



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA OSMÓTICA EN RÍOS DE MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
Lic. HUMBERTO JORGE PÉREZ DÍAZ

TUTOR PRINCIPAL
Dra. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTIZ, SISAL UNAM

Ciudad de México, enero de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Silva Casarín Rodolfo

Secretario: Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo

Vocal: Dra. Enríquez Ortiz Cecilia E.

1^{er.} Suplente: Dr. Martell Dubois Raúl

2^{do.} Suplente: M.C. Bárcenas Graniel Juan Francisco

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: POSGRADO DE INGENIERÍA, UNAM, CIUDAD DE MÉXICO.

**TUTOR DE TESIS:
DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTIZ**

FIRMA

Dedicatoria

“A mis padres y hermana”

Agradecimientos

Nadie dijo que fuera fácil y realmente no lo fue. Todo proceso o etapa en la vida tiene un inicio y un final, esta etapa concluye después de dos largos años.

Hay que recordar los inicios cuando el Dr. Juan Luis Francois y su equipo, el día 9 de agosto de 2016 me otorgó una prórroga para entrar al año siguiente (debido a problemas personales). Es a él la primera persona que hago agradecimiento especial por dar la oportunidad de ser parte de esta gran universidad y de este México lindo y querido.

A mi tutora Cecilia Elizabeth Enríquez Ortiz, gracias por apoyarme en todo momento, por su tiempo, por sus conocimientos y sobre todo por confiar en mí.

A Juan Bárcenas por guiarme con sus ideas y estar siempre disponible para cualquier duda, por todas las correcciones y por ser parte de que este proyecto llegara a su fin.

A Rodolfo y Edgar por apoyarme en todo en el Instituto de Ingeniería y hacerme parte del CEMIE-OCEANO, por ser miembros del jurado de esta investigación, ¡gracias!

¡A Raúl Martell por sus correcciones y tiempo dedicado!

A Daynier Escalante (El primo) por ser mentor y guía ya desde hace mucho tiempo. Nunca olvidaré cuando querías llevarme en silla de ruedas a la UNAM y cargarme para cruzar el metro (Yeso en el pie izquierdo). Solo esas ideas salen de un ser como tú.

A mi familia que me ha apoyado siempre en todo momento. En especial a mamá, papá y hermanita.

A Emilio, por ser de los míos, por llegar para quedarte, por aguantar mis locuras y por enseñarme tanto de este México.

A Milenita, Virginia y Luis, Leo y Liset, losmel y Aris. A María Felicia por la ayuda brindada cuando lo necesité.

A Yeny y Ronald, Orestes, David, Néstor, Erick. A Aliet Ascj!"·\$%&/ Amezcua por ser quien me presentó la energía del gradiente salino.

A Osmany, Robert y María, Oscar, Jose Alejandro y familia. A Dyssa, Darysa y familia, ¡Good!

A Daisy por sus correcciones en mi resumen, entre otras cosas. Gracias

A Reynier (Boda) por muchas cosas, pero sobre todo por el gran profesionalismo con el que te mostraste, en el apoyo para esta investigación. Good!

¡A Manuel y Ernesto por la ayuda incondicional y ser hermanos!

A Alexander por tu entrega y dedicación, por ser leal, ¡por ser amigo!

A Bety, por todo lo que hicimos juntos para apoyarnos (...), por tu empuje, tu dedicación y lealtad.

A Daniela y el Yoe, por estar en cada momento al pendiente, ser consejero, amigo y guía.

¡A todos los que de una forma u otra formaron parte de este gran proyecto, a todos GRACIAS!

Resumen

El aumento del consumo de energía eléctrica a nivel mundial asociado al crecimiento demográfico y la actividad industrial impone la necesidad de una producción continua. En México, a partir de compromisos internacionales para reducir la emisión de CO₂, se plantea la obtención de energía mediante fuentes alternativas a los combustibles fósiles. La Energía del Gradiente Salino (Salinity Gradient Energy (SGE)) se puede generar mediante la mezcla controlada de dos masas de agua con diferentes concentraciones de sales. Las desembocaduras de los ríos en el mar son sitios donde esta mezcla ocurre de forma natural y se podría utilizar la potencia osmótica para obtener energía eléctrica. Este trabajo se enfoca en conocer el potencial de energía osmótica en la desembocadura de los ríos Jamapa y Grijalva en el Golfo de México. Para los cálculos de potencial energético se utilizó la ecuación de Van't Hoff, aplicada por Skilhagen et al. (2008) y Bárcenas (2014) y la ecuación de presión osmótica aplicada por Kelada (2010). Se analiza el comportamiento de la salinidad, temperatura y caudal en la desembocadura de los ríos Grijalva y Jamapa y su factibilidad para generar energía osmótica. La variabilidad temporal de la salinidad mantuvo un comportamiento similar al de las precipitaciones en las desembocaduras estudiadas (regido por el período lluvioso de junio-noviembre y el poco lluvioso de diciembre-mayo). La capacidad de obtener energía del río Grijalva de forma estable es mayor que la del Jamapa, debido a la variabilidad del caudal analizado en ambos ríos. Se estima que, si se mantiene una planta funcionando por un período de un año, se llegaría a generar como promedio en el río Jamapa 2.59×10^7 kWh/año y en el río Grijalva 2.5×10^7 kWh/año. El presente trabajo también es una contribución al inventario nacional de energías renovables oceánicas de México.

Palabras claves: Potencial Osmótico, Gradiente Salino, Energía Renovable

Abstract

The rise in the use of electrical energy worldwide associated with a growing population and industrial activity enforces the requirement for continuous production. In Mexico, based on international commitments to reduce CO₂ emissions, energy is sought through alternative sources to fossil fuels. Salinity Gradient Energy (SGE) can be generated by the controlled mixing of two bodies of water with different salt concentrations. The river mouths are places where osmotic power could be used to obtain this type of energy. This research focuses on knowing the osmotic energy potential at the mouth of the Jamapa and Grijalva rivers in the Gulf of Mexico. For the energy potential calculations, the Van 't Hoff equation, applied by Skilhagen et al. (2008) and Bárcenas (2014) and the osmotic pressure equation applied by Kelada (2010) was used. It was determined that the physicochemical properties of the variables studied (salinity and temperature) in the river mouth of the Gulf of Mexico and in the Jamapa and Grijalva rivers are conducive to generating osmotic energy. The temporal variability of salinity maintained a behavior like that of rainfall, at the mouths studied (governed by the rainy season of June-November and the rainy season of December-May). The capacity to obtain energy from the Grijalva river in a stable way is greater than that of the Jamapa, due to the variability of the flow analyzed in both rivers. With the existing bulk data, it is estimated that, if a plant is kept running for a period of one year, it would generate an average of 2.59 x10⁷ kWh/year on the Jamapa River and 2.5 x10⁷ kWh/year on the Grijalva River. However, with more detailed high frequency measurements, it is clear that not only the discharge volume of the rivers, but also the salinity, temperature, and more important, the water column stratification and mixing, has a very important variability at different time scales that would affect the real energy potential of each site. This work is also a contribution to the national inventory of Oceanic Renewable Energies in Mexico.

Key words: Osmotic Potential, Salinity Gradient Energy, Renewable ocean energy

Contenido

Dedicatoria.....	II
Agradecimientos	III
Resumen.....	IV
Abstract	V
Índice de Tablas.....	IX
Índice de Figuras	IX
Índice de Imagen.....	X
Índice de Gráficas.....	XI
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes.....	5
1.1 Antecedentes de la Energía del Gradiente Salino.....	5
1.2 Análisis a nivel molecular de la ósmosis y de la causa que la genera.....	7
1.2 Energía proveniente de la mezcla de agua dulce y agua salada. Energía de Gibbs.....	9
1.1 Tecnologías actuales de generación	10
1.1.1 Osmosis retardada por presión (PRO).....	10
1.1.2 Electrodiálisis inversa (RED)	11
1.1.3 Compresión de vapor	12
1.1.4 Generador hidrocrático.....	12
1.2 Adecuación del aprovechamiento de SGE en la desembocadura de los ríos	13
1.2.1 Intrusión marina o salinización	14
1.3 Definición del término Potencial Teórico.....	15
1.4 Criterio de sitio para plantas de Energía Osmótica.....	18
1.5 Ejemplos de aplicaciones reales (Prototipo de planta: empresa Statkraft).....	21
1.6 Aspectos a tener en cuenta en el proceso de obtención de la Energía del Gradiente Salino en la desembocadura de los ríos.....	22
1.6.1 Hidrodinámica en la desembocadura de ríos. (Influencia de las mareas)	22
1.6.2 Caracterización y cuantificación de sedimentos en ríos	22
1.7 Retos tecnológicos (Análisis de membranas).....	24
1.8 Inversión, previsión de precios y comercialización.....	26
1.12 Impacto ambiental y social.	28
Capítulo 2 Materiales y Métodos.....	29

2.1 Aguas Superficiales y ríos de México	29
2.2 Selección de desembocaduras de ríos (Casos de estudio).....	30
2.2.1 Río Grijalva	30
2.2.1.1 Localización	30
2.2.1.2 Descripción.....	31
2.2.2 Río Jamapa	33
2.2.2.1 Localización	33
2.3 Gestión de datos, Comisión Nacional del Agua.	35
2.3.1 Datos BANDAS (CONAGUA)	35
2.3.2 Estaciones hidrométricas.	36
2.3.3 Estaciones pluviométricas.....	38
2.4 Modelo HYCOM (HYBRID COORDINATE OCEAN MODEL)	39
2.4.1 Formato NetCDF.....	41
2.5 Sistema de Información Geográfico SIATL	41
2.5.1 Definición de las cuencas por medio de SIATL (Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas)	42
2.8 Análisis de datos reales de salinidad, temperatura y densidad en la desembocadura del río Jamapa.	43
2.9 Metodología para la estimación del Potencial Teórico.....	44
2.9.1 Cálculo del potencial energético. Ecuación de Van't Hoff	44
2.9.2 Cálculo de la Presión Osmótica (bar), Potencial (MJ/m ³) y Generación de energía (KWh/año). Kelada 2010.	47
Capítulo 3 Discusión de los resultados.....	50
3.1 Comportamiento y variación temporal de las variables temperatura, salinidad y caudal	50
3.1.1 Río Grijalva	50
3.1.2 Río Jamapa	51
3.2 Comportamiento temporal de la precipitación y el caudal en los ríos analizados.	52
3.2.1 Río Grijalva	52
3.2.2 Río Jamapa	53
3.3 Potencial de Energía Osmótica casos de estudio.....	55
3.3.1 Potencial y Temperatura vs tiempo	55
3.3.2 Análisis temporal del Potencial y la Salinidad vs tiempo	56
3.3.2 Análisis temporal del Potencial y el Caudal vs tiempo.....	57
3.3.3 Análisis temporal del Potencial en el río Grijalva y Jamapa vs Tiempo	58

3.4 Comportamiento y variación temporal de las variables temperatura y salinidad vs Presión Osmótica, Potencial y Generación de energía (Kelada, 2010).....	59
3.4.1 Presión Osmótica	59
3.4.1.1 Río Grijalva	59
3.4.1.2 Río Jamapa	60
3.4.2 Energía Potencial.....	61
3.4.2.1 Río Grijalva	61
3.4.2.1 Río Jamapa.....	63
3.4.3 Generación de energía	64
3.4.3.1 Río Grijalva	64
3.4.3.2 Río Jamapa	65
3.5 Mediciones reales Río Jamapa	66
Conclusiones	71
Recomendaciones	72
Bibliografía	73
Anexos.....	78

