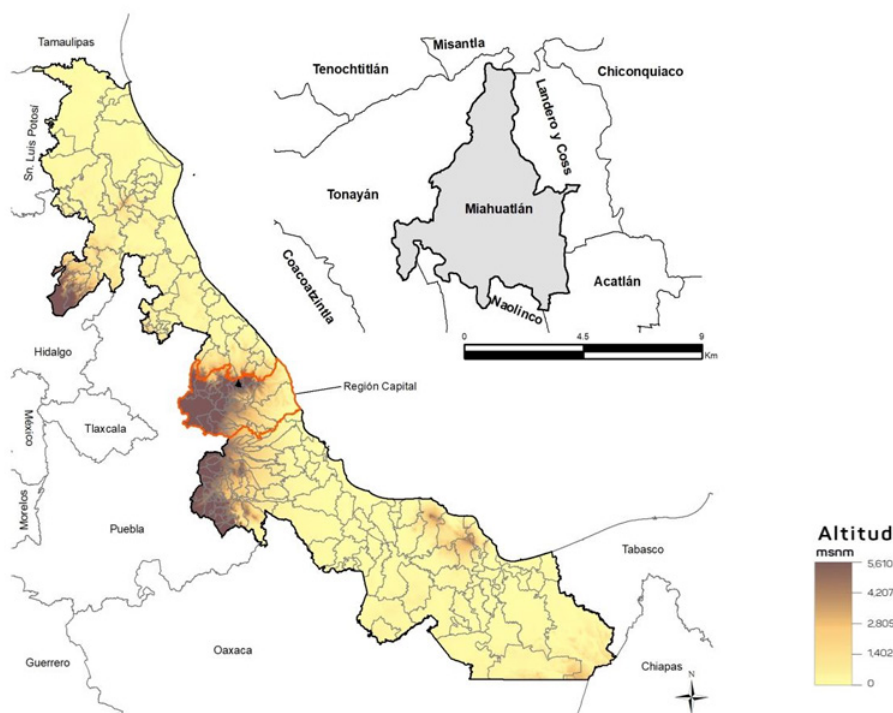
Municipio de Miahuatlán

Está ubicado en el estado de Veracruz en las coordenadas 19° 42' y 19° 46' latitud norte,

96° 51' y 96° 55' longitud oeste, lo que lo coloca en las estribaciones de la Sierra de Chiconquiaco, por lo que tiene una altitud entre 900 y 2100 m. Tiene una colindancia con los municipios de Tonayán, Misantla y Landero y Coss por la parte norte, mientras que, al este, lo hace con los municipios de Landero y Coss y Acatlán; al sur con los municipios de Acatlán y Naolinco; mientras que en el oeste colinda con los municipios de Naolinco y Tonayán (ver figura 3).

El municipio tiene una superficie de 29.4 km², lo cual representa un 0.04% del total de la superficie del estado de Veracruz, con una precipitación pluvial media anual de 1,639.7 mm debido a que llueve todo el año y al clima semicálido húmedo que lo caracteriza. Por otra parte, el tipo de suelo con el que cuenta se formó debido a las cenizas volcánicas, por lo que corresponde al tipo andosol, lo que lo hace susceptible a la erosión. El suelo de la zona se utiliza: 14% (4.2 km²) en la agricultura, 48% (14 km²) en pastizales, 25% (7.4 km²) en bosques y 13% (3.8 km²) en vegetación secundaria (SEFIPLAN, 2018).

