

A partir de las características de los residuales de INDUMAN, la cual procesa camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), pepino de mar (*Isostichopus badionotus*), ostión de mangle antillano (*Crassostrea rizophorae*) y algunas especies de pescado, se produce un estimado de residuales líquidos de 100-130 m³/d, que proceden principalmente del procesamiento de las especies mencionadas, la limpieza y desinfección de equipos e instalaciones y de las aguas de refrigeración con descarga directa al mar (20° 19'52,60" N y - 77° 09'16,06" W).

En 2020 se efectuó la caracterización a los residuales de esta industria, determinándose los parámetros siguientes: demanda biológica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), sólidos sedimentables (S. Sed), sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites (G y A), coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), pH y temperatura (T), todos ellos según los métodos estándares descritos por Grasshoff et al. (1999) y el APHA (2012).

Para valorar la posibilidad de tratar los residuales con un sistema biológico, se determinó el índice de biodegradabilidad (IB) con la fórmula más abajo expuesta y siguiendo lo estipulado en la escala de valores mostrada.

$$IB = \frac{DQO}{DBO_5} \quad (1)$$

IB= 1,00-2,50 ----- Biodegradable
 IB= 2,50 - 5,00 ----- Medianamente biodegradable
 IB= 5,00 ----- Poco biodegradable

Con el objetivo de dimensionar las distintas operaciones unitarias que se formulan más adelante, así como la propuesta de materiales a utilizar en las diferentes fases del tratamiento a las aguas residuales que se generan en el proceso de las especies citadas, se abordaron los apuntes de Spellman (2003) y Riffat (2013), así como se tuvo en cuenta la experiencia de especialistas en la temática y personal que se vincula de manera directa en la protección del medio ambiente.

Según la caracterización realizada a los residuales de INDUMAN se obtuvieron los resultados que se señalan en la tabla 1 y que fueron interpretados según la norma de vertimiento NC 521:2007 (2007). Estos resultados apoyaron la propuesta del sistema de tratamiento a implementar en INDUMAN, con objetivo final de obtener algún beneficio tangible, exponiendo así un uso sostenible del agua residual a partir del empleo de microalgas. La propuesta en su conjunto contó con las siguientes operaciones unitarias: tamizado, tanque séptico, cámara de rejillas, foso de bombeo, trampa de grasas, sedimentador primario, tanque de cultivo madre y sistema de lagunas de alta velocidad, sistema parcialmente recomendado por Oscanoa et al. (2020).

Según estos valores, solo cumplen lo establecido por la norma de vertimiento NC 521:2007 (2007) la temperatura, el pH, los S. Sed y los CF, aunque las G y A se presentaron en el límite.

Una vez calculado el IB de los residuales de INDUMAN que fue de 1,8 (biodegradable según escala de valores), se concluyó que es posible poner en práctica un tratamiento biológico a esta industria; de ahí que se formulara el esquema de la figura 2, que se corresponde con los efluentes provenientes de la cocina comedor, así como de las salas de proceso.

Tabla 1. Datos de caracterización de los residuales industriales de INDUMAN

Parámetro	Unidad	Promedio	Rango	LMP NC 521:2007
T	°C	30	22-45	40
pH	u	7,8	6,9-9,6	5,5-9
DBO ₅	mg/L	650	310-880	75
DQO	mg/L	1 200	420-1 990	190
PT	mg/L	7,9	2,2-9,0	5
NTK	mg/L	40,3	11-60	20
S. Sed	ml/30 min	2,5	1-10	10
SST	mg/L	255	200-1 200	75
G y A	mg/L	34	30-80	30
C T	NMP/100 ml	240	200-400	---
C F	NMP/100 ml	110	80-400	400

