Situación Problema 1: Concentración Salina

Eduardo Antonio Melendres Luna A00831290
José Eduardo de Valle Lara A01734957
Dulce Anilú Cruz Pérez A01275101

24 de Julio de 2022

Introducción

La concentración salina en lagos es un factor determinante para la acuicultura. En esta situación problema se busca modelar y realizar estimaciones sobre la concentración salina que posee un lago como efecto del paso de un río. Dicho río tiene en su camino un lago salobre que posteriormente desemboca en un lago de agua dulce.

En esta actividad se busca modelar y realizar estimaciones sobre la concentración de sal $c_{(t)}[\frac{kg}{m^3}]$ que posee un lago como efecto del paso de un río por un lago salobre primario cuando la trayectoria del mismo ha sido desviada. El problema se asume estacionario para el volumen y área de ambos lagos, de modo que el flujo $f_0[\frac{m^3}{s}]$ del río es estacionario. Inicialmente el lago de agua dulce (lago D) no contiene concentración salina y se conoce la concentración salina inicial del otro lago (lago S), C_0, el cual es estacional. Se busca describir así, la concentración de ambos lagos, $C_{(t)}$ y $c_{(t)}$, en función del tiempo y analizar los parámetros respectivos de posible interés.

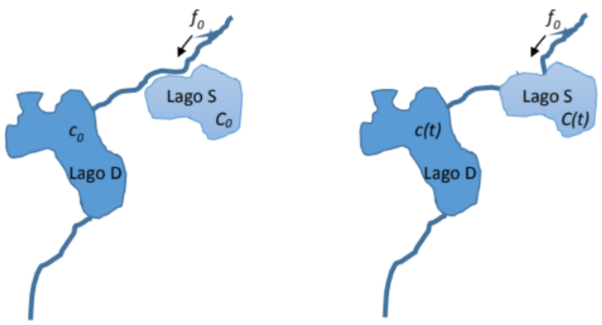

Figura 1: Imagen de los lagos planteados

Marco Teórico

Es importante analizar a detalle las variables involucradas en la acuicultura porque hay especies que requieren condiciones muy específicas de su entorno, las variables a considerar son temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, dióxido de carbono disuelto, pH, dureza del agua, transparencia del agua, enfermedades específicas que afectan a la especie, cantidades controladas de compuestos (amonio, nitritos, nitratos, cloro, etc.). Por eso no se recomienda cultivar más de una especie en un mismo ambiente porque no sería rentable para el negocio, no se alcanzaría la reproducción adecuada ya sea porque una no soporta las condiciones del entorno, porque una especie está acabando con la población de la otra, porque hay enfermedades que son mortales para una, pero para la otra no, entre muchos otros argumentos.

En esta situación problema se solicita modelar la cantidad de sal con respecto al tiempo, así que no se tomarán en cuenta las demás variables de entorno mencionadas anteriormente, son solamente para demostrar que no es viable criar más de una especie en un mismo estanque. En los problemas analizados en clase se encontró que la saturación de sal en el lago S y en el flujo de entrada de salmuera era menor al 0.1 % cuando a 25 °C el coeficiente de solubilidad de la sal es aproximadamente del 36 % [Uruguay Educa, 2019], por lo tanto no hay sobresaturación de la sal y se puede asumir que se trata de una mezcla completamente homogénea tanto en el lago S como en el lago D.