Índice de Tablas

1.1 Datos básicos del modelo técnico de la Planta de Energía. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)	16
1.2 Potencial ecológico para las regiones seleccionadas. Regiones GIWA Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)..	20
1.3 Potencial ecológico para Plantas que se basan en PRO. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010).....	20
1.4 Potencial ecológico para plantas PRO con una relación de presión de 0.7. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)	21
1.5 Numeración y abertura de tamices. Fuente CONAGUA 2014.	23
1.6 Resumen de las principales compañías en el poder osmótico. Fuente: Análisis de Kachan & Co.....	27
2.1 Datos de coordenadas, áreas y alturas de la cuenca del río Jamapa. Fuente: (PAMIC, 2017).....	33
2.2 Estaciones hidrométricas operadas por CONAGUA, 2015. Fuente: (CONAGUA, 2016)	36
2.3 Coordenadas de las estaciones Porvenir Centro y El Tejar.	37
2.4 Datos de interés de las estaciones hidrológicas Porvenir Centro y El Tejar.	38
2.5 Características de los ríos estudiados y sus vertientes. Fuente: (CONAGUA, 2016)	38
2.6 Datos de la estación climatológica 30056, El Tejar, perteneciente al estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Fuente: CONAGUA	38
2.7 Datos de la estación climatológica 27096, Porvenir, perteneciente al estado de Tabasco. Fuente: CONAGUA.....	39
2.8 Coordenadas de las mediciones de datos de salinidad y temperatura, desembocadura río Grijalva	40
2.9 Coordenadas de las mediciones de datos de salinidad y temperatura, desembocadura río Jamapa.....	41
2.10 Variables implicadas en el cálculo del potencial energético del gradiente salino.....	45
3.1 Salinidad promedio a 1 km, 10 km y 20 km y a una profundidad de 12 metros de la desembocadura, del río Jamapa	69

Índice de Figuras

1.1 Potencial teórico de energía (MJ) de la mezcla de 1 m ³ de concentración y 1 m ³ de disolución, solución de Cloruro de Sodio a 293 K. Fuente: (Labrecque, 2011)	10
1.2 Vista esquemática de una planta de Energía Osmótica. Tecnología: Osmosis Retardada por Presión (PRO). Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010).....	16
1.3 Regiones con condiciones adecuadas para plantas de energía osmótica con respecto a la desembocadura de ríos. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010).....	19

Índice de Imagen

1.1 Recipiente izquierda separado por membrana semipermeable, agua sin solutos en ambas partes, concentración al 100 %. Recipiente derecho, agua sin soluto en parte izquierda y en parte derecha concentración de agua 80 % y concentración de sal 20%.....	7
1.2 Clasificación de estuarios basado en la estructura vertical de salinidad.	14
1.3 Interior de la primera planta de energía osmótica en el mundo en Noruega. AFP/Getty Images	27
2.1 Ríos de México.	29
2.2 Área de estudio en la desembocadura del río Grijalva. Fuente: Google Earth.....	31
2.3 Mapa de los cauces del río Grijalva. Fuente (Rubio Gutiérrez & Triana Ramírez, 2006)	32
2.4 Distancia desde la estación hidrográfica Porvenir hasta la desembocadura del río Grijalva. Fuente Google Earth	32
2.5 Área de estudio en la desembocadura del río Jamapa. Fuente Google Earth.....	34
2.6 Distancia desde la estación hidrográfica El Tejar hasta la desembocadura del río Jamapa. Fuente Google Earth.....	34
2.7 Distribución espacial de las estaciones hidrométricas. Fuente: (CONAGUA, 2016)	37
2.8 Cuenca definida por el SIATL para el río Grijalva. Fuente: (INEGI, 2010).....	42
2.9 Cuenca definida por el SIATL para el río Jamapa (INEGI, 2010).....	43
2.10 Desembocadura del río Jamapa. En el Sitio 1 se efectuaron mediciones reales de salinidad y temperatura.....	43
2.11 Procedimiento de trabajo desde una lancha en el río e instrumento CTD, recaudación de datos para perfil vertical.....	44

Índice de Gráficas

3.1 Variabilidad temporal promedio de la Salinidad y la Temperatura en la desembocadura del río Grijalva.....	51
3.2 Variabilidad temporal promedio de la Salinidad y la Temperatura en la desembocadura del río Jamapa.....	52
3.3 Precipitación promedio (2001-2015). Estación 27096, Porvenir. Aledaña al río Grijalva.....	53
3.4 Variación temporal promedio del caudal en el río Grijalva (2001-2015).....	54
3.5 Precipitación promedio (2001-2015). Estación El Tejar	55
3.6 Variación temporal promedio del caudal en el río Jamapa (2001-2015).....	56
3.7 Comportamiento del Potencial (Watts) y su correspondencia con la temperatura. Río Grijalva gráfica superior y río Jamapa gráfica inferior.....	57
3.8 Comportamiento del Potencial (Watts) y su correspondencia con la salinidad. Río Grijalva gráfica superior y río Jamapa gráfica inferior.....	58
3.9 Comportamiento del Potencial (Watts) y su correspondencia con el caudal. Río Grijalva gráfica superior y río Jamapa gráfica inferior.....	58
3.10 Comparación del potencial entre los ríos Grijalva y Jamapa.....	59
3.11 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Grijalva.....	60
3.12 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Grijalva.....	61
3.13 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Jamapa.....	62
3.14 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Jamapa.....	62
3.15 Comportamiento temporal de la energía potencial y la temperatura promedio en la desembocadura del río Grijalva.....	63
3.16 Comportamiento temporal de la energía potencial y la salinidad promedio en la desembocadura del río Grijalva.....	63
3.17 Comportamiento temporal de la energía potencial y la salinidad promedio en la desembocadura del río Jamapa.....	64
3.18 Comportamiento temporal de la Energía Potencial y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Jamapa.....	64
3.19 Comportamiento temporal de la generación de energía con un flujo constante de 1 m ³ /s las 24 horas del día los 365 días del año y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Grijalva	65
3.20 Comportamiento temporal de la generación de energía con un flujo constante de 1 m ³ /s las 24 horas del día los 365 días del año y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Grijalva	66
3.21 Comportamiento temporal de la Generación de energía con un flujo constante de 1 m ³ /s las 24 horas del día los 365 días del año y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Jamapa	66
3.22 Comportamiento temporal de la Generación de energía con un flujo constante de 1 m ³ /s las 24 horas del día los 365 días del año y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Jamapa	67
3.23 Lances de CTD en la desembocadura del Río Jamapa efectuados desde el día 28 de junio a las 13:00 hasta el 29 de junio a las 08:00.....	68
3.24 Lances de CTD desembocadura del Río Jamapa. Profundidad, salinidad y densidad del agua.....	69
3.25 Lances de CTD desembocadura del Río Jamapa. Profundidad, salinidad y temperatura del agua.....	70
3.26 Datos de DIVERS cada 10 minutos, desde el día 27 de agosto al 09 de septiembre de 2018, a 3.4 metros de profundidad	70

Introducción

Uno de los grandes retos de la humanidad en los años venideros implica resolver cómo generar energía con eficiencia, pues las fuentes no renovables se agotan rápidamente y el desarrollo de otras energías renovables todavía resulta muy lento. Aunque pudiera afirmarse que en el siglo XXI se dan pasos para resolver esta problemática, la realidad es que de la solución a este enigma dependerá, en gran medida, el futuro de los habitantes del planeta.

En el mundo actual, muy globalizado, el sector de la energía juega un papel preponderante en el desarrollo económico. El Departamento de Energía de los Estados Unidos, ha estimado un crecimiento del consumo de energía mundial del 60% de 1999 a 2020 y también un aumento en la misma proporción en las emisiones de dióxido de carbono debido al incremento poblacional de 6000 a 7500 millones de personas. Por ello el estudio y aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, que en la actualidad representan menos del 10% del consumo energético mundial, se vuelve cada día más importante si se desea un desarrollo sostenible (López de Haro, Energía Azul, 2014).

Ante la creciente demanda de energía a nivel mundial, y los retos por disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera, se impone la necesidad de desarrollar formas alternativas y no convencionales de obtención de energía.

En la segunda década del siglo XXI la humanidad se enfrenta a un mundo necesitado de buscar y desarrollar alternativas energéticas. Con la premisa de mantener el nivel alcanzado en el desarrollo y disminuir los índices de contaminación existentes, no son pocos los que apuestan por adaptarse a las formas no convencionales de obtención de energía.

Entre las fuentes de energía renovables más estudiadas actualmente, se encuentran la energía a partir de biomasa, energía solar, eólica, geotérmica e hídrica. Todas han sido ampliamente abordadas, sin embargo, ninguna constituye por sí sola una solución energética global, se requiere el desarrollo simultáneo de diferentes energías que sean ambientalmente sustentables para lograr suplir los requerimientos energéticos del mundo actual.

México tiene más de 11,000 km de litoral, alrededor de 130 lagunas costeras, más de 3,000,000 km² de mar territorial, y es de los países con más costa por kilómetro cuadrado de superficie, lo cual les confiere a las mismas una importancia indudable. A pesar de ello, el desarrollo y aprovechamiento costeros en México han sido históricamente muy bajos en comparación con la evolución del altiplano. Hasta fechas recientes, la realidad económica y demográfica seguía siendo la de una sociedad que no parecía estar del todo consciente del potencial costero que tiene. En cambio, sus diversos ambientes en el litoral, que sirven de hábitat para numerosas especies y son zonas de reproducción y crianza de varias especies marinas ecológica y económicamente importantes, representan la parte baja de las cuencas, zona donde se acumulan contaminantes diversos (desechos industriales y municipales, agroquímicos, PCB's (**bifenilos policlorados**)). Al mismo tiempo, al ser la interfase entre la tierra y el mar, las costas son ambientes dinámicos pero vulnerables al embate de los

elementos, desde el oleaje, el viento y las mareas, pasando por intervenciones antropogénicas, hasta los efectos de eventos extremos y ahora el acelerado cambio climático.

En México el desarrollo de las energías provenientes del océano, están en fase de investigación en su mayor parte, donde el Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE-OCEANO) es el epicentro de las investigaciones en energía del océano con mayores capacidades para el desarrollo de tecnologías de alto impacto social e industrial, así como con el mayor número de líneas de exploración exitosas en Latinoamérica.

Es precisamente en las costas en combinación con las desembocaduras de los ríos, uno de los sitios donde se puede obtener energía, teniendo en cuenta las propiedades y el comportamiento de determinadas variables. Esta energía, se le conoce como energía azul, surge de la combinación del mar y los ríos, quienes a su vez ya son fuente de energías limpias gracias a las plantas mareomotrices e hidroeléctricas respectivamente. En este caso, la energía del gradiente salino o energía azul, hace uso de la cantidad de energía que es liberada cuando el agua dulce entra en contacto con el agua marina.

La diferencia de salinidad entre estos dos tipos de agua, crean una fuente de energía renovable, cuyo proceso consiste en la permeación de agua con baja salinidad a otra con mucha salinidad bajo grandes presiones. Mientras mayor sea la diferencia salina entre ambas soluciones, se podrá obtener una presión mayor lo cual genera aún más energía.