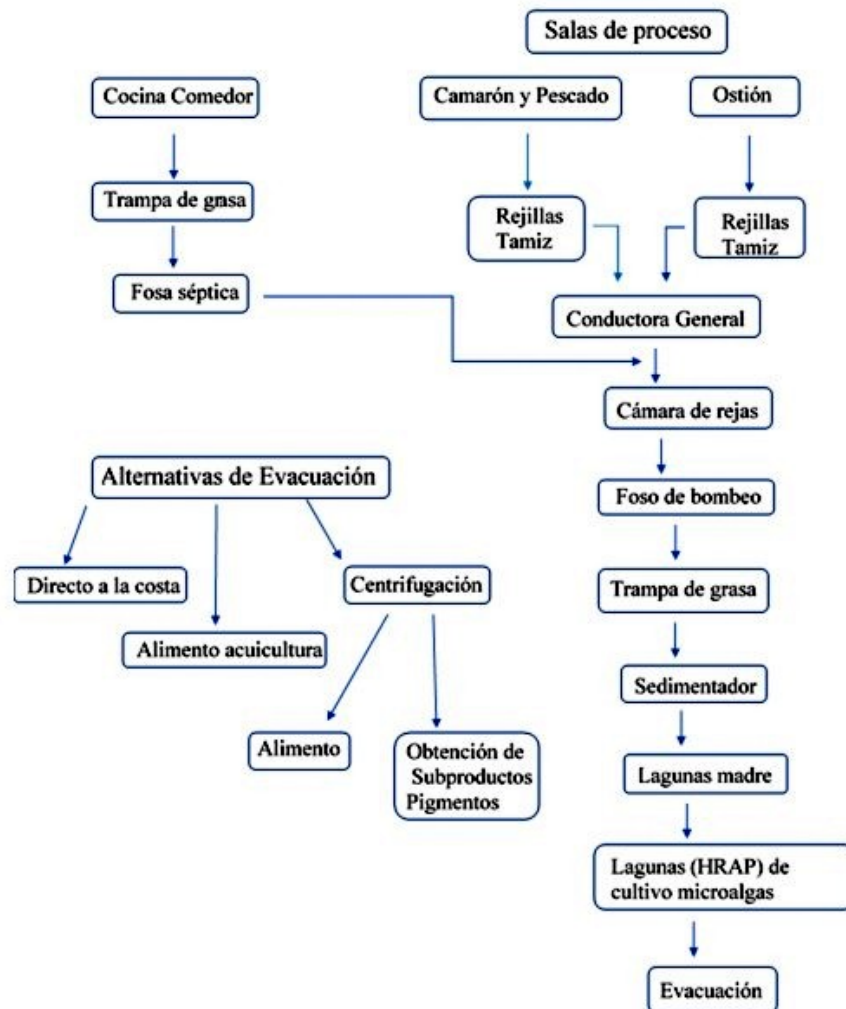


Figura 2. Sistema integral de tratamiento propuesto para los efluentes de la cocina comedor y las salas de proceso de INDUMAN

A continuación, se presentan los esquemas que conciernen a las distintas operaciones a ejecutar en la industria, para darle solución a los residuales de la cocina comedor y las salas de proceso.

RESIDUALES PROVENIENTES DE LA COCINA COMEDOR

En la actualidad, la cocina comedor cuenta con un tanque séptico, el cual posee una trampa de grasa, desconociéndose la frecuencia de limpieza y el destino final del rebose. Además, el estado constructivo se cataloga como deficiente, por lo que se propone su rediseño.

TANQUE SÉPTICO

Para el diseño del tanque séptico se contemplará el volumen de 6 a 8 m³/d, correspondiente al agua residual producida por la cocina comedor. Se recomienda generalmente que el período de retención mínimo sea de 5 d, por lo que la capacidad del tanque séptico propuesto deberá contemplar un volumen no menor de 30 m³.

El tanque séptico dispondrá de dos compartimientos en serie. El primero tendrá 6 m de largo por 3 m de ancho y una altura del agua de 2 m (36 m³). Este diseño permitirá un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 5 d. La segunda cámara será aproximadamente igual a 1/3 del volumen de la primera, por lo que las dimensiones serán de 3 m de largo por 3 m de ancho y la misma altura (2 m).

En la figura 3 se presenta la vista en planta del tanque séptico a diseñar.