Figura 3. Localización geográfica del municipio de Miahuatlán

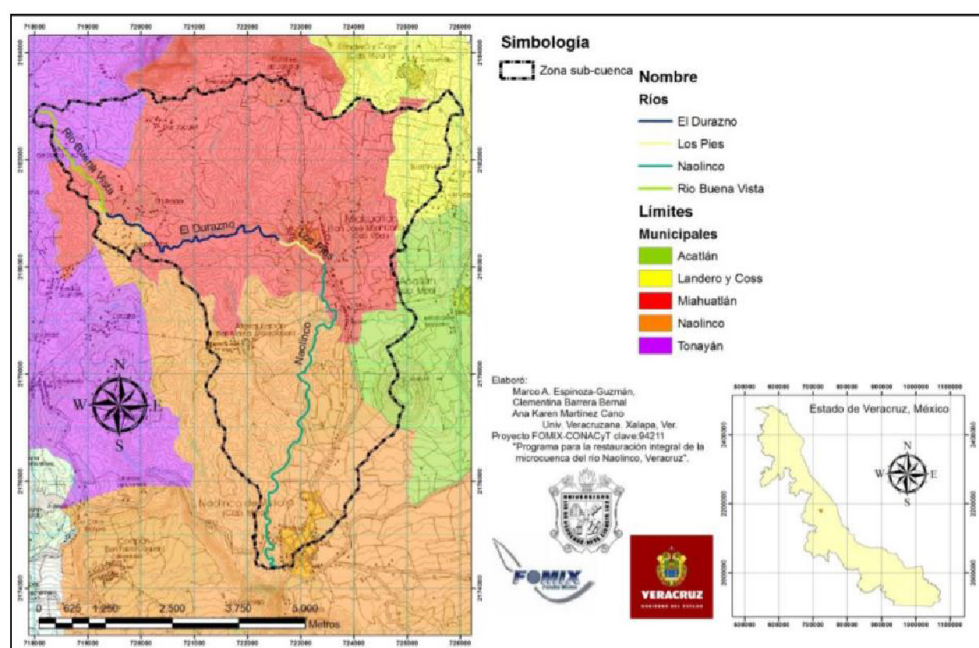


Nota. Tomada de Cuadernillos municipales, 2022. Miahuatlán, por Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEGVER), 2022; http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2022/09/Miahuatlán.CM_Ver_2022.4.pdf

Microcuenca del río Naolinco

Ubicada dentro del municipio de Miahuatlán en el estado de Veracruz, a una altura de 1,540 msnm con coordenadas 19° 39' latitud norte y 96° 52' longitud oeste. Las poblaciones de Miahuatlán y Naolinco son beneficiarias de diversos servicios ambientales del río Actopan, que obtiene agua del río Naolinco, perteneciente a esta microcuenca (Williams-Linera, 1992), la cual, de acuerdo con Martínez (2010), está conformada por cinco municipios (figura 4): Acatlán (4.42%), Landero y Coss (5.68%), Tonayán (5.22%), Naolinco (32.4%) y Miahuatlán (52.29%).

Figura 4. Microcuenca del río Naolinco



Nota. Tomada de Martínez (2010)

En el estudio realizado por Martínez (2010), se determinó la calidad del agua en la microcuenca del río Naolinco analizando los parámetros físicos, químicos y microbiológicos; criterios ecológicos e índice de calidad del agua (ICA). Los parámetros estudiados fueron: oxígeno disuelto (OD), pH, temperatura, coliformes totales y fecales (CT y CF), nitratos (NO_3), fosfatos (PO_4), sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) y turbidez.

De acuerdo con este estudio, la calidad del agua que presenta la microcuenca del río Naolinco no es la adecuada, por lo que se propone implementar medidas que contribuyan al bienestar del ecosistema urbano, conocer de qué manera funciona el ecosistema y en qué consiste, para entender mejor la interacción entre las industrias queseras de

Miahuatlán con el medio ambiente, y contribuir a que el ecosistema urbano de este municipio sea saludable y resiliente.

2.2 Metodología

Evaluación de la calidad del agua

Para comprender la problemática en el río Naolinco, se realizó un estudio para evaluar la calidad del agua en la región. Este análisis fue realizado por la estudiante Viviane Bravo como parte de sus prácticas de maestría, quien obtuvo los resultados que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de los parámetros de calidad de agua en el río Naolinco