La salinidad de los océanos varía demasiado dependiendo de las regiones, algunos factores que alteran los niveles de salinidad en cuerpos de agua son las lluvias que disminuye la proporción de sal en el agua debido a que la precipitación mezcla el agua dulce con agua salada, los periodos de sequía aumentan la salinidad en extensiones de agua porque la evaporación separa el agua dulce de la salada y la proporción de sal con respecto al agua es mayor, el transporte de masas de agua de otros orígenes también altera la salinidad del lugar [Comisión Europea, 2020]. Es por eso que no es sencillo cuantificar la sal en los mares, porque la densidad del agua varía con respecto a la temperatura [Millán, 2016] y la temperatura hace variar el coeficiente de solubilidad de la sal. Martin Knudsen fue un científico danés que alrededor de 1901 estableció una forma de medir la salinidad en base a la clorinidad promedio del agua del océano, con el tiempo se fue modificando su ecuación, así como la forma de medir la salinidad. Antes de 1978 la salinidad en océanos se medía en partes por mil que puede simplificarse como $\%_0$ o ppt ("parts per thousand" en inglés), donde 1 ppt $= 1\frac{g}{L}$. En 1978 los oceanógrafos plantearon una nueva forma de medir la salinidad mediante la "unidad práctica de salinidad" que se simplifica como psu ("practical salinity unit" en inglés), consiste en la relación de conductividad entre agua del mar y una solución de 32.4256 g de KCl en un litro de agua destilada, la relación de conductividad entre ambas muestras es de 1. Como la psu es la relación de conductividad entre 2 sustancias significa que es una medida adimensional, se dice que la diferencia de salinidad entre una unidad práctica de salinidad y una muestra de agua de cualquier océano es menor a 0.01 %, así que es una medida confiable [Boyd, 2019].

No hay un nivel de salinidad exacto para poder ingresar especies acuícolas en el lago porque todas requieren de diferentes condiciones, de acuerdo con la SAGARPA hay especies que no soportan más de $10\frac{g}{L}$, otras requieren de un rango muy específico como de $20-30\frac{g}{L}$, mientras que otras pueden soportar hasta $44\frac{g}{L}$. Se eligió el Camarón Blanco del Pacífico *Litopenaeus vannamei*, es originario del Océano Pacífico, se puede encontrar desde México hasta Perú. En México los estados que tienen cultivos de esta especie son Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Guerrero, Chiapas, Tamaulipas, Veracruz, Campeche, Tabasco y Yucatán. La temperatura mínima que necesita es de 20 °C y la máxima que puede soportar es de 35 °C, siendo 28 °C la temperatura recomendable, en el caso de la salinidad la cantidad mínima que requiere es de $5\frac{g}{L}$ y $35\frac{g}{L}$ como máximo, donde $25\frac{g}{L}$ es la cantidad de sal recomendable [Castañeda, 2012]. Se recomienda que las dimensiones del lugar de cultivo del camarón blanco del pacífico se encuentren entre 0.2 y 10 hectáreas, y de acuerdo con el Centro de Desarrollo Agroindustrial Turístico y Tecnológico de Guaviare la profundidad mínima que debe tener un estanque piscícola es de 0.5 metros porque a una profundidad menor el agua se calienta con mucha facilidad y ayuda a que proliferen las plantas acuáticas, y la profundidad máxima es de 1.5 metros porque si se supera esta medida se complica mucho pescar a las especies, el mantenimiento es muy costoso y es un desperdicio de espacio [Gonzáles, 2015].

Esas son las consideraciones para mantener un tanque artificial para la acuicultura, pero en esta situación problema se pide modificar la concentración salina de un lago hasta que tenga condiciones aceptables para introducir especies, por eso se tomaron de referencia los datos del Lago Chapala, Lago Cuitzeo y el Río Lerma. El 86 % del Lago Chapala se encuentra en Jalisco y el otro 14 % se encuentra en Michoacán, es el más grande de México, forma parte de la cuenca hidrológica de Lerma-Chapala [Comisión Estatal del Agua Jalisco, 2019] y tiene una capacidad de 8,126,000,000 m^3 [SEMARNAT, 2021]. El Río Lerma es uno de los más grandes de México, atraviesa el Estado de México, Querétaro, Guanajuato, Michoacán y desemboca en el Lago Chapala en Jalisco [Revivamos el Río Santiago, 2017], su caudal es aproximadamente de $24.39\frac{m^3}{s}$ [Garcia et al., 2013].El Lago Cuitzeo es el segundo más grande de México, se encuentra entre las fronteras de Michoacán y Guanajuato, es conocido por tener agua salada, forma parte de la cuenca Lerma-Chapala [Red Mexicana de Cuencas, 2019] y tiene una capacidad de 920,000,000 m^3 [SEMARNAT, 2021]. No hay información exacta sobre su salinidad, lo único que se sabe es que es mayor al 0.5 % o $5\frac{g}{L}$ [Arroyo Sesento and Morales, 2019], pero también se sabe que el agua salobre se encuentra en el rango de 0.05-3 % de sal, si los niveles de sal superan ese intervalo entonces ya es agua de mar [Zarza F., 2022], pero en este caso la salinidad no puede ser superior al 3 % porque se trata de un lago que no tiene conexiones con el océano. Se eligió la salinidad del Lago Cuitzeo al 3 % de concentración ($30\frac{g}{L}$) porque el camarón blanco del pacífico es originario del Océano Pacífico y requiere de niveles relativamente altos de sal donde $25\frac{g}{L}$ es la concentración óptima.