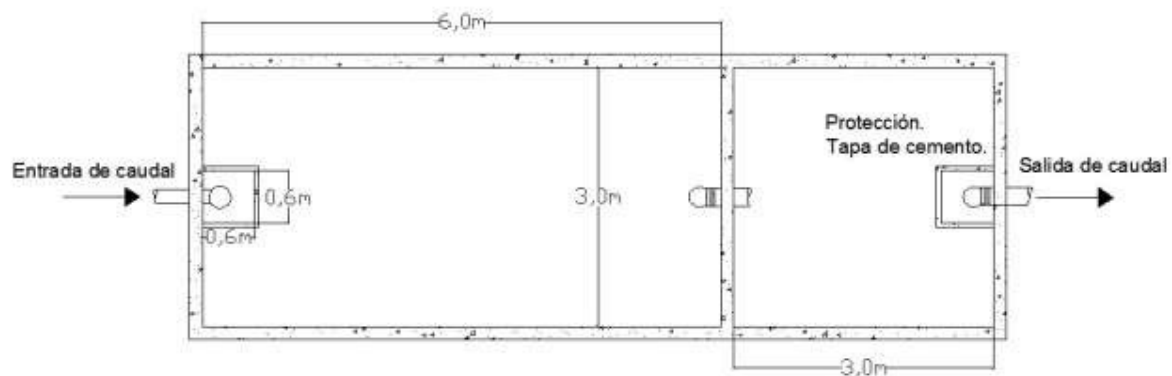


Figura 3. Vista en planta del tanque séptico

RESIDUALES PROVENIENTES DE LAS SALAS DE PROCESO

Las diferentes salas de proceso descargan sus aguas residuales a un canal colector que las evacua hacia la costa, proponiéndose las siguientes operaciones unitarias que mejorarán considerablemente la calidad del efluente por secciones y en el destino final, el mar adyacente.

REJILLAS TAMIZ

Se recomienda que a la salida de las salas de proceso se instalen cestas con tamices que remuevan cualquier material sólido, como restos de exoesqueletos de crustáceos, espinas, guantes o material de desecho de los embalajes que se manipulen y puedan obstruir los canales de distribución del residual. Estos tamices poseen aberturas de las mallas con valores que varían de 2,5 a 6,0 mm y tienen la capacidad de remover mediante el tamizado, entre un 20 y 35 % de sólidos suspendidos de gran tamaño.

CÁMARA DE REJAS

El objetivo de las cámaras de reja es propiciar la retención de toda basura, materiales sólidos, gruesos y en general, todos aquellos desperdicios presentes en el agua que presenten peligros para el buen desempeño de las operaciones diseñadas al respecto. Se ubicará antes del foso de bombeo, en secciones transversales del flujo de agua, a la salida general de los salones de proceso.

Esta cámara de rejillas será doble, con parrillas removibles. Las parrillas deberán ser removibles para facilitar su limpieza. La altura del canal donde se ubicarán las mismas será de 25 cm y el ancho de 35 cm, para un área transversal de 0,088 m².

En la figura 4 se observa una vista frontal de la cámara de rejillas propuesta.

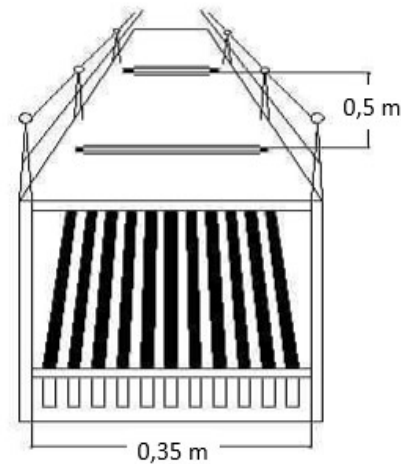


Figura 4. Vista frontal de la cámara de rejillas

FOSO DE BOMBEO

El foso de bombeo (figura 5) tendrá un volumen que permita un flujo de bombeo de 20 a 30 m³/h, considerando un gasto total de 120 m³/d de residual en dos turnos de trabajo y sus dimensiones serán 3,2 m de largo; 3,2 m de altura y 3,0 m de ancho (30,7 m³).