PARAMETROS		RIO SUCIO	PARAMETROS	RIO LIMPIO	METODOLOGIA
DBO ₅ (mg·L ⁻¹)		167.87	DBO ₅ (mg·L ⁻¹)	0.82	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO (mg·L ⁻¹)		229.5	DQO (mg·L ⁻¹)	Por debajo del rango	NMX-AA-030-SCFI-2012
DBO 5 / DQO		0.7314	-	-	
Sol Totales (g·L ⁻¹)	Totales (STT)	397	Sol Totales (g·L ⁻¹)	288	NMX-AA-034-SCFI-2015
Solidos Totales (g·L ⁻¹)	Volátiles (SVT)	198.5	Solidos Volátiles Totales (SVT) (g·L ⁻¹)	59	NMX-AA-034-SCFI-2015
Solidos Totales (g·L ⁻¹)	Fijos (SFT)	198.5	Solidos Fijos Totales (SFT) (g·L ⁻¹)	229	NMX-AA-034-SCFI-2015
pH		6.3	pH	6.9	POTENCIOMETRIC A
Temperatura (°C)		19	Temperatura (°C)	19	
Conductividad (Ms·cm ⁻¹)		446	Conductividad (Ms·cm ⁻¹)	132	CONDUCTIVIMETRICA
NH ₃ (mg·L ⁻¹)		0.085	NH ₃ (mg·L ⁻¹)	0.045	NESSLER
NITRATOS (mg·L ⁻¹)		2	NITRATOS (mg·L ⁻¹)	0.075	reducción de cadmio
Ntot (mg·L ⁻¹)		11.6	Ntot (mg·L ⁻¹)	2.75	KJELDAHL

Fuente: Bravo, V., et al., 2015.

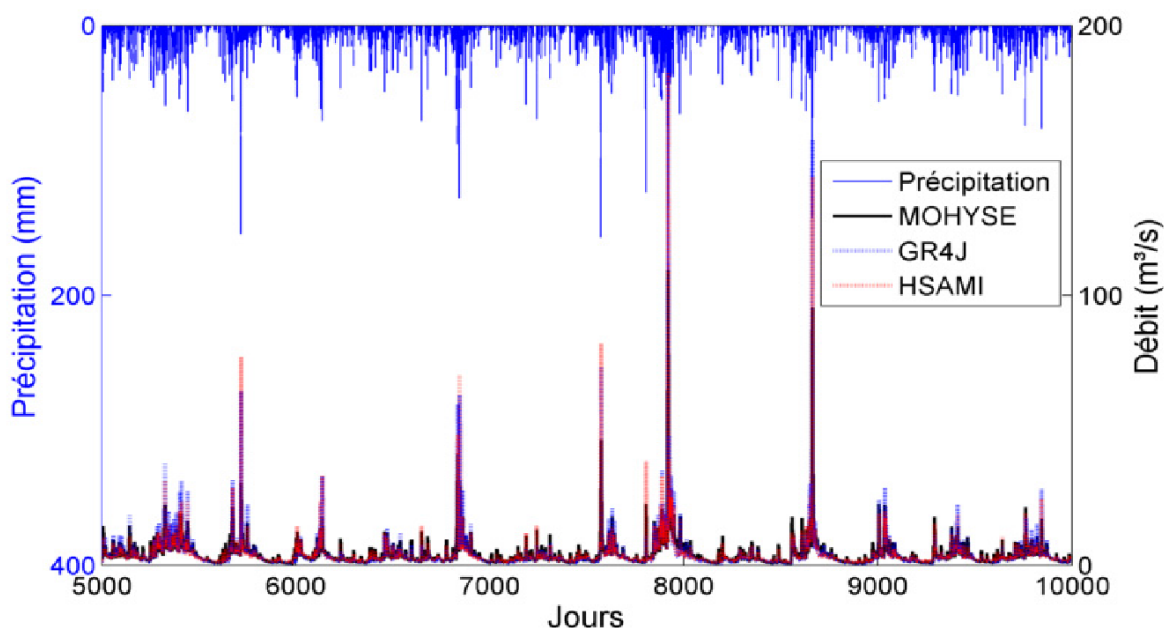
Para este estudio se hizo un muestreo en el río aguas arriba, antes de que las queserías vertieran el lactosuero al río y aguas abajo (río limpio), y después de que las queserías vertieran al río (río sucio). Como se puede observar en la tabla 1, los parámetros del “río limpio” variaron en comparación con los parámetros del “río sucio”; por lo que se puede concluir que la calidad del río no es apta para consumo humano, ya que es un cuerpo de agua contaminada.