Uno de los elementos más importantes de esta técnica de producción de energía es una membrana semipermeable especial, que se encarga de separar ambas soluciones y que permite que la cámara que contiene el agua dulce fluya hacia la cámara con el agua salada. Esto aumenta la presión que puede ser utilizada para mover una turbina que genera electricidad. Estas membranas son precisamente, “el talón de Aquiles” de esta forma de obtención de energía, pues se hace muy costosa la fabricación de las mismas a partir de un material que garantice durabilidad y efectividad del proceso.

Existen muchas propuestas para resolver este inconveniente, unas más viables que otras. La energía Osmótica es una técnica de obtención de energía, data de mediados de los años 70, sin embargo, debido a su costo y requerimientos tecnológicos no pudo ser demasiado desarrollada en esa época.

A nivel mundial existen dos plantas piloto, una funcionó en Tofte, Noruega desde 2009, 4 kW, con tecnología ósmosis retardada por presión (PRO) y en Harlingen, Holanda en 2005, 50 kW, a partir de una tecnología de electrodiálisis inversa (RED). La explotación de la energía por gradientes salinos, según sus siglas en inglés (SGE) no se encuentra en un estado avanzado en comparación con otras tecnologías, sin embargo, dada la gran cantidad de energía disponible de esta fuente constituye un nicho con alto potencial de desarrollo especialmente para México, donde existen gradientes salinos favorables tanto en zonas costeras como en agua profundas.

Es por esto que se plantea como **hipótesis** para esta investigación que: El potencial SGE por ósmosis en la desembocadura de ríos en México es sustancial, donde a través de las

metodologías utilizadas por (Kelada, 2010) y (Bárceñas, 2014), en las que utilizan una combinación de ecuaciones físico-matemáticas se puede llegar a este potencial energético.

Algunos estudios efectuados en México, aún no resultan suficientes para obtener una idea clara del potencial de energía derivado del gradiente salino y su uso para generar energía eléctrica. De ahí deriva la importancia de plantear el siguiente **problema de investigación:**

¿Cuál es el potencial de SGE por ósmosis en la desembocadura de ríos en México?

La solución del presente problema puede ser determinado si partimos de la siguiente **idea a defender:**

Haciendo uso de la metodología empleada por (Kelada, 2010) y la de (Bárceñas, 2014), es posible identificar el potencial de SGE por ósmosis en desembocaduras de ríos en México, así como su variabilidad con respecto a las descargas fluviales en las diferentes temporadas del año. Finalmente, a pesar de que es difícil encontrar mediciones de alta resolución temporal en las desembocaduras, señalar con la información con la que se cuenta la gran importancia de contemplar la variabilidad en escala de horas y días que se presenta con respecto a las mareas.

Esta investigación se propone como **objetivo general:** Analizar el potencial de SGE por ósmosis en la desembocadura de ríos de México, por medio de la metodología de Kelada 2010 y Bárceñas 2014.

Con el desarrollo de esta investigación se aporta al cumplimiento de uno de los objetivos de una de las líneas de investigación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE-OCEANO) en los Mapas de Ruta Tecnológica que se plantea: “Identificar los retos y las barreras que enfrenta México para el aprovechamiento sustentable de las energías renovables al 2030”. Como parte de las iniciativas derivadas de la Ley de Transición Energética para fortalecer la operación de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía, la Secretaría de Energía (SENER), a través del Fondo de Sustentabilidad Energética, elaboró los Mapas de Ruta Tecnológica (MRT) para distintas energías renovables, incluyendo geotermia, **energía del océano**, solar fotovoltaica, solar térmica, eólica y bioenergía.

Se plantean como **objetivos específicos:**

1. Determinar el comportamiento de la temperatura y salinidad en la desembocadura de los ríos Grijalva y Jamapa.
2. Evaluar la variabilidad de la precipitación y del volumen de descarga en las áreas de estudio.
3. Cuantificar la presión osmótica, el potencial energético y la generación de energía en las áreas de estudio.

Para dar cumplimiento a estos objetivos fueron concebidas las siguientes tareas de investigación:

1. *Recopilación de la información primaria (Antecedentes) sobre energía osmótica.*
2. *Análisis hidrológico de los ríos con desembocadura al mar persistentes durante todo el año.*

3. *Recopilación de información de salinidad del mar aledaño a los sitios costeros a estudiar.*
4. *Definir sitios de estudio.*
5. *Estudio físico, geográfico y atmosférico del área de interés.*
6. *Determinar una metodología para evaluar el potencial energético del gradiente osmótico.*
7. *Aplicar dicha metodología en el área de interés*
8. *Análisis de los resultados y conclusiones.*

El **objeto de estudio** es: *el potencial de energía osmótica en dos sitios costeros mexicanos.*

Con esta investigación se persigue aportar nuevos conocimientos al estudio del “Gradiente Salino” con énfasis en su potencial energético, con el objetivo de aportar conocimientos previos en las zonas de estudio, dejando un camino trazado ante la posibilidad de implementar plantas generadoras de este tipo de energía. En este sentido, el presente trabajo científico aportará nuevos resultados para los decisores de la Secretaría de Energía y el CEMIE-OCEANO. Se pretende además vincular las variables implicadas en el comportamiento del potencial de energía con las diferentes temporadas climáticas del año, viendo su comportamiento en las zonas de estudio. Se estudian los ríos Jamapa y Grijalva por el alto interés científico, social y ambiental. Además de la disponibilidad de datos existentes para su estudio y las condiciones que presenta para la generación de energía del gradiente salino.

Esta investigación se encuentra estructurada de la siguiente forma:

Introducción y Marco Teórico

Capítulo 1: Antecedentes. Estado del Arte.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

Capítulo 3: Resultados

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Antecedentes de la Energía del Gradiente Salino

Esta forma de energía surge del mar y los ríos, quienes a su vez ya son fuente de energías limpias. La osmótica hace uso de la cantidad de energía que es liberada cuando el agua dulce entra en contacto con el agua marina. La diferencia de salinidad entre estos dos tipos de agua, crean una fuente de energía renovable. Por lo que se hace necesario desarrollar este tipo de tecnología debido a la demanda energética mundial y los planes de reducción de emisiones de CO₂. Al mismo tiempo es imprescindible investigar las zonas más propicias para la instalación de plantas generadoras de energía eléctrica a través de esta tecnología

La ósmosis ocurre en la naturaleza, este fenómeno se descubrió en el siglo XVIII, utilizándose como primera opción una piel de vejiga de cerdo como membrana. Desde entonces hasta la actualidad, se han probado muchos tipos de membranas semipermeables de distintos materiales, siendo éste el elemento más importante de esta técnica de producción de energía, caracterizado por un alto costo, lo cual dificultaba aprovechar esta fuente de energía renovable al máximo.

En estudios realizados por (Pattle, 1954) se describe por primera vez esta forma de energía quien proporcionó información sobre cómo extraer energía del gradiente salino (SGE) mediante el uso de membranas de intercambio iónico (IEM). Pattle armó una pila en la que capas alternas de agua dulce y agua salada se separaron mediante alternancia de membranas catiónicas y aniónicas. De esta manera, fue capaz de realizar una mezcla controlada de las dos corrientes a diferente salinidad, determinando un flujo neto de iones (es decir, corriente iónica) a través de la pila. La corriente iónica se convirtió en una corriente electrónica en un circuito cerrado externo gracias a la presencia de electrodos adecuados en los dos extremos de la pila en presencia de una pareja redox adecuada. De esta manera, el proceso de electrodiálisis inversa (RED) se implementó con éxito por primera vez.

Según (Helfer, Lemckert, & Anissimov, 2013), en dos décadas no hubo ningún suceso significativo en el campo de SGE. No fue hasta la crisis del petróleo en 1973 que comenzó un renovado interés por formas alternativas de energía.

Fue objeto de investigaciones adicionales en 1974 la SGE por parte de Norman, quien describió un sistema basado en el uso de membranas osmóticas. El agua dulce podría penetrar a través de la membrana y mezclarse con el agua salada generando una cabeza hidrostática igual a la diferencia de presión osmótica de las dos corrientes. La cabeza hidrostática luego se convertiría en energía mecánica mediante una turbina hidráulica y eventualmente se convertiría en energía eléctrica mediante el uso de un generador. (Loeb S. , 1975) utilizó el término ósmosis retardada por Presión (PRO) para este proceso.

En estudios realizados por (Loeb S. , 1976) se realizan experimentos PRO utilizando membranas de fibra hueca, aunque los resultados estuvieron lejos de las expectativas teóricas debido a la falta de disponibilidad de membranas PRO adecuadas.

Un número creciente de investigadores dedicaron interés a SGE, desarrollando principalmente actividades de modelización para el análisis del potencial de SGE. (Lacey, 1980) desarrolló un modelo para el análisis del proceso RED. Para que este proceso fuera viable a escala industrial, la conclusión de Lacey indicaba claramente la importancia primordial de mejorar las propiedades de las membranas y su durabilidad, al tiempo que reducía significativamente los costos de fabricación.

(Loeb S. , 1998) realizó otros análisis teóricos que identificaron e investigaron a fondo dos escenarios diferentes para el caso de las soluciones de hipersalina: la producción de energía por medio de PRO en el Mar Muerto en Israel y en el Gran Lago Salado en los Estados Unidos. Curiosamente, para estos casos de referencia, un análisis económico de ingeniería ofreció información detallada sobre los costos esperados de la electricidad producida. Los resultados del modelado mostrados fueron muy prometedores, lo que indica un buen potencial para SGE. (Loeb S. , 2001)

(Post, y otros, 2006) indicaron que la ósmosis retardada por presión parece ser más atractiva para la generación de energía utilizando salmueras salinas concentradas debido a la mayor densidad de potencia combinada con una mayor recuperación de energía. La electrodiálisis inversa parece ser más atractiva para la generación de energía utilizando agua de mar y agua de río. Estas conclusiones son válidas para actuaciones presentes y latentes de ambas técnicas. Para alcanzar potenciales rendimientos, el desarrollo de ósmosis retardada por presión debe centrarse en las características de la membrana, es decir, aumentar la permeabilidad al agua de la piel de la membrana y la optimización del soporte poroso. Sin embargo, el desarrollo de la electrodiálisis inversa debe centrarse en las características del sistema, es decir, en la optimización de la resistencia interna, que está determinada principalmente por el ancho de los espaciadores.

La generación de energía a partir del agua con sus diferentes métodos de implementación, de los cuales se destacan dos grandes ramas: energía hidráulica y energía oceánica. La generación de energía a partir de gradiente salino por ejemplo en 1970 se estimó que esta última forma de energía tiene un potencial global de generación entre 1.4 TW y 2.6 TW (con base en la salinidad promedio del océano y las descargas globales anuales de ríos (Post J. W., 2009). Comparada con otras formas de energía marina, los recursos para la energía por gradiente salino están en el mismo orden que la energía por olas y gradientes térmicos y es 100 veces mayor que la energía por mareas. Además, si se reemplazara la generación de energía existente actualmente con plantas térmicas de carbón, las emisiones globales de gases de efecto invernadero se reducirían en 10 Pg CO₂-eq/año (~ 1010 Ton/ Año), calculado con factores de emisión estándar y eficiencia del 40% de las plantas de carbón (Post J. W., 2009)

1.2 Análisis a nivel molecular de la ósmosis y de la causa que la genera.

Muestra la imagen 1.1 una magnificación a nivel molecular de un recipiente separado en dos mitades por una membrana semipermeable. La magnificación está enfocada a un sector del recipiente, justo donde las dos mitades se encuentran vinculadas por la membrana semipermeable. El recipiente contiene en las dos mitades agua pura sin solutos disueltos (concentración de agua: 100%). Las moléculas de agua, al encontrarse en estado líquido, se mueven en distintas direcciones, y también pasan a través de la membrana semipermeable de una mitad del recipiente a la otra. La probabilidad de que una molécula de agua pase de la mitad izquierda a la mitad derecha es igual a la probabilidad de que otra molécula de agua pase de la mitad derecha a la mitad izquierda. Por lo tanto, el movimiento neto de moléculas de agua es el mismo de una mitad a la otra, manteniéndose la cantidad de agua equilibrada en ambos lados del recipiente. (youbioit, 2018)

Luego se disuelve sal común (Cloruro de Sodio $NaCl$) en la mitad derecha del recipiente. Cuando se disuelve la sal en agua, sus átomos constituyentes (el Sodio y el Cloro) se separan en un ion positivo de Sodio (Na^+) y un ion negativo de Cloro (Cl^-).