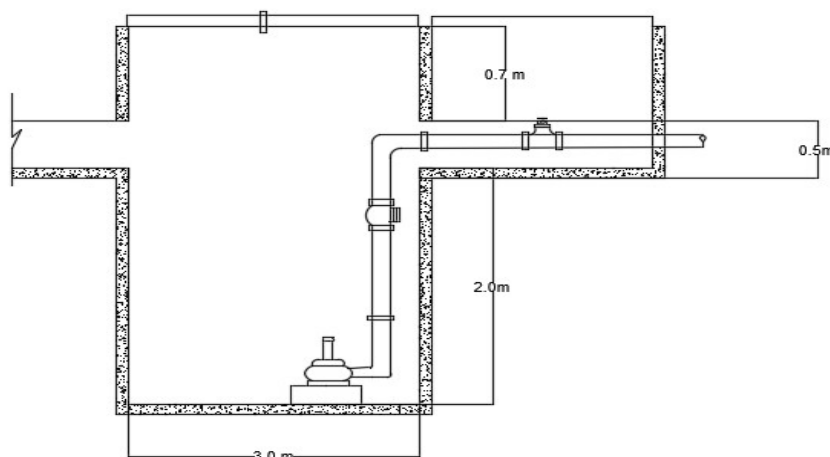


Figura 5. Vista frontal del foso de bombeo

TRAMPA DE GRASA

El tiempo de retención (TR) propuesto, según rango recomendado por Allende (2001) es de 30 min. Considerando unos $10 \text{ m}^3/\text{h}$ de residual, las dimensiones útiles para el agua serán 1,6 m de altura, por 1,6 m de ancho y por 2 m de largo (5 m^3) (figura 6).

Para la construcción de la trampa para grasas, se deberá diseñar la misma, según lo propuesto por CEPIS (2003).

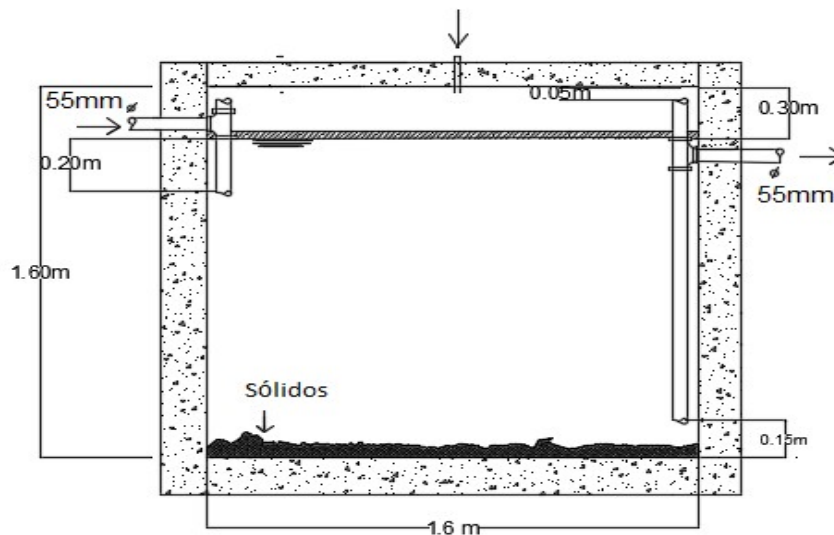


Figura 6. Vista en planta de la trampa de grasa

SEDIMENTADOR

Los sedimentadores primarios son aquellos encargados de recibir las aguas residuales crudas antes de que se produzca el tratamiento biológico. Pueden estar constituidos por cuatro partes: una zona de entrada o estructura hidráulica de transición que permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador, una zona de sedimentación, una zona de salida constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que recolectan el efluente y una zona de recolección de lodos, formada por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados (Dodane y Bassan, 2020).

Para tanques rectangulares, la relación longitud-ancho puede variar entre 3:1 y 5:1; profundidades de agua mayores a 2 m, longitudes menores a los 90 m, anchos de 3 a 24 m y pendientes suaves, 1 o 2 % (OPS, 2005).

Las dimensiones del sedimentador propuesto para INDUMAN serán: 10 m largo, 1,5 m de ancho y 2 m de altura (30 m^3) para un TR de 2 h. La velocidad de flujo será de $0,075 \text{ m}/\text{min}$. El residual remanente tendrá una DBO_5 entre 520 y 620 mg/l y los SST entre 80 y 150 mg/l .

En la figura 7 se plasma la vista en planta del sedimentador que se propone para la depuración de los residuales de INDUMAN.