Evaluación de la cantidad del agua

En este proyecto, además de conocer la calidad del agua, también fue necesario conocer la cantidad de agua que se precipita y escurre en el río Naolinco, por lo que Breton-Dufour (2017), realizó un estudio hidrológico para medir la cantidad de agua que llueve en comparación con el agua que escurre en la cuenca. Como se muestra en la figura 5, se utilizaron tres modelos hidrológicos globales (MOHYSE, GR4J y HSAMI), para evaluar el escurrimiento, para lo cual se pudieron establecer los escurrimientos máximos y mínimos en la cuenca; lo que permitió determinar cuál era el volumen de agua que fluye en la cuenca y la forma en que interactúa con el lactosuero.

La conclusión fue que se tiene una mayor concentración de lactosuero en el río durante el periodo de sequía, en comparación con la época de lluvias, en donde la concentración se ve disminuida debido a la dilución del lactosuero en el agua.

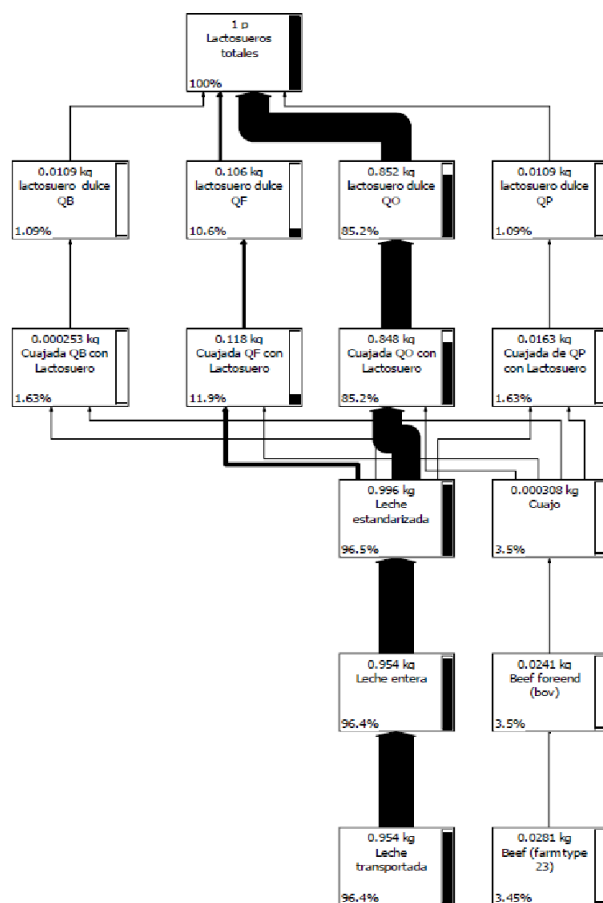
Figura 5. Análisis de la precipitación y de la cuenta en el río Naolinco



Análisis del ciclo de vida del lactosuero

Este estudio, realizado por Lagunes (2018), tuvo como objetivo valorar los impactos del lactosuero durante su ciclo de vida, para lo cual se muestra un diagrama de árbol (figura 6) en el que se muestran las emisiones de CO₂eq en la etapa de lactosuero.

Figura 6. Diagrama de árbol de las emisiones de CO₂ eq en la etapa de lactosuero



Se puede concluir con este estudio que el lactosuero es un producto que debe ser agregado al mercado, yasea para su transformación o para el consumo de otros animales. Estas medidas deben implementarse para evitar su desecho a cuerpos de agua o al alcantarillado pues, como se demostró en la evaluación de resultados, es un contaminante potencial debido a los grandes volúmenes vertidos.

2.3 Propuestas de solución para la disminución del vertido del lactosuero en el río Naolinco

1. Elaboración de un biofertilizante con el lactosuero

De acuerdo con Fabre (2018), se realizó un análisis del suelo en la región para evaluar la posibilidad de enriquecerlo con el lactosuero y fue probado como fuente nutricional en sorgo forrajero con el objetivo de obtener mayor biomasa para alimentación del ganado. Los resultados del proyecto

concluyeron que el suero evaluado experimentalmente como fuente de nutrientes en pasto Kikuyo y los tratamientos de Nitrógeno y Potasio fueron los que produjeron mejores resultados en contenidos nutricionales y en biomasa foliar seca, comprobando así, que el lactosuero cumple las funciones de fertilidad.