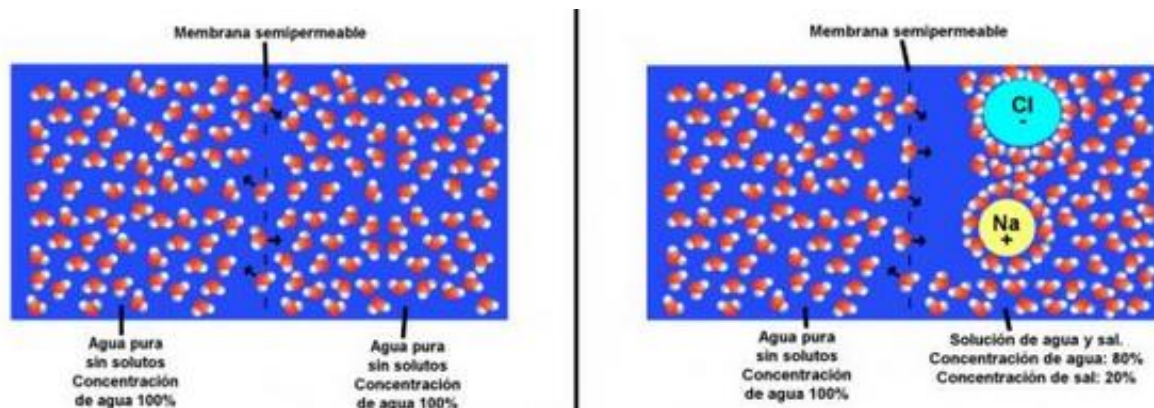


Imagen 1.1 Recipiente izquierdo separado por membrana semipermeable, agua sin solutos en ambas partes, concentración al 100 %. Recipiente derecho, agua sin soluto en parte izquierda y en parte derecha concentración de agua 80 % y concentración de sal 20%. Fuente: (youbioit, 2018)

Los iones de Na^+ y Cl^- no pueden atravesar a la membrana semipermeable, dado que los poros de la membrana son más pequeños que los átomos de Na y Cl . Mientras que las moléculas de agua son más pequeñas que los poros de la membrana semipermeable y pueden atravesarlos. Por eso se dice que la membrana es *semipermeable*, porque es únicamente permeable a un tipo de sustancia (el agua en este caso), mientras que no es permeable a otros tipos de sustancias (la sal en este caso).

Las moléculas de agua (H_2O) están compuestas por dos átomos de Hidrógeno (H_2) y un átomo de Oxígeno (O). Los iones de Na^+ atraen al polo negativo (el Oxígeno O) de las

moléculas de agua y los iones de Cl^- atraen a los polos positivos (el Hidrógeno H_2) de las moléculas de agua. De esta forma, las moléculas de agua rodean a los iones Na^+ y Cl^- , dejando espacios libres como se muestra en la imagen de arriba.

El movimiento de las moléculas de agua genera energía cinética (energía de movimiento). Del lado izquierdo, las moléculas de agua se mueven libremente, sin embargo, en la solución derecha, muchas de las moléculas de agua son atraídas por los iones Na^+ y Cl^- , lo que disminuye su libertad de movimiento y por lo tanto su energía cinética.

Como las moléculas de agua del lado izquierdo se pueden mover más libremente que las de la solución derecha, son muchas más las moléculas de agua que traspasan a la membrana semipermeable del lado izquierdo hacia el derecho, que del lado derecho hacia el izquierdo. Esto no significa que las moléculas de la solución derecha no puedan pasarse a la mitad izquierda del recipiente, de hecho, sí lo hacen, solo que son muchas menos que las que se pasan del lado izquierdo a la solución derecha. Por lo tanto, hay un movimiento neto de moléculas de agua desde la mitad izquierda del recipiente hacia la solución derecha del recipiente.

La sumatoria de la energía cinética de todas las moléculas de agua se percibe como presión (por eso el potencial osmótico y la presión osmótica se miden en unidades de presión como los Pascales). Por lo tanto, como la sumatoria de energía cinética de las moléculas de agua que se mueven del lado izquierdo hacia el derecho es mayor que la sumatoria de energía cinética de las moléculas de agua que se mueven del lado derecho hacia el izquierdo, la presión que ejercen estas moléculas del lado izquierdo sobre la solución derecha es mayor que la presión que ejercen las moléculas de la solución derecha sobre el agua de la mitad izquierda del recipiente.

Entonces, se puede decir que las moléculas de agua del lado izquierdo tienen mayor potencial de movimiento (es decir potencial o capacidad de generar energía cinética) que las moléculas de agua de la solución del lado derecho.

Las moléculas de agua del lado izquierdo que traspasan a la membrana semipermeable, llenan los espacios libres dejados por las moléculas de agua de la solución derecha que rodean al Na^+ y Cl^- . Esto da por resultado el movimiento de agua a través de la membrana semipermeable desde la mitad izquierda del recipiente hacia la solución del lado derecho, lo que se conoce como ósmosis.

Otra forma de explicarlo es decir que en el medio donde no hay moléculas de soluto, tampoco hay moléculas de agua que rodeen a las de soluto y por lo tanto, existe una mayor cantidad de moléculas de agua con la libertad de atravesar a la membrana semipermeable. Por otro lado, en la solución de la derecha, las moléculas de soluto, al atraer a las moléculas de agua, reducen la actividad de estas últimas y su libertad de atravesar a la membrana semipermeable. Es por ello, que la ósmosis, o movimiento de solvente (agua en este caso) ocurre del medio con mayor concentración de solvente al medio con menor concentración de solvente, es decir, del medio con mayor cantidad de moléculas de solvente con la libertad de atravesar a la membrana semipermeable al medio con menor cantidad de moléculas de solvente con la libertad de atravesar a dicha membrana. (youbioit, 2018)

1.2 Energía proveniente de la mezcla de agua dulce y agua salada. Energía de Gibbs.

Como se ha mencionado cuando el río desemboca en el océano, la mezcla espontánea de agua dulce y agua de mar se produce debido a la diferencia en el potencial químico causado por la diferencia en la salinidad. Si se controla la mezcla, la energía libre de Gibbs liberada de esta mezcla se puede convertir en electricidad (Labrecque, 2011)

La energía de Gibbs (G , en Joules) que podría obtenerse teóricamente de la mezcla de una solución concentrada (c) y una solución diluida (d), viene dada por la energía de Gibbs de las soluciones antes de la mezcla y la energía de Gibbs de la solución salobre (b) después de la mezcla.

$$G = (G_c + G_d) - G_b \quad (1.1)$$

Donde la energía de Gibbs de cada solución de electrolito $i = c, d, b$ puede ser descrita por:

$$G_i = -T_i \Delta S_i \quad (1.2)$$

Donde T (en grados Kelvin) es la temperatura absoluta y ΔS es el cambio de entropía de cada solución:

$$\Delta S_i = -V_i m_i R [x_i \ln(x_i) + y_i \ln(y_i)] \quad (1.3)$$

Donde V es el volumen de agua (m^3) involucrado en la mezcla ($V_b = V_c + V_d$), m es el número total de moles en un metro cúbico de solución (mol/m^3), R es la constante universal de los gases ($8.314 J mol^{-1} K^{-1}$), x y y son fracciones molares de iones (ambos cationes y aniones) y agua respectivamente. (Vermaas, Saakes, & Nijmeijer, 2011) Las ecuaciones 1.2 y 1.3 muestran que la energía de Gibbs liberada depende de la salinidad, la temperatura y los volúmenes de las soluciones concentradas y diluidas en la mezcla. La cantidad teórica de SGE de mezclar $1 m^3$ de solución concentrada y $1 m^3$ diluida de NaCl, para un amplio rango de concentraciones en ambas soluciones, a 293 K, se muestra en la Figura 1.1.

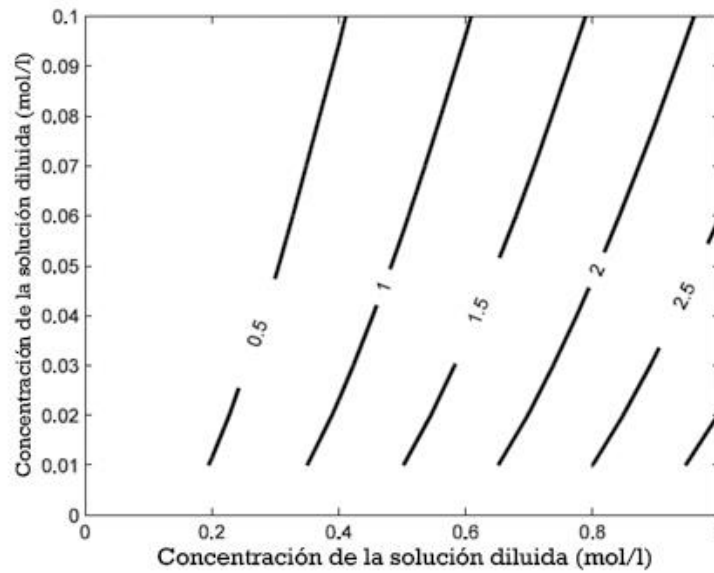


Figura 1.1 Potencial teórico de energía (MJ) de la mezcla de 1 m³ de concentración y 1 m³ de disolución, solución de Cloruro de Sodio a 293 K. Fuente: (Labrecque, 2011)

La concentración de NaCl en el agua de mar es de aproximadamente 0,6 mol/L y la concentración en el agua dulce del río es de aproximadamente 0,01 mol/L. Por lo tanto, el potencial energético teórico de esta mezcla es de 1.8 MJ/m³ de agua dulce.

1.1 Tecnologías actuales de generación

Son varias las tecnologías para la obtención de energía a través del gradiente salino en la actualidad, destacan entre las más estudiadas la ósmosis retardada por presión, electrodiálisis inversa, compresión de vapor y generador hidrocrático.

1.1.1 Ósmosis retardada por presión (PRO)

El primero en reconocer la ósmosis retardada por presión (PRO según sus siglas en inglés), como fuente de energía fue (Loeb S. , 1975). Esta técnica utiliza tecnologías basadas en poner en contacto dos fluidos [agua de río (agua de baja salinidad) y agua de mar (agua de mayor salinidad)] a través de una membrana específica que permite pasar el agua de menor salinidad, pero no las sales. Esto genera una diferencia de presión que puede aprovecharse en una turbina.

(Loeb S. , 1975) señala que era prohibitivo revelar detalles para un sistema de agua dulce - agua de mar. Más tarde (Loeb S. , 1976) y (Wick, 1978) presentaron problemas con las salmueras del Mar Muerto donde se oxidan las membranas semipermeables convencionales disponibles.