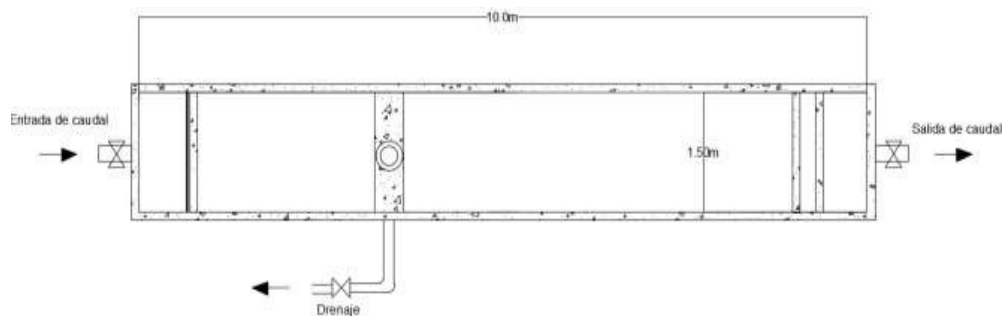


Figura 7. Vista en planta del sedimentador rectangular

LAGUNA MADRE

Es un tanque que servirá para mantener un cultivo madre de algas, que se utilizará como inóculo con *Chlorella* sp en las lagunas de alta velocidad.

La estructura estará dividida internamente a la mitad por un tabique con pasarela para circular las microalgas en ambas partes de los dos tanques propuestos. Estas microalgas se utilizarán para inocular las lagunas de alta velocidad, para facilitar una determinada concentración inicial en cada laguna, que después de seis días de cultivo, podrán ser cosechadas por el método elegido.

Las dimensiones de estas lagunas son las siguientes: largo: 10 m; ancho: 2 m; profundidad: 0,5 m, aunque la altura útil del agua 0,4 m (8 m^3 o 16 m^3 por las dos); volumen total: 10 m^3 y área total: 40 m^2 (20 m^2 por cada una) (ver vista en planta en la figura 8).

El proceso de agitación será por medio de un sistema de ruedas de paletas durante 6-8 h en el horario diurno y la velocidad de agua de 20- 25 cm/seg.

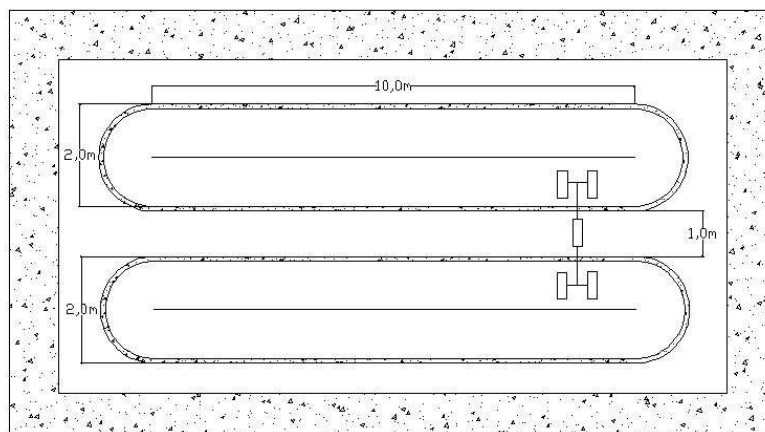


Figura 8. Vista en planta de las lagunas de cultivo madre

LAGUNAS DE ALTA VELOCIDAD PARA EL CULTIVO MASIVO DE MICROALGAS

Las lagunas de alta velocidad recibirán al día los 120 m^3 de residual clarificado procedente del sedimentador. Aquí las algas crecen a su máxima velocidad. El movimiento que se le imprime a la masa líquida facilita la utilización de todo el potencial de nutrientes del medio y de la luz incidente y

no permite la ocurrencia de la sedimentación de microalgas. El TR calculado para que se alcance la biomasa máxima de alga en el residual pesquero es de 5 a 6 d. El volumen de cada laguna será de 120 m^3 aproximadamente y el sistema completo constará de seis tanques, para un volumen total de 720 m^3 . Las lagunas estarán separadas entre sí por una distancia de 1,5 m, para garantizar la instalación de los motores que accionarán los ejes de paletas y permitir la limpieza de las mismas.

Cada laguna poseerá dos canales interconectados, para mantener un flujo lineal en el caldo de cultivo (residual). Esto es necesario para acelerar el crecimiento de las microalgas y obtener mayor biomasa celular en el menor tiempo posible. La velocidad del agua dentro del estanque será no menor de 25 cm/seg y en los extremos de la laguna se colocarán “baffles” o deflectores para evitar la formación de zonas muertas, respecto a la agitación dentro de cada laguna.