2. Elaboración de un biopolímero

Con base en el estudio de Mendoza (2018), se concluye que es posible elaborar un biopolímero con base en el lactosuero, ya que se puede comprobar que la extracción de proteínas de lactosuero es posible al aplicarle una extracción líquido-líquido utilizando hexano como solvente, y con ellos poder realizar un proceso para la elaboración de un biopolímero que sea degradable con el medio ambiente y mitigando el vertido del lactosuero al río Naolinco.

3. Análisis energético del lactosuero y su valorización

En este estudio, realizado por Casareales (2017), se evaluaron diversos escenarios con el

lactosuero, para lo cual se consideraron: su venta, la metanización para generar energía eléctrica y el compostaje. Si sólo se considerara un sistema monofilar con la metanización, se generaría energía eléctrica suficiente para satisfacer las necesidades del municipio, pero se tendría que construir un biodigestor de grandes dimensiones para cumplir con este objetivo, por lo que se concluye que un escenario diversificado puede tener mayor posibilidad de éxito que concentrarse en una sola propuesta.

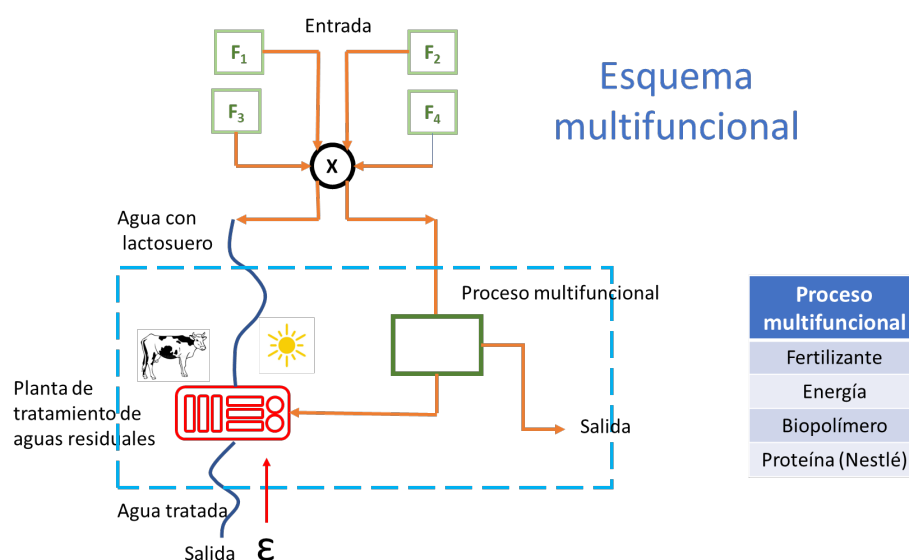
4. Análisis en la transferencia energética del lactosuero

Para este estudio, realizado por Machorro (2019), se consideraron diversos escenarios energéticos para el lactosuero, concluyendo que el mejor escenario es que el lactosuero sea vendido a Nestlé para la elaboración de la fórmula láctea y que sea depositado en una estación de transferencia en el municipio, para que posteriormente sea llevado al estado de Jalisco y que sea procesado. El sobrante del lactosuero, que se vertería al río Naolinco, sería tratado a través de una PTAR, pero de dimensiones mucho menores a las que se había diseñado en un principio; con ello se mitigaría el impacto del lactosuero en el cuerpo de agua.

3. Resultados

Una vez conociendo la problemática y las posibles soluciones para disminuir el impacto del lactosuero en el municipio de Miahuatlán, se propone un análisis multifuncional (figura 7), el cual se describe a continuación.