Modelado del sistema

Este fenómeno se puede modelar mediante una ecuación diferencial, es decir, una ecuación donde se presente una razón de cambio. En este caso en particular buscamos el cambio que se presenta en la concentración salina que tienen los dos ríos en cierto tiempo, tomando en cuenta las concentraciones iniciales para cada uno de los cuerpos de agua. El planteamiento del problema nos presenta ciertos datos que nos resultan útiles para su modelación tales como son el hecho de que los volúmenes de los lagos, y por lo tanto el flujo del río, son estacionarios lo que quiere decir que permanecen constantes todo el tiempo. Otros datos importantes son las concentraciones iniciales de cada uno de los lagos, siendo la del lago de agua dulce nula y la del salobre igual a una constante conocida C_0.

La descripción de la problemática nos permite darnos cuenta de qué tipo de razones de cambio existirán en el problema: el lago salobre recibe cierto flujo de agua sin sal, mientras que el segundo lago recibe agua con cierta concentración de sal que viene desde el primer lago; esto quiere decir que mientras que la concentración de sal en el lago S ira bajando, la salinidad del lago D estará aumentando hasta llegar a un punto de equilibrio en donde ambos cuerpos de agua tendrán la misma concentración de sal.

Modelación de concentración salina para lago salobre

Para modelar la concentración salina en cada uno de los lagos nos podemos enfocar en construir una ecuación que exprese la masa de sal en el tiempo de cada lago y al final dividirlo entre el volumen de cada lago para obtener su concentración. Entonces la ecuación para el primer lago, considerando el cambio de la masa de sal en función de tiempo:

$$\frac{dS_{(t)}}{dt} = C_{inS} * f_0 - C_{outS} * f_0 = f_0 * (C_{inS} - C_{(t)}) \tag{1}$$

En donde:

- $\frac{dS_{(t)}}{dt}$ expresa la razón de cambio de la masa de sal en el lago con agua salada con respecto al tiempo
- C_{inS} es la concentración salina del río que entra hacia el lago Cuitzeo (salobre)
- $C_{(t)}$ es la concentración salina del río que sale del lago Cuitzeo (salobre)
- f_0 es el flujo constante, usado para representar tanto el flujo de entrada como de salida.

Teniendo esta ecuación, sabemos que C_{inS} será igual a 0 ya que el río que desemboca en el lago S es de agua dulce. También sabemos que $C_{(t)} = \frac{S_{(t)}}{V_S}$ es decir, la concentración de salida en el lago S es el cociente de la masa de sal que cambia con el tiempo entre el volumen constante del lago Cuitzeo. Entonces la ecuación nos queda:

$$\frac{dS_{(t)}}{dt} = -\frac{S_{(t)}}{V_S} * f_0 \tag{2}$$

Modelación de concentración salina para lago dulce

Ahora toca modelar la ecuación para la concentración en el lago de Chapala (lago D):

$$\frac{dD_{(t)}}{dt} = C_{inD} * f_0 - C_{outD} * f_0 = f_0 * (C_{(t)} - c_{(t)}) \tag{3}$$

En donde:

- $\frac{dD_{(t)}}{dt}$ expresa la razón de cambio de la masa de sal en el lago con agua dulce con respecto al tiempo
- $C_{(t)}$ es la concentración salina del río que entra hacia el lago de Chapala (dulce)
- $c_{(t)}$ es la concentración salina del río que sale del lago de Chapala (dulce)
- f_0 es el flujo constante, usado para representar tanto el flujo de entrada como de salida.