Las dimensiones de las lagunas serán: largo: 65 m; ancho: 4 m; profundidad: 0,5 m (altura máxima del agua – 0,45 m); ancho de cada canal: 2 m; volumen útil del agua: 120 m^3 y área: 260 m^2 ($1\ 560 \text{ m}^2$ para las seis lagunas).

Los canales de circulación tendrán un ancho de 2 m y en la zona de viraje, la sección curvilínea del canal de salida será más estrecha (0,9 a 1 m). De esta manera aumentará la velocidad del líquido para evitar la sedimentación de las algas.

La altura exterior de las lagunas será de 0,65 m y dentro de 0,45 m para que las algas puedan aprovechar al máximo la luz solar que le provee la energía para su función depuradora. Cada laguna estará internamente dividida por un tabique que conformará dos canales intercomunicados de 2 m de ancho cada uno, por los que circulará el agua residual con la biomasa algal. En las zonas de viraje, la sección curvilínea del canal será más estrecha de 1,3 a 1,5 m; así se permitirá el aumento de la velocidad de circulación en los extremos y la no sedimentación de la biomasa.

El sistema comprenderá seis lagunas (figura 9 - vista en planta) para una producción mensual aproximada de 2 a 3 t de alga seca, en correspondencia a 120 m^3 de cultivo en el caso de *Chlorella sp.*, en estrecha relación con las condiciones climáticas y de operación del sistema. El residual remanente tendrá una DBO_5 entre 40 y 50 mg/l .

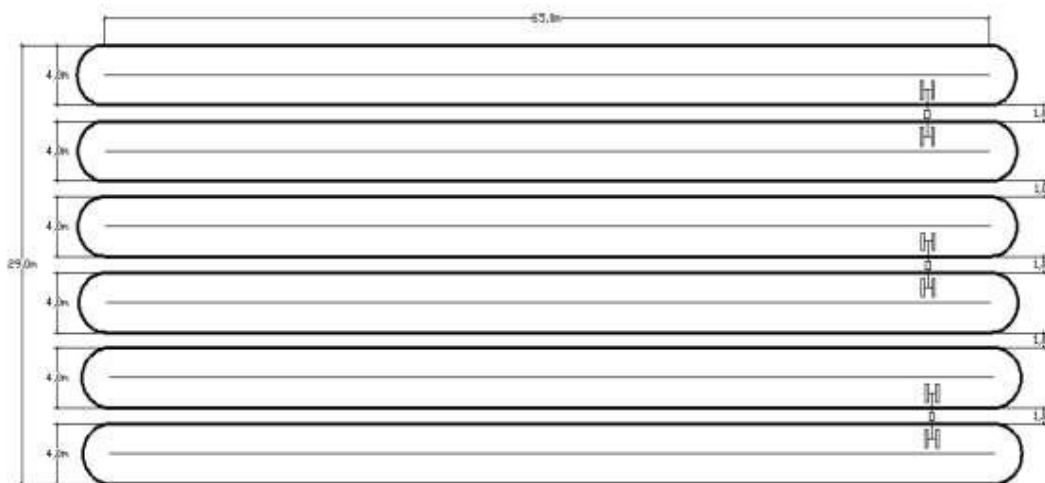


Figura 9. Vista en planta del sistema de lagunas de alta velocidad

Romero L. T. de J. (2005). Uso de la microalga *Chlorella* spp en la depuración de los residuales líquidos de la industria pesquera y su aprovechamiento. Tesis presentada en opción al título de Doctora en Ciencias Técnicas. CIH, Cujae. La Habana, Cuba.

Spellman F. R. (2003). Handbook of water & wastewater treatment plant operations. LEWIS Publishers. A CRC Press Company. TD434.S64. 628.1ç62-200304011. CRC Press LLC. 669 pp. ISBN 1-56670-627-0

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Teresita de Jesús Romero López

<https://orcid.org/0000-0001-9572-8333>

Realizó contribuciones en el diseño de la Investigación, discusión de los resultados y la escritura del informe final.

Gerardo Suárez Álvarez

<https://orcid.org/0000-0001-8943-7134>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y discusión de los mismos, así como en la escritura del documento.