En estudios de (Loeb, Honda, & Rali, 1990) avances en la ciencia de la membrana que beneficiaría a PRO tales como:

- Caudales significativamente mayores (del orden de 10x).
- Uso de membranas de vidrio
- Membranas producidas en masa muy reducidos los costos

Se ha realizado un trabajo teórico adicional sobre *Mejoras en la eficiencia mecánica de los subsistemas* (Loeb, Honda, & Rali, 1990) y optimización de la generación de energía PRO según (Seppala & Lampinen, 1999) PRO ha sido sugerido como una producción de energía esquema para el mar muerto. (Loeb S. , 1998)

Con una caída de 400 m y tasas de evaporación de 3 millones de m³/d, la entrega de agua de mar podría producir agua potable por RO antes de descender a través de un Planta PRO cerca del Mar Muerto. Los costos de energía son estimados a \$ 0.058 / kWh. Análisis de una central hidroeléctrica con PRO en el Great Salt Lake sugiere que sería factible usar módulos espirales de membranas. Un escenario tocando el Río Jordan imaginaria una planta de 66 MW con costos de capital de \$ 9,000 / kW y los costos de energía serían \$ 0.09 / kWh . (Loeb S. , 2001)

(Loeb S. , 2002) examinó la producción de energía osmótica entre, agua de río / agua de mar. La economía está en función de los costos de capital en planta y energía producida. Afirma que los costos para las grandes economías de escala están disponibles para una planta PRO a gran escala. Con caudales fluviales del orden de 1.500 millones de m³ / d y costos de energía aceptables de \$ 0.13 / kWh son alcanzables.

1.1.2 Electrodiálisis inversa (RED)

Según (Weistein & Leitz, 1976) proponen la creación de una batería de sal, donde plantean que se puede utilizar una variedad de membranas de intercambio de aniones y cationes alternas para generar energía eléctrica a partir de la energía libre del agua del río y del mar.

La electrodiálisis inversa se ha probado extensamente en condiciones de laboratorio. Una membrana nueva, barata, basada en polímeros eléctricamente modificados del polietileno, le ha dado una nueva oportunidad para su uso comercial. El principal impulsor de esta tecnología es la empresa REDStack, con membranas de FUJIFilm. Un módulo con una capacidad de 250 kilovatios tiene el tamaño de un contenedor. En 2005 una planta de 50 kilovatios se construyó en un sitio de prueba costero en Harlingen, (Países Bajos), operando con éxito.

(Junyong Hu, 2019) desarrolló investigaciones donde se plantean formas de obtención de energía RED, con una sola alimentación de agua proveniente del mar. El método consiste en evaporar el agua a través de una fuente de calor y de esta forma se obtienen diferencias

salinas, para el empleo del proceso de obtención de energía. Lo cual este método da consigo un gasto extra de consumo eléctrico, no siendo del todo ideal.

1.1.3 Compresión de vapor

Fue propuesto primero por (Olsson, Wick, & Issacs, 1979), la técnica explota las diferencias en la presión de vapor de agua y agua de mar para obtener potencia del gradiente en salinidad. El agua dulce se evapora al vacío y se condensa en agua de mar. El flujo de vapor resultante impulsa una turbina. Las condiciones de la turbina son análogas al ciclo abierto OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). Según (Cavanagh, Clark, & Price) la tecnología se ha visto obstaculizada por cuestiones estratégicas y operativas relacionadas con el consumo de agua dulce, un recurso sumamente valioso y escaso en todas partes del mundo. Varios desarrollos prometedores en la compresión de vapor y la destilación son adecuados para la transferencia de tecnología para abordar los desafíos en el enfoque de compresión de vapor para la conversión de energía en gradiente de salinidad. Lo atractivo de las diferencias de presión de vapor es que elimina la necesidad de las membranas y todos los problemas asociados con estas, incluida la degradación de la membrana, el ensuciamiento, etc. No se utilizan componentes. La nueva tecnología en la forma de los condensadores de evaporación de plástico hidrófilo, los compresores compactos, el eyector altamente eficiente, la cámara de vacío no metálica y los bajos costos de construcción ofrecen ventajas para la compresión de vapor.

1.1.4 Generador hidrocrático

Una tecnología patentada, conocida como el Generador Hidrocrático estudiada y desarrollada por (Finley & Pscheidt, 2001), captura la energía libre de mezclar entre dos cuerpos de agua que tienen diferentes concentraciones de salinidad. La tecnología no requiere el uso de ningún tipo de membrana y puede utilizarse para recuperar energía de una amplia variedad de entornos.

Durante las pruebas de un dispositivo de surgencia, se descubrió que la cantidad de flujo de surgencia era superior a la energía puesta en el sistema en términos de cabeza hidráulica y flotabilidad. Al reducir la salinidad en profundidad en la zona afótica, el agua rica en nutrientes podría ser enviada a la superficie del océano, fertilizando así el área inmediata. Los experimentos que utilizaron un dispositivo de surgencia modificado donde se introdujo agua dulce en un tubo vertical en la columna de agua confirmaron que la salida total de energía hidráulica del sistema superaba significativamente la entrada de flotabilidad y la cabeza hidráulica.

El exceso de energía es atribuible a la liberación de energía potencial osmótica al remezclar el agua dulce y el agua salada en el tubo de surgencia. El término generador hidrocrático se aplica al aparato.

El sistema consta de tres componentes: 1) un sistema de inyección de agua dulce, 2) un tubo vertical abierto sumergido en la columna de agua, y 3) un medio para extraer la energía (como una turbina bajo el agua) y entregar la energía a la orilla.

Se introduce agua dulce en el fondo del tubo vertical. El agua fresca o de baja salinidad se conduce a través de un tubo desde un reservorio en la costa. El agua de baja salinidad que está en contacto directo con el agua de alta salinidad entra en un segundo tubo cerrado para formar una mezcla. El segundo tubo, conocido como el "tubo vertical", es un cilindro en el que el fluido está en comunicación con la fuente de agua de salinidad relativamente alta a través de una o más aberturas. El contacto con el agua de mayor salinidad provoca el arrastre y el surgimiento de la mezcla dentro del tubo vertical.

El sistema genera energía mediante un proceso, que explota de manera eficiente el potencial de energía osmótica entre dos cuerpos de agua que tienen salinidades diferentes. El proceso supera limitaciones pasadas, como costosas membranas semi permeables o bioelastómeros especialmente formulados. Un conjunto de pruebas en sistemas a pequeña escala en piscinas de 50,000 litros y en condiciones naturales de agua de mar en un puerto ha validado el concepto. Las pruebas hasta la fecha incluyen la inyección de agua dulce (hasta $5,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$) en tubos con diámetros variables (15 a 60 cm) y longitudes (<6 m) realizadas en un entorno portuario. Los resultados indican una fuerte correlación entre la tasa de agua dulce inyectada y la tasa de flujo que sale del dispositivo. Se ha observado el arrastre de agua de mar, del orden de 10 a 30 veces el volumen de agua dulce.

1.2 Adecuación del aprovechamiento de SGE en la desembocadura de los ríos

La mayoría de las evaluaciones de los recursos disponibles de SGE en las desembocaduras de los ríos se han realizado sobre la base de que todos los sistemas pueden, en principio, utilizarse para la generación de SGE.

En la práctica solo parte de estos sistemas ofrecen condiciones adecuadas. Las restricciones pueden ser para la explotación en las desembocaduras de los ríos con ecosistemas de alto valor donde cualquier perturbación del medio ambiente es intolerable o en sistemas donde las reglas de manejo de los recursos hídricos son incompatibles con la generación de SGE. (Skilhagen, Dugdud, & Aaberg, 2008)

Sin embargo, el requisito principal para determinar la idoneidad de las desembocaduras de río para el aprovechamiento de SGE, es la disponibilidad constante de agua dulce y agua de mar en la distancia mínima. En las desembocaduras con zonas de mezcla extensas, se requieren sistemas de tuberías grandes y costosos para llevar agua dulce y marina desde más allá de la zona salobre hacia la planta de energía, en este caso, las pérdidas por fricción en el sistema de transporte pueden reducir considerablemente la potencia neta de la planta. Además, el costo del sistema de transporte puede hacer que el proyecto sea económicamente inviable. (Stenzel & Wagner, 2010)

Dependiendo de la estructura de la salinidad, las desembocaduras de los ríos se pueden clasificar en: cuña de sal, fuertemente estratificada, parcialmente mezclada y mezclada verticalmente; esta clasificación considera la compensación entre la fuerza de flotación del caudal del río y la fuerza de mezcla de las mareas.

Los sistemas de cuña de sal fuertemente estratificados resultan de descargas de río, altas a medias y de marea baja a media, la estructura de salinidad promedio de esos sistemas tiene una haloclina bien desarrollada con una pequeña variación vertical por encima y por debajo de la haloclina. Por otro lado, el sistema parcialmente mezclada y mezclada verticalmente resulta de descargas de río bajas a medias y rango de marea alto a medio. El perfil de salinidad media aquí tiene una haloclina débil o es prácticamente uniforme desde la superficie hasta el fondo. La cuña de sal y la boca de río fuertemente estratificada ofrecen condiciones más adecuadas para la generación de SGE. Los sistemas de transporte más cortos son factibles debido a la presencia de gradientes de salinidad más altos y más estables. (Valle-Levinson, 2010) Ver Imagen 1.2.

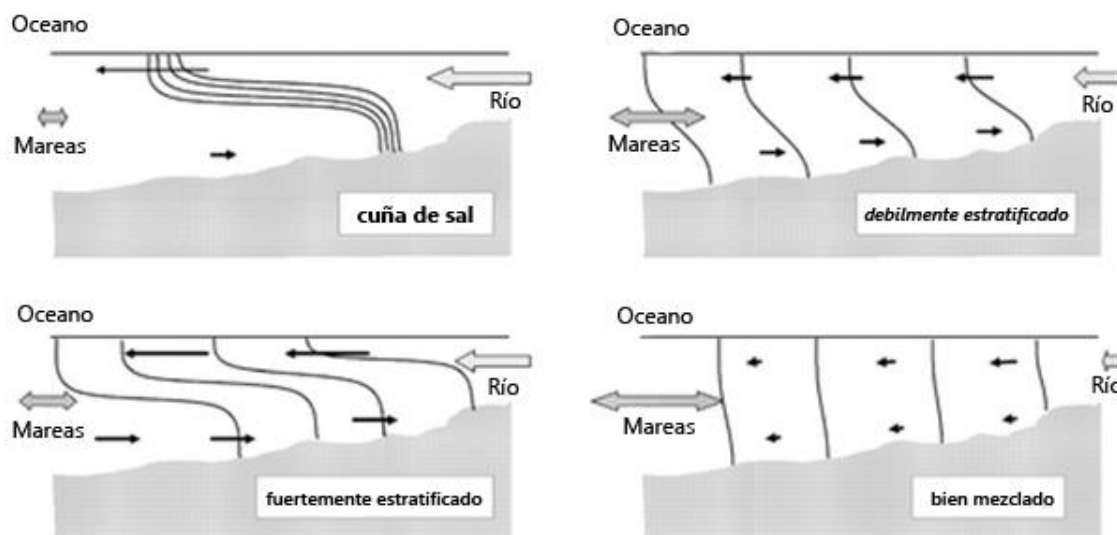


Imagen 1.2 Clasificación de estuarios basado en la estructura vertical de salinidad. Salt-wedge (cuña de sal), Weakly stratified (parcialmente estratificada), strongly stratified (fuertemente estratificada) y vertically-mixed (verticalmente mezclada). Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)

1.2.1 Intrusión marina o salinización

Se considera que las características de un estuario y su grado de estratificación están determinadas por dos factores fundamentales: la descarga de agua dulce, que tiende a mantener la estratificación frente al agua salina que penetra en el curso inferior del río, y la marea, que tiende a producir mezclado turbulento y por consiguiente a reducir la estratificación. La preponderancia de uno de estos factores frente al otro definirá el tipo de estuario y el nivel de mezcla y estratificación existentes en el mismo.