Teniendo esta ecuación, sabemos que tanto $C_{(t)}$ como $c_{(t)}$ serán denotadas como la razón de un flujo constante entre el volumen constante de cada lago del que procede cada concentración salina. De esta manera quedaría que:

$$C_{(t)} = \frac{S_{(t)}}{V_S} \tag{4}$$

$$c_{(t)} = \frac{D_{(t)}}{V_D} \tag{5}$$

Por lo que la ecuación para la razón de cambio de masa salina en el lago D quedaría representada como:

$$\frac{dD_{(t)}}{dt} = f_0 * (\frac{S_{(t)}}{V_S} - \frac{D_{(t)}}{V_D}) \tag{6}$$

Solución del sistema

Ya tenemos planteadas nuestras ecuaciones para obtener la cantidad de sal del lago de Chapala y del lago Cuitzco, solo nos quedan asignarles los valores correspondientes a las constantes las cuales ya habíamos mencionado con anterioridad y sus valores correspondientes serian:

- $f_0 = 24.39\ \frac{m^3}{s}$
- $C_0 = 25\ \frac{kg}{m^3}$
- $V_S = 9.2 * 10^8\ m^3$
- $V_D = 8.126 * 10^9\ m^3$

Con estos datos, sustituiremos las constantes en las ecuaciones (2) y (6) para obtener la cantidad de sal con respecto al tiempo de ambos lagos:

$$S'_{(t)} = -\frac{S_{(t)}}{9.2 * 10^8} * 24.39 = -(2.651 * 10^{-8})S_{(t)} \tag{7}$$

$$D'_{(t)} = 24.39 * (\frac{S_{(t)}}{9.2 * 10^8} - \frac{D_{(t)}}{8.126 * 10^9}) = (2.651 * 10^{-8})S_{(t)} - (3 * 10^{-9})D_{(t)} \tag{8}$$

Para obtener las ecuaciones que representen la masa de sal en los lagos D y S con respecto a un determinado tiempo, se resolverán las ecuaciones (7) y (8) de manera analítica mediante un sistema de ecuaciones diferenciales y el uso de herramientas de álgebra lineal en cuanto a sus valores y vectores propios. Primero agruparemos estas dos ecuaciones en su forma matricial las cuales quedarían de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} S'_{(t)} \\ D'_{(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.651 * 10^{-8} & 0 \\ 2.651 * 10^{-8} & -3 * 10^{-9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{(t)} \\ D_{(t)} \end{bmatrix} \tag{9}$$

Para una mayor comodidad de los cálculos vamos a nombrar la matriz de derivadas como X', la matriz de valores como A y la matriz de incógnitas como X. Es decir, la ecuación (9) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$X' = A * X \tag{10}$$

A partir de aquí resolveremos el sistema de ecuaciones obteniendo los valores propios de la siguiente manera:

$$(A - \lambda I)V = 0$$

$$det(A - \lambda I) = 0$$

$$\begin{vmatrix} -2.651 * 10^{-8} - \lambda & 0 \\ 2.651 * 10^{-8} & -3 * 10^{-9} - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + (2.951 * 10^{-8})\lambda + (7.953 * 10^{-18}) = 0$$

Resolviendo esta ecuación nos dan los valores propios los cuales serian:

$$\lambda_1 = -2.651 * 10^{-8}$$

$$\lambda_2 = -3 * 10^{-9}$$

Si λ es un valor propio de la matriz A entonces existe un vector propio diferente de cero para su correspondiente eigenvalor. Con esta lógica, se calculan los vectores propios para λ_1 y λ_2 sustituyendo sus valores dentro de $|A - \lambda_n I|$. Resolveremos con el método de eliminación de Gauss para poder sacar lo que vale el vector propio.