Figura 7. El esquema multifuncional para la valorización del lactosuero



El esquema multifuncional que se propone es el siguiente:

- i. El lactosuero es almacenado en un contenedor.
- ii. Gran parte de los volúmenes del lactosuero almacenado servirán para elaborar biofertilizantes, generar energía, crear biopolímeros, elaborar fórmula láctea, entre otros posibles usos del lactosuero.
- iii. El sobrante del lactosuero, que se vertería río, y el sobrante del proceso multifuncional serán tratados en la PTAR.
- iv. Se propone la construcción de una PTAR, pero las dimensiones serán reducidas, ya que la cantidad de lactosuero vertido en el río es significativamente menor, por lo que los gastos de operación y mantenimiento disminuirán.
- v. La PTAR que se propone tendrá un ahorro energético considerable, ya que se aprovecharán las energías alternas (solar, eólica, metanización), para la puesta en marcha.

4. Conclusiones

La contaminación del río Naolinco es un grave problema ambiental producido por el lactosuero que vierten las industrias queseras; situación que impacta la flora, fauna y la calidad del agua. Aunque se han hecho intentos previos para solucionar esta situación, tal como construir una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) – que lamentablemente no funcionó como se esperaba –, la propuesta presentada en este estudio ofrece una solución novedosa. Esta solución se basa en un enfoque multifuncional que no solo busca reducir el vertido de lactosuero al río, sino también aprovechar este subproducto para la creación de biopolímeros, biofertilizantes, generación de energía y producción de fórmula láctea. Además, se sugiere un diseño más eficiente y económico para la planta de tratamiento, utilizando energías renovables y reduciendo el impacto ambiental. En conjunto, esta investigación presenta una propuesta integral y sustentable para gestionar el lactosuero, lo que contribuiría a mejorar la calidad del agua del río Naolinco y al bienestar de la comunidad de Miahuatlán, Veracruz.

Además, el objetivo planteado en el proyecto se cumplió, ya que se pudo proponer un análisis multifuncional a un problema hidroambiental en el río Naolinco, Veracruz, México para disminuir el impacto del lactosuero. Cabe destacar que la participación de los estudiantes en el proyecto permitió generar propuestas innovadoras para el tratamiento del lactosuero. A través de la colaboración con otras instituciones permite la transferencia de tecnología y conocimiento generando una propuesta de solución multidisciplinaria lo cual permite abordar diversas problemáticas desde otra perspectiva.

Fuentes de información

- Breton-Dufour, M. (2017). Étude de méthodes de régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques et application à un bassin versant non-jaugé au Mexique (Mémoire de maîtrise électronique). École de Technologie Supérieure, Montréal.
- Casasreales, C. (2017). Évaluation environnementale d'une approche multifilière dédiée à la valorisation des matières résiduelles organiques: Cas d'une municipalité au Mexique (Rapport de projet). École de Technologie Supérieure, Montréal.
- Faibre Sequeda, J. (2018). Aplicación de suero de leche como amplificador nutricional en pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) en Miahuatlán, Ver (Tesis). Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- González, M. A., Juliano, P., López, T., Rosenthal, A., Burbano, I., Zoccal, R., Valderrama, P., & Jorcin, S. (2017). Introducción: Escenario y posibilidades del lactosuero. En G. Blanca (Ed.), Valorización del lactosuero (pp. 11-14). Instituto Nacional de Tecnología Industrial – INTI.
- Lagunes Herrera, I. (2018). Análisis de Ciclo de Vida del Lactosuero procedente del municipio de Miahuatlán, Veracruz (Tesis). Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- Machorro García, P. R. (2019). Análisis de escenarios de transferencia energética del lactosuero en el municipio de Miahuatlán, Veracruz (Tesis). Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- Martínez Cano, A. K. (2010). Evaluación de la calidad del agua en la microcuenca del río Naolinco, Veracruz (Periodo 2009-2010) (Tesis). Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- Sosa Martínez, A. (2015). Implementación de una estrategia para la utilización del lactosuero como medida para la mitigación de la contaminación del río Naolinco en Miahuatlán, Veracruz (Tesis). Universidad Veracruzana, Xalapa, Ver.
- Williams-Linera, G. (1992). Ecología del paisaje y el bosque mesófilo de montaña en el centro de Veracruz. *Ciencia y Desarrollo*, 18(105), 132-138.