El caudal es un factor determinante en la localización de la cuña, tal como apuntan diversos autores. En general, según (Mendoza, 2004) la cuña salina es expulsada del cauce del río por el flujo fluvial cuando los caudales son superiores a 350-400 m³s⁻¹. A medida que el caudal disminuye, la cuña puede penetrar más hacia tierra: para caudales en torno a 250-350 m³s⁻¹, la cabeza de la intrusión alcanza aproximadamente hasta Migjorn; con caudales de 150-250 m³s⁻¹, la cuña llega hasta el alto topográfico del fondo del lecho de la isla de Gracia y, finalmente, con caudales inferiores a 150 m³s⁻¹, el agua puede llegar hasta Amposta o incluso aguas arriba. Sin embargo, hay que tener en cuenta que estas cifras varían según los distintos autores.

1.3 Definición del término Potencial Teórico

Según (Stenzel & Wagner, 2010) el potencial teórico de una fuente de energía renovable es la energía física máxima utilizable en una región específica durante un período específico de tiempo. Para las plantas de energía de salinidad, el potencial teórico está dado por la Energía Libre de Gibbs de la mezcla. Se calcula asumiendo una mezcla completa e ideal de agua de mar y río. Los parámetros para calcular el potencial teórico son la temperatura y la salinidad del agua de los ríos y los océanos, así como la descarga de agua de los ríos al océano. Se supone que la proporción de mezcla entre el océano y el agua del río es ilimitada debido al hecho de que la descarga de agua del río en el océano es muy pequeña en comparación con el volumen de agua del océano mundial.

En la práctica, solo una pequeña parte del potencial teórico puede ser explotado. Por lo tanto, el potencial técnico tiene en cuenta las limitaciones técnicas del proceso de conversión de energía en las plantas de energía osmótica utilizando un modelo de planta de energía. El potencial técnico es un subconjunto del potencial teórico. La configuración del proceso de la planta de energía osmótica se muestra en la Figura. 1.2. La evaluación de potencial se basa en el concepto de ósmosis retardada por presión (PRO). Los datos de base técnica para calcular la producción neta de una planta de energía eléctrica se resumen en la tabla 1.3. Además de los datos de base técnica para los componentes de la planta de energía, el punto de operación se define por la relación de presión $\Delta p / \pi$ (relación entre la diferencia de presión a través de los módulos de membrana Δp y la presión osmótica media π en los módulos de membrana), el flujo de volumen relacionado (relación entre el océano y el agua del río) y el factor de permeación (relación entre el permeado y el agua del río). Estos valores también se incluyen en la Tabla 1.1. (Stenzel & Wagner, 2010)

La energía eléctrica generada se calcula con el factor de capacidad y la salida de la planta de energía neta. De manera análoga al potencial teórico, el potencial técnico se calcula al considerar la utilización de la descarga completa de agua del río para generar electricidad en las plantas de energía osmótica. La potencia de bombeo para transportar el agua de río y el agua de mar desde los puntos de admisión hasta la ubicación de la planta de energía se descuida.

En la práctica, la potencia de bombeo requerida varía según las condiciones locales. La potencia de bombeo puede ser necesaria para compensar las pérdidas por fricción (en el sistema de transporte o tratamiento previo) o las diferencias de altura. Además de las limitaciones técnicas de la conversión de energía, otro factor muy importante que restringe el potencial técnico es la cantidad de agua de río utilizable. La cantidad de agua que se puede extraer de un río en un sitio específico y, por lo tanto, está limitado por la estabilidad ecológica del río y / o las regulaciones legales.

El potencial ecológico de las plantas de energía osmótica se introduce, por lo tanto, como un subconjunto del potencial técnico que tiene en cuenta las restricciones ecológicas de la extracción de agua.

Para el cálculo del potencial ecológico, se supone que el 10% (factor de extracción) de la descarga media anual a largo plazo es extraíble para su uso en plantas de energía osmótica. Esta estimación se basa en los datos característicos de la descarga de agua estacional de ríos alemanes. El principal criterio para la definición del factor de extracción de agua es que el flujo de agua del río resultante después de la extracción de agua no descienda por debajo de un valor específico.

Ese valor está definido a largo plazo y significa baja descarga de agua del río en el curso de un año característico de descarga media. Adicionalmente, se debe mantener el flujo de agua extraída, debido a un funcionamiento eficiente de la osmótica. Las plantas de energía requieren un flujo de volumen constante en el transcurso de un año para alcanzar factores de alta capacidad. En épocas de alta descarga (generalmente durante el invierno), la extracción de flujos de mayor volumen puede ser lo más ecológica posible, pero por razones económicas, no es razonable diseñar la planta a un valor de descarga máximo que ocurra solo durante unos pocos días de un año. Según (Stenzel & Wagner, 2010), los cambios anuales en el caudal del río no se tienen en cuenta. De acuerdo con las centrales eléctricas de agua de río convencionales, el tiempo de operación, respectivamente, la producción neta de energía podría reducirse durante los años de baja descarga.

El potencial económico de las plantas de energía osmótica tampoco es evaluado en este estudio.

1.4 Criterio de sitio para plantas de Energía Osmótica

En la práctica, solo una parte de los ríos ofrece condiciones adecuadas para la operación de plantas de energía osmótica, teniendo en cuenta consideraciones prácticas y económicas. Para el funcionamiento de estas plantas de energía se requiere agua dulce y salada. Las zonas de mezcla intensiva (zonas de agua salobre) deben evitarse en la entrada de las instalaciones. La estructura de la distribución salina se caracteriza por el tipo de desembocadura. De acuerdo con (Wolanski, 2007), los ríos pueden clasificarse en estuarios de tipo salinos y fiordo bien mezclados y parcialmente mezclados. Los estuarios bien y parcialmente mezclados se pueden encontrar generalmente en regiones con un rango de marea enorme. Hay una mezcla intensiva de agua de río y mar y la distribución de la salinidad es muy variable. El gradiente de salinidad del estuario es horizontal. Para alcanzar áreas de admisión adecuadas más allá de la zona de agua salobre, se requiere un sistema de tuberías grande y costoso para el transporte de agua (flujos de alto volumen). En estos casos, los costos para el sistema de transporte podrían dominar los costos generales de la planta de energía osmótica, haciendo el proceso económicamente no viable.

Algunos de los estuarios bien mezclados son los ríos del Mar del Norte, el Rin y el Elba, o los ríos en la costa atlántica, por ejemplo: el Sena, debido a la necesidad de un extenso sistema de transporte de agua, los estuarios bien y parcialmente mezclados no suelen ser adecuados para la operación de plantas de energía osmótica. El Amazonas es otro ejemplo con una amplia zona de agua salobre de más de 150 km. Excluyendo este río de las consideraciones potenciales en todo el mundo, los valores potenciales se reducen en un 15% debido a la alta proporción de acuerdo con la descarga total en todo el mundo. Los estuarios de cuña de sal son típicos de las regiones con un bajo impacto de las mareas. Se caracterizan por un gradiente de salinidad vertical distintivo y una mezcla reducida de agua de río y mar. Algunos ejemplos de estuarios de cuña salada son el Mississippi o el Ródano (Francia). Los ríos de tipo fiordo también se caracterizan por un gradiente de salinidad vertical. La mezcla entre el río y el agua de mar se produce solo en las capas superficiales. Los fiordos suelen ser muy profundos y las capas más profundas no están influenciadas por los procesos de mezcla. Ambos tipos de río ofrecen las adecuadas condiciones para las plantas de energía osmótica debido a sus condiciones de salinidad estables y la viabilidad de un sistema de transporte más corto debido a sus gradientes de salinidad verticales. (Stenzel & Wagner, 2010)

Las regiones adecuadas con respecto al tipo de desembocadura de río como plantean (Stenzel & Wagner, 2010) se muestran en la Figura 1.3. Se incluyen las regiones con poco impacto de marea donde se supone que los estuarios de cuña salina son predominantes, por ejemplo, el Mar Mediterráneo, el Golfo de México o las regiones con mayormente estuarios de tipo fiordo, por ejemplo, Noruega y el mar de Nueva Zelanda. Para las regiones seleccionadas en la Figura 2, el potencial ecológico se calcula en función de los datos de flujo regional. La clasificación regional se basa en las Regiones que integran la Evaluación Mundial de Aguas Internacionales, según sus siglas en inglés GIWA para obtener más información sobre las Regiones GIWA, ver (GIWA, 2019). Los valores potenciales se calculan en base a los datos de base técnica en la Tabla 1.1 sección 1.3. Los resultados se resumen en la Tabla 1.2.



Figura 1.3 Regiones con condiciones adecuadas para plantas de energía osmótica con respecto a la desembocadura de ríos. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)

El potencial ecológico total para las regiones seleccionadas asciende a 15 GWe o 122 TWhe/a. Teniendo en cuenta solo los sitios adecuados para las plantas de energía osmótica con respecto al tipo de desembocadura de río, el potencial se reduce en comparación con el potencial mundial total (ver Tabla 1.3 y 1.4). Debe mencionarse que no todos los ríos en las regiones seleccionadas ofrecerán las condiciones adecuadas para las plantas de energía osmótica (p. Ej., Misisipi: gran carga de partículas, delta muy plano y ancho) y también habrá ríos en otras regiones que no se consideran aquí que ofrezcan los recursos y condiciones adecuados. Suponiendo una relación de presión aumentada ($\Delta p / \pi = 0.7$), el potencial ecológico aumenta (22 GWe, respectivamente, 180 TWhe/a).

Tabla 1.2 Potencial ecológico para las regiones seleccionadas. (Regiones GIWA) según la Fig. 2 Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)

Nr. Región GIWA		Potencial Ecológico	
		(GW _{el})	(TWh _{el/a})
1	Ártico	4,5	36
2	Golfo de México	2,0	16
38	Plataforma Patagónica	1,7	13
25	Golfo de Alaska	1,3	10
21	Mar Mediterráneo	0,8	7
39	Corriente de Brasil	0,7	6
11	Mar de Barents	0,7	6
64	Corriente de Humboldt	0,6	5
9	Plataforma de Terranova	0,6	5
63	Mar de Tasmania	0,5	4
28	Mar de Bering del este	0,5	4
33	Mar de Japón	0,4	3
29	Mar de Bering del oeste	0,2	2
12	Mar Noruego	0,2	2
14	Plataforma de Islandia	0,1	1
15	Plataforma de Groenlandia del este	0,1	1
16	Plataforma de Groenlandia del oeste	0,1	1
4	Islas del Caribe	0,1	1
Total		15,2	122

Tabla 1.3 Potencial ecológico para Plantas que se basan en PRO. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)

Continentes	Potencial Ecológico	
	(GW _{el})	(TWh _{el/a})
Europa	5	39
Africa	6	50
Asia	21	166
América del Norte	10	79
América del Sur	20	159
Australia*	3	24
Global	65	518
*Incluye Oceanía		

Además del tipo de desembocadura de río, otros criterios secundarios que determinan la idoneidad de las plantas de energía osmótica son la salinidad de los cuerpos de agua (las aplicaciones en regiones con agua de mar de baja salinidad, por ejemplo, el Báltico o el Mar Caspio están restringidas), la composición del agua (ríos con una alta carga de partículas o un alto potencial de bioincrustación requeriría un tratamiento previo intensivo y la disponibilidad general de agua).