Para $\lambda_1 = -2.651 * 10^{-8}$

$$|A - \lambda_1 I| = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 2.651 * 10^{-8} & 2.351 * 10^{-8} \end{vmatrix} \xrightarrow{Gauss} \begin{bmatrix} 1 & \frac{2351}{2651} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De esta forma, el vector propio queda de la siguiente manera:

$$V_1 = \begin{pmatrix} \frac{-2351}{2651} \\ 1 \end{pmatrix}$$

Para $\lambda_2 = -3 * 10^{-9}$

$$|A - \lambda_2 I| = \begin{vmatrix} -2.351 * 10^{-8} & 0 \\ 2.651 * 10^{-8} & 0 \end{vmatrix} \xrightarrow{Gauss} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De esta forma, el vector propio queda de la siguiente manera:

$$V_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Habiendo obtenido los valores y vectores propios solo queda obtener la solución general a la ecuación X la cual quedaría de la siguiente manera:

$$X = c_1 V_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 V_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$X = c_1 \begin{pmatrix} \frac{-2351}{2651} \\ 1 \end{pmatrix} e^{-2.651 * 10^{-8} t} + c_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{-3 * 10^{-9} t} \tag{11}$$

Para darles valor a las constantes c_1 y c_2 usaremos el valor de X_0 el cual serian las cantidades iniciales de sal en el lago Cuitzco y en el lago de Chapala, respectivamente, es decir:

$$S_0 = C_0 * V_S = (30\frac{kg}{m^3})(9.2 * 10^8 m^3) = 2.76 * 10^{10} kg$$

$$D_0 = 0$$

Entonces:

$$X_0 = \begin{pmatrix} 2.76 * 10^{10} \\ 0 \end{pmatrix} \tag{12}$$

$$X_0 = \begin{pmatrix} 2.76 * 10^{10} \\ 0 \end{pmatrix} = c_1 \begin{pmatrix} \frac{-2351}{2651} \\ 1 \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$2.76 * 10^{10} = (\frac{-2351}{2651})c_1 + 0c_2$$

$$0 = c_1 + c_2$$

Por lo tanto:

$$c_1 = -3.11 * 10^{10}$$

$$c_2 = 3.11 * 10^{10}$$

Sustituyendo las constantes c_1 y c_2 en la ecuación (11):

$$X = (-3.11 * 10^{10}) \begin{pmatrix} \frac{-2351}{2651} \\ 1 \end{pmatrix} e^{-2.651*10^{-8}t} + (3.11 * 10^{10}) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{-3*10^{-9}t} \tag{13}$$

Gracias a esto podemos saber la cantidad de sal en cada lago separando $X = \left[\begin{smallmatrix} S_{(t)} \\ D_{(t)} \end{smallmatrix} \right]$, entonces:

$$S_{(t)} = (2.76 * 10^{10} kg)e^{-2.651*10^{-8}t} \tag{14}$$

$$D_{(t)} = (-3.11 * 10^{10} kg)e^{-2.651*10^{-8}t} + (3.11 * 10^{10} kg)e^{-3*10^{-9}t} \tag{15}$$

Y para finalizar obtendremos las concentraciones salinas del lago Cuitzco y del lago de Chapala, respectivamente.

$$C_{(t)} = \frac{S_{(t)}}{V_S} = \frac{(2.76 * 10^{10} kg)e^{-2.651*10^{-8}t}}{9.2 * 10^8 m^3} = 30e^{-2.651*10^{-8}t}[\frac{kg}{m^3}]$$

$$c_{(t)} = \frac{D_{(t)}}{V_D} = \frac{(-3.11 * 10^{10} kg)e^{-2.651*10^{-8}t} + (3.11 * 10^{10} kg)e^{-3*10^{-9}t}}{8.126 * 10^9 m^3}$$

$$c_{(t)} = 3.83(e^{-3*10^{-9}t} - e^{-2.651*10^{-8}t})[\frac{kg}{m^3}]$$

Respuesta al problema

$$C_{(t)} = 30e^{-2.651*10^{-8}t}[\frac{kg}{m^3}] \tag{16}$$

$$c_{(t)} = 3.83(e^{-3*10^{-9}t} - e^{-2.651*10^{-8}t})[\frac{kg}{m^3}] \tag{17}$$

Estas son las concentraciones de sal de los lagos Cuitzco y lago de Chapala en función del tiempo. Para un resultado mas visual representaremos gráficamente estas cantidades en una gráfica de concentración salina contra tiempo.

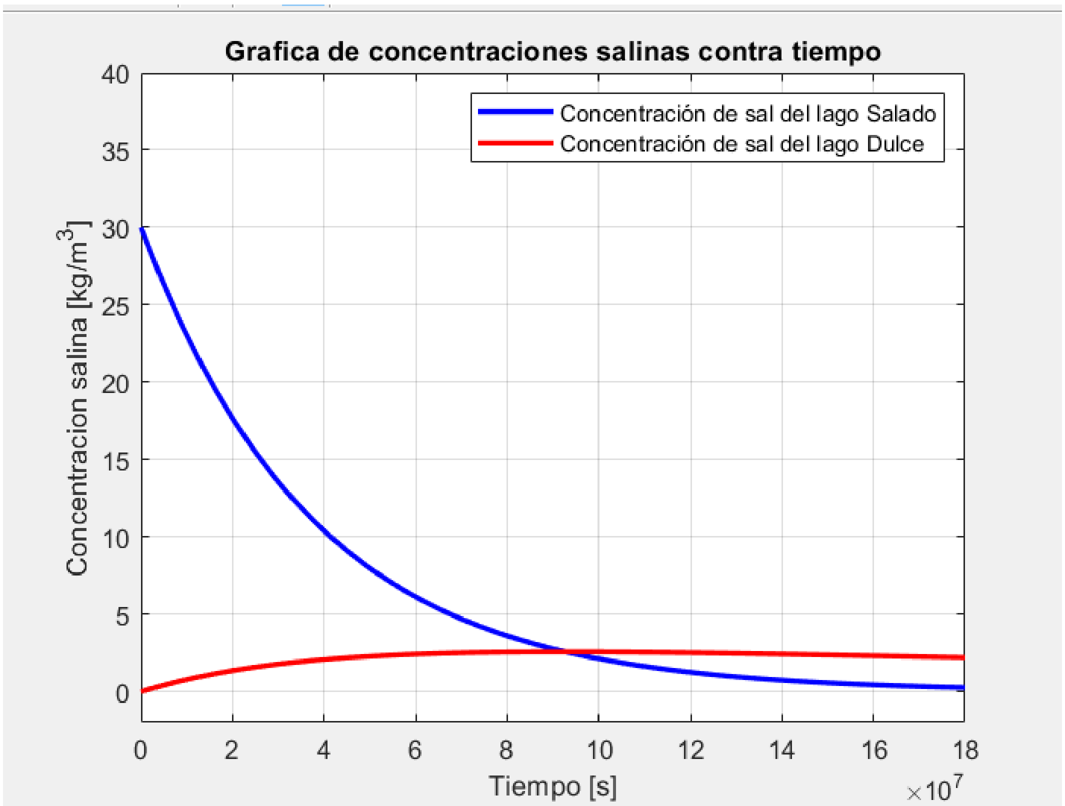

Figura 2: Grafica de concentración salina con respecto al tiempo del lago Cuitzco y el lago de Chapala

Conclusión

A lo largo del trayecto empleado para dar resolución a esta situación problema, pudimos realmente darnos cuenta la aplicación de ecuaciones diferenciales para describir fenómenos del mundo que nos rodea, se logra describir el cambio que ocurre en distintos ambientes gracias a las funciones presentes en el estudio que conocimos en esta materia.