Tabla 1.4 Potencial ecológico para plantas PRO con una relación de presión de 0.7. Fuente: (Stenzel & Wagner, 2010)

Continentes	Potencial Ecológico	
	(GW _{el})	(TWh _{el} /a)
Europa	7	58
Africa	9	74
Asia	30	243
América del Norte	14	115
América del Sur	29	232
Australia*	4	35
Global	95	757
*Incluye Oceanía		

En México se ha identificado una oportunidad importante en relación a los sitios potenciales de aprovechamiento de esta fuente de energía, donde de los principales objetivos a resolver destaca: desarrollar tecnología efectiva que sea competitiva con respecto a otras renovables como la eólica o la solar. (SENER, 2017)

1.5 Ejemplos de aplicaciones reales (Prototipo de planta: empresa Statkraft)

La empresa noruega Statkraft es pionera en este campo, habiendo puesto en marcha en 2009 la primera planta prototipo de este tipo de energía en Tofte, al sur de Oslo, localizada en un área industrial con una amplia disponibilidad de agua dulce y agua marina. Ambos tipos de agua son alimentados a la planta prototipo mediante tuberías equipadas con filtros para retener humus y partículas que podrían obstruir la membrana. El módulo de membranas es el corazón de la planta. La membrana utilizada es polimérica y se dispone enrollada en cilindros metálicos a presión. El prototipo tiene instalados unos 2,000 m² de membrana. El resto de equipamiento se puede resumir en tuberías, válvulas y bombas para conducir el agua, una turbina Pelton para generar electricidad, intercambiadores de presión y sistemas de purificación del agua y de limpieza de las membranas. El prototipo se dimensionó para 10 kW y se esperaba que estuviera operativo unos 2-3 años. El área clave actualmente es el desarrollo de membranas más eficientes. La membrana usada inicialmente tenía una capacidad inferior a 1 W/m², cuando el objetivo del prototipo es alcanzar valores de 5 W/m². Según la empresa, la siguiente fase será la construcción de una planta piloto de 1-2 MW, para luego construir una planta osmótica a gran escala (con estimaciones de que podría ponerse en marcha en 2015). (Morales, 2010)

(Kelada, 2010) evalúa el potencial de energía osmótica de agua de mar, basado en prácticas sólidas de ingeniería y sin prejuicios ni emoción. Se intenta analizar los pocos puntos de datos publicados por la prueba osmótica de Statkraft en Noruega y postular aún más un escenario para generar energía osmótica del río Mississippi.

En el 2014, Holanda se anotó en la historia como el primer país en alojar una planta comercial de Energía Azul para producción de energía, aunque esta serviría más como una prueba de lo que podría ser el futuro de las energías renovables. El objetivo principal era averiguar la capacidad real de este método de obtención de energía en una pequeña escala.

1.6 Aspectos a tener en cuenta en el proceso de obtención de la Energía del Gradiente Salino en la desembocadura de los ríos.

Las condiciones para la generación de energía proveniente del gradiente salino, son afectadas por fenómenos y procesos tanto naturales como antropogénicos. Aspectos relacionados directamente con el clima que se derivan en falta o en un incremento notable del caudal, debido a la disminución o incremento de las precipitaciones. Aguas contaminadas y con presencia de agentes extraños en las mismas también pueden incidir en una reducción de la eficiencia del sistema a la hora de generar energía en las plantas destinadas a dicho proceso.

1.6.1 Hidrodinámica en la desembocadura de ríos. (Influencia de las mareas)

La simultaneidad y variabilidad temporal de los agentes naturales y la diversidad de las acciones humanas producen una amplia gama de regímenes hídricos. En un extremo aquellos relacionados con la escasez de recurso agua dulce y en el otro los provocados por las avenidas del río y los temporales en la desembocadura. Cuando el caudal de agua dulce del río es bajo, la dinámica está dominada por la acción mareal y se denomina régimen de caudales bajos. En el régimen de dominio fluvial (se corresponde con la presencia de grandes avenidas), la dinámica fluvial controla la circulación de agua y sustancias, la erosión del cauce y los procesos asociados a la marea, salinidad y turbidez, se subordinan a aquella. Entre ellos dos se reconoce el régimen mixto fluvial-mareal en el que la dinámica transita, sin discontinuidad entre aquellos dos regímenes. Estos aspectos se deben tener en cuenta la hora de analizar el comportamiento de las variables implicadas en el proceso de obtención de energía por ósmosis en la desembocadura de los ríos

1.6.2 Caracterización y cuantificación de sedimentos en ríos

(CONAGUA, 2014) apunta que desde el punto de vista fluviomorfológico de los ríos, para lograr un buen entendimiento de su funcionamiento, se necesitan considerar y cuantificar a los sedimentos que son acarreados por el cauce. Su tipo, su tamaño (granulometría) y la

manera en que se distribuyen, juegan un papel significativo en la estabilidad y escurrimiento de los mismos. Es muy común que obras hidráulicas fallen o no funcionen como son diseñadas por no tomar en cuenta la influencia de los sedimentos, y el hecho de que por los ríos no solo circula agua, sino que se mueven y distribuyen también partículas sólidas.

Los ríos son elementos naturales que no pueden ser tratados como una estructura rígida e inerte de la ingeniería civil, como podría ser un puente o una carretera. El río tiene una dinámica fluvial y una interacción con el medio que lo ayuda a establecer un equilibrio natural entre él y las condiciones hidráulicas y sedimentológicas que lo rigen. Así cuando una de estas componentes se altera, el río sufre un desequilibrio y tiende a modificar sus condiciones de escurrimiento, lo que trae como consecuencias cambios en su geometría que ocasiona en la mayoría de los casos inundaciones.

La caracterización de los materiales para los suelos no cohesivos consiste en determinar su tamaño representativo. Para tal fin se lleva a cabo el análisis granulométrico, en el cual el material se separa y clasifica por tamaños. Existen diferentes procedimientos que permiten conocer la distribución granulométrica de un suelo; en el caso de los suelos formados de partículas gruesas el procedimiento más común es el de tamizado. El análisis granulométrico por tamizado se realiza con partículas de suelo retenidas de hasta un tamaño de 0.074 mm, y consiste en hacer pasar el suelo a través de un juego de tamices con aberturas conocidas. Así, el tamaño o diámetro de la partícula queda definido por la dimensión lateral o lado de la abertura cuadrada del tamiz, por donde no alcanza a pasar. Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0.074 mm, se utiliza el método de análisis mecánico por tamizado mediante tamices de abertura y numeración indicada como se muestra en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Numeración y abertura de tamices. Fuente CONAGUA 2014.

Malla No.	Abertura (mm)	Tipo de suelo
$\frac{3}{4}''$	19.050	Grava
$\frac{1}{2}''$	12.700	
$\frac{3}{8}''$	9.520	
$\frac{1}{4}''$	6.350	
4	4.750	Arena gruesa
8	2.380	
10	2.000	Arena media
16	1.190	
20	0.840	
30	0.590	
40	0.420	
50	0.279	
60	0.250	Arena fina
100	0.149	
200	0.074	

Estas propiedades existentes son de gran importancia a tener en cuenta para la obtención de energía por ósmosis retardada. Las propiedades físico-químicas y el desequilibrio que pueden alcanzar las aguas de un río, (debido a las condiciones hidráulicas por eventos

meteorológicos) estas pueden incidir de forma negativa sobre las tuberías y filtros instalados en las plantas de generación de energía. Las membranas semipermeables utilizadas en estos procesos se ven seriamente afectadas por los eventos inmersos en la calidad del agua.

1.7 Retos tecnológicos (Análisis de membranas)

Las membranas se encargan de separar ambas soluciones que permite que la cámara que contiene el agua dulce fluya hacia la cámara con el agua salada, lo que aumenta la presión que puede ser utilizada para mover una turbina que genera electricidad.

Este elemento era el principal obstáculo por el alto costo, pero en los últimos años ha surgido una nueva técnica basada en plástico eléctricamente modificado que ha abaratado sus costos de producción, lo cual ofrece una nueva oportunidad a la energía azul. (López de Haro, 2014)

Una de las grandes limitaciones actuales en la comercialización de plantas osmóticas para generar energía eléctrica, radica en las membranas. Por una parte, el bajo flujo de agua que proporcionan las membranas convencionales más eficientes encarece considerablemente el costo de inversión de una planta de proceso PRO. Por otra parte, el ensuciamiento de las membranas reduce de forma importante su permeabilidad, lo que hace necesario un pretratamiento de las aguas que alimentan el proceso, con la consiguiente pérdida de su eficacia global. De forma análoga, el proceso RED también está muy limitado por la eficiencia de las membranas de intercambio iónico utilizadas en la actualidad, con potencias específicas (W/m^2) muy bajas, y con ello poco competitivas frente a otras alternativas comerciales. Las membranas comerciales actuales, generalmente de poliamida, utilizadas para procesos de ósmosis, presentan una estructura en capas que da lugar a una resistencia importante al paso de agua (baja permeabilidad), que se traduce en una baja potencia específica (W/m^2) para generar energía eléctrica en un proceso PRO. Por ello, en los últimos años se está haciendo un gran esfuerzo, a nivel de I+D, para encontrar y desarrollar una nueva generación de membranas selectivas capaces de proporcionar altos flujos de agua y alta selectividad frente a componentes de una disolución. (Delgado Díaz, 2017)

Los estudios más prometedores sobre membranas de nueva generación se han orientado principalmente a dos líneas de trabajo:

- El uso de la nanotecnología y los nuevos materiales en la fabricación de membranas específicas.
- El estudio de las membranas celulares para fabricar membranas biomiméticas que tengan un comportamiento semejante a las naturales.

En el primer grupo figuran estudios de laboratorio con membranas a base de grafeno con nanoporos artificiales, o el uso de nanotubos de carbono o de nitruro de boro que actúan como canales iónicos. El paso de iones a través de estos nanoporos genera una corriente eléctrica aprovechando el gradiente salino de dos líquidos de distinta salinidad separados por la membrana con nanoporos, con eficacias del orden de hasta 1000 veces superior a las membranas convencionales actuales. (Suk & Aluru, 2010) (Drioli & Macedonio, 2012)

Debido al gran avance en la ciencia de los materiales, se ha conseguido plástico modificado eléctricamente del polietileno, que por su bajo costo ha dado un nuevo impulso a la investigación y aprovechamiento de este tipo de energía. (Redacción, 2017)

Recientemente se han aportado resultados de experimentos de laboratorio con una membrana muy delgada de disulfuro de molibdeno, de unos tres átomos de espesor, provista de unos nanoporos de dimensiones controladas, interpuesta entre dos disoluciones salinas de diferente concentración. Los datos obtenidos mostraron que este tipo de membrana es capaz de proporcionar potencias específicas muy superiores a las conseguidas con las membranas convencionales actuales. Según sus autores (Feng, 2016), de los datos de laboratorio se puede predecir que una membrana de disulfuro de molibdeno, con un 30% de su superficie cubierta de nanoporos, podría proporcionar energía osmótica con una potencia específica de 1 MW/m².