Aterrizando el problema a las condiciones descritas, se pudo obtener un modelo y llegar a una resolución, aplicando valores iniciales que se establecieron gracias a la investigación debida que concordara con una posible situación real. Además gracias a los métodos aprendidos se puedo evaluar para obtener las constantes que describe la ecuación final presentada para cada uno de los lagos y que logra darnos resultados lógicos para presentarlos.

Como se puede ver en los valores finales y las gráficas, se calculó que para alcanzar los 25 g/L de salinidad se necesitan 79.6 días, que nosotros tomamos como 80 para contarlos en días completos y tener una aplicación más exacta. Después de ese tiempo es necesario cerrar el flujo de agua que entra al lago al igual que el flujo que sale de este mismo.

Con esto se termina nuestra resolución para la situación problema, dándonos una demostración que a lo largo de nuestra carrera y vida profesional habrá situaciones presentes como esta que nos pedirá realizar cálculos y demostrar la explicación de ciertos fenómenos.

Referencias

Erick Arroyo Sesento and Rubén Morales. Análisis limnológico del lago de cuitzeo, michoacán, méxico. 05 2019.

Claude E. Boyd. Salinidad en la acuacultura, parte 1, Noviembre 2019. URL https://www.globalseafood.org/advocate/salinidad-en-la-acuacultura-parte-1/.

Francisco Javier Mayorga Castañeda. *SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACION*. SAGARPA, México, D.F., Junio 2012. URL https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/transparencia/transparenciafocalizada/cna-06062012/.

Comisión Estatal del Agua Jalisco. Lago de chapala. https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/#nivel-diario, 2019.

Comisión Europea. La salinidad de los océanos: una herramienta potente para comprender los cambios en el ciclo del agua de la tierra. https://cordis.europa.eu/article/id/422227-ocean-salinity-a-powerful-tool-for-understanding-changes-in-earth-s-water-cycle/es, Septiembre 2020.

Juan Garcia, G. Zarazua, Víctor Díaz-Palomarez, Samuel Tejeda Vega, and Pedro Ávila Pérez. Modelo del transporte y deposición de fe y mn en el curso alto del río lerma. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14:355–367, 09 2013. doi: 10.1016/S1405-7743(13)72249-2.

José Antonio Herrera Gonzáles. Instalaciones para peces de aguas dulces continentales, Abril 2015. URL https://fdocuments.ec/document/introduccion-a-la-produccion-acuicola.html?page=1.

Fernando Millán. Instituto universitario politécnico santiago mariño coordinación de ingeniería química y agronomía prof. f. millán curso de química ii unidad nr. 6: Calidad de aguas potabilizables. https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Millan/publication/305954575_INSTITUTO_UNIVERSITARIO_POLITECNICO_SANTIAGO_MARINO_Coordinacion_de_Ingenieria_Quimica_y_Agronomia_Prof_F_Millan_Curso_de_Quimica_II_Unidad_Nr_6_Calidad_de_Aguas_

Potabilizables/links/57a7343708aefe6167bb0eb4/INSTITUTO-UNIVERSITARIO-POLITECNICO-SANTIAGO-MARINO-Coordinacion-de-Ingenieria-Quimica-y-Agronomia-Prof-F-Millan-Curso-de-Quimica-II-Unidad-Nr-6-Calidad-de-Aguas-Potabilizables.pdf?origin=publication_detail, 08 2016.

Red Mexicana de Cuencas. Lago cuitzeo. https://remexcu.org/index.php/grupos/fichas-informativas-de-lagos/mexico/lago-cuitzeo, 2019.

Revivamos el Río Santiago. Conoce la cuenca. https://riosantiago.jalisco.gob.mx/conoce-la-cuenca, 2017.

SEMARNAT. Área y volumen de almacenamiento de lagos principales. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA01_06&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce, Abril 2021.

Uruguay Educa. Ficha 2: Coeficiente de solubilidad, Noviembre 2019. URL https://uruguayeduca.anep.edu.uy/sites/default/files/inline-files/Ficha\%202_29.pdf.

Laura Zarza F. ¿cuántos tipos de agua hay? https://www.iagua.es/respuestas/cuantos-tipos-agua-hay, Enero 2022.