Las membranas biomiméticas, actualmente en desarrollo, tratan de imitar el comportamiento específico de las membranas celulares. Haciendo uso de la nanociencia y nanotecnología se ha llegado a fabricar membranas que incorporan acuaporinas en su capa activa, imitando el comportamiento de esta proteína existente en las membranas celulares, como canal específico para el transporte de agua entre el exterior y el interior de las células.

Los flujos de agua que se pueden alcanzar con esta nueva generación de membranas, pueden ser unas 1000 veces superior al que consigue con las membranas convencionales actuales. (Gunderson, 2016)

Investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Laussane (EPFL) en el 2016, desarrollaron un sistema que genera electricidad a partir de ósmosis con una eficiencia sin precedentes hasta ese momento. Utiliza el agua de mar, agua dulce, y un nuevo tipo de membrana de sólo tres átomos de espesor.

Una membrana selectiva de 3 átomos de espesor, que hace el trabajo en el sistema de EPFL consta de dos compartimentos llenos de líquido separados por una membrana delgada hecha de disulfuro de molibdeno. La membrana tiene pequeños agujeros, o nanoporos, a través del cual pasan los iones del agua de mar hacia el agua fresca hasta que las concentraciones de sal en los dos fluidos son iguales. A medida que los iones pasan a través de los nanoporos, sus electrones se transfieren a un electrodo que es lo que se utiliza para generar una corriente eléctrica.

Gracias a sus propiedades, la membrana permite que los iones con carga positiva pasen a través de ella, mientras que empuja a la mayoría de los cargados negativamente. Eso crea tensión entre los dos líquidos con una acumulación de carga positiva y la otra una carga negativa. Esta tensión es lo que hace que la corriente generada por la transferencia de iones fluya.

(Pousaz, 2016) comenta que han tenido que fabricar primero y luego investigar el tamaño óptimo de la nanoporos. Si son demasiados grandes, los iones negativos pueden pasar y la tensión resultante sería demasiado baja. Si son demasiados pequeños, no pueden pasar suficientes iones, la corriente sería demasiado débil.

1.8 Inversión, previsión de precios y comercialización

El prototipo de la primera planta de energía osmótica del mundo creada por la compañía Statkraft intenta explorar la energía que se libera cuando se mezclan ambos tipos de agua.

El agua dulce es atraída de forma natural hacia el agua salada para diluirla, y el flujo del agua a través de una membrana semipermeable es suficiente para hacer funcionar una turbina y generar energía, dice la empresa.

Según (BBC, 2009), el gerente de proyecto de la compañía, Stein-Eric Skilhagen, comenta que se espera que en el futuro la planta pueda ofrecer una solución en el combate del cambio climático. No se produce mucha energía hasta ese momento, dado que es la primera planta que se construye y lo más importante hasta ahora es que se ha probado que sí es posible producir energía explotando la ósmosis.

Stein-Eric Skilhagen en este artículo comenta que los próximos dos años serán cruciales porque intentará avanzar hacia la etapa comercial de la tecnología. Donde si se logran solucionar todos los problemas que se presenten quizás para el año 2015 se pueda generar energía a gran escala.

La empresa calcula que el potencial global de la energía osmótica es de 1.600-1.700 TWh al año, lo que equivale al consumo total de electricidad de China en el 2002. (BBC, 2009)

Los especialistas a cargo de esta planta estiman que **para el 2020, este tipo de tecnología podría comercializarse lo suficiente para significar una fuente de energía viable**. Unos de los grandes beneficios de este tipo de generación de energía es que funciona las 24 horas del día, a diferencia de la solar y la eólica, que necesita de condiciones de radiación y de viento favorables respectivamente.

Los holandeses consideran que en un futuro próximo se podría abastecer hasta el 50% de la energía que necesita el país (Holanda) a través de esta tecnología, esto sin afectar el caudal mínimo de los ríos que permita la vida de los peces y el uso de transporte marítimo. Esta prueba generará unos 50 megavatios en su fase inicial, lo equivalente a unos cien hogares. Así que los países que actualmente usan la energía azul, apostando por su desarrollo, son Noruega y Holanda. Ver Imagen 1.3. Interior de primera planta de generación de energía osmótica. (Redacción, 2017)

En la Tabla 1.6 se muestra las principales compañías pioneras en la energía osmótica que impulsan su desarrollo. Aunque son pocas en todo el mundo, la tendencia es a desarrollar cada vez más este incipiente energético.

Tabla 1.6 Resumen de las principales compañías en el poder osmótico. Fuente: Análisis de Kachan & Co.

Compañías	Localización	Fundadas	Descripción	Enfoque Osmótico
Statkraft	Noruega	1992	Utilidad de energía	Sistema PRO
Kema	Holanda	1927	Consultante	Sistema RED con membranas
REDstack	Holanda	2005	Centro de Investigación	Tecnología sistema RED
Energy Recovery Inc, (ERI)	California	1992	Osmosis inversa, componentes de desalinización	Dispositivo de recuperación de energía
Oasys Water	Massachusetts	2008	Inicio	Membrana
Hydration Technology Innovations	Oregón	1987	filtración de agua y tratamiento de aguas residuales	Membrana
Aquaporin	Dinamarca	2005	Inicio	Membrana

Es una gran apuesta, pero los expertos son positivos sobre el desarrollo de la Energía Azul en los próximos años. Tal vez sea esta la salvación de nuestra creciente necesidad por nuevas fuentes de energía limpia y renovable.

En México hasta el año 2019, los prototipos de plantas para generar energía a través del gradiente salino se encuentran en fase experimental en laboratorios y a pequeña escala, determinando como problemas principales las fugas y la calidad de las membranas.

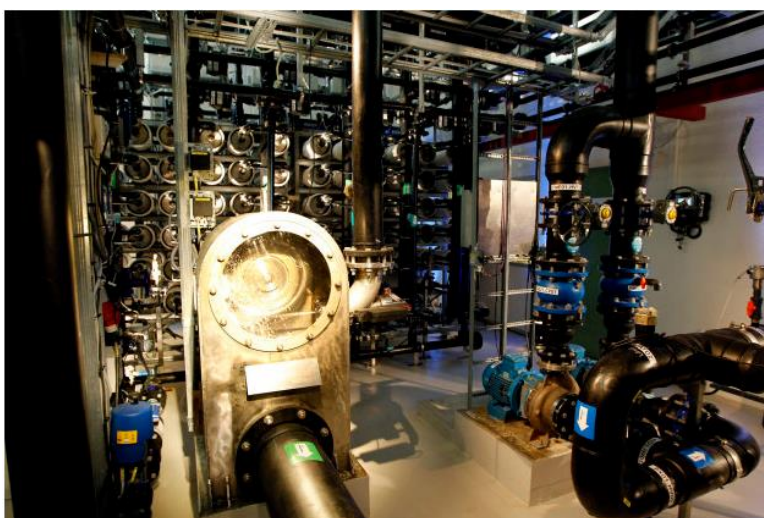


Imagen 1.1 Interior de la primera planta de energía osmótica en el mundo en Noruega. AFP/Getty Images

1.12 Impacto ambiental y social.

Una desventaja del uso de esta fuente de generación de energía, es que luego del proceso, no se recupera el agua dulce por lo que el impacto ambiental debe ser evaluado cuidadosamente para crear un aprovechamiento limpio en sí mismo, sin productos secundarios que pongan en riesgo los equilibrios ecológicos. (CEMIE-OCEANO, 2018)

El único residuo resultante es una mezcla de agua dulce y salada denominada “salobre”, por lo que se trata de un proceso no contaminante que no produce dióxido de carbono y en el que el costo energético involucrado es solamente el de la evaporación para separar el agua y la sal. Este método fue ideado en 1973 en Israel por Sidney Loeb, quien aparentemente se inspiró al observar el flujo del río Jordán hacia el mar Muerto. Además de obtenerse en laboratorios, este tipo de energía puede generarse en estuarios en la desembocadura de ríos, donde las corrientes de agua del río encuentran a las aguas salinas del mar. (López de Haro, 2014)

Luego de terminar los procesos de mezclas controladas de las aguas con diferentes concentraciones, se obtiene que el agua menos concentrada ahora está más concentrada y la que estaba más concentrada ahora está más diluida. Para determinar el estado de los residuos se tendría que monitorear sus niveles de sales y temperatura, para poder tomar como decisión dónde verter esta agua. Previamente se tiene que tener conocimiento del estado salino del sitio donde se determine verter el agua sobrante y de esta forma tener el menor impacto ambiental posible al ecosistema. Esto es de suma importancia, pues existen especies que viven en determinadas condiciones y si se alteran estas condiciones se alteran estas especies. La energía del gradiente salino ofrece una alternativa para tipos de generación de energía eléctrica convencionales, como el petróleo o el carbón mineral que perjudican tanto nuestro ambiente por el daño que producen al ser quemados, como a nuestras economías, al crear una dependencia hacia sus productores debido a las fluctuaciones de sus precios en el mercado global. Esto ha fomentado la idea de buscar otras fuentes energéticas como la PRO que puede darle más autonomía energética a la matriz de un país, gracias a su inmenso potencial al ser encontrado en cualquier lugar que tengamos un gradiente salino. (Leonczuk Minetto & da Silva Monteiro, 2014)

Al lograr una mayor independencia de fuentes convencionales de obtención de energía, los países pudieran disfrutar de beneficios sociales, al mantener una economía más estable, y fomentar en la población una mayor conciencia sobre el cuidado del planeta. Claro que aún es necesario mayor investigación para asegurar el futuro desarrollo de esta nueva fuente energética, que aún posee ciertos factores que limitan su potencial y deben ser controlados para así poder alcanzar la viabilidad económica, social y ambiental.

Capítulo 2 Materiales y Métodos

2.1 Aguas Superficiales y ríos de México

Los ríos y arroyos de México según (CONAGUA, 2012) constituyen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud. Por los cauces de los 51 ríos principales fluye el 87% del escurrimiento superficial de México y sus cuencas ocupan el 65% de la superficie territorial continental del país. Ver Imagen 2.1.

Se estructuran estos ríos en tres vertientes: Occidental o del Pacífico, Oriental o del Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) e Interior, en la que los ríos no tienen salida al mar. Destacan por su extensión, las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Son 7 los ríos que aportan a 2/3 del escurrimiento del país : Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá. Sus cuencas representan el 22% de la superficie de México.



Imagen 2.1 Ríos de México. Fuente: (AGUA.org.mx, 2019)

Debido al régimen climático del país (AGUA.org.mx, 2019), comenta que en casi todos los ríos existe una diferencia notable entre el volumen de agua que llevan en la época de secas y la de lluvia. Esta variación se acentúa por las obras de retención de agua y su uso para irrigación, de tal manera que muchos de los ríos que originalmente eran permanentes ahora se vuelven intermitentes, por lo menos en algunos tramos de su recorrido, también pueden incidir directamente los fenómenos meteorológicos como la sequía y las precipitaciones . La

deforestación y la erosión del suelo producen un aumento en el escurrimiento superficial y la disminución de la infiltración del agua de lluvia en amplias zonas,.

2.2 Selección de desembocaduras de ríos (Casos de estudio)

Según (Stenzel & Wagner, 2010), el Golfo de México se sitúa en el segundo lugar con el potencial ecológico teórico de generación de energía proveniente de la ósmosis con 2 GWe y 16 TWhe/a solo antecedido por el Ártico con 4,5 GWe y 36 TWhe/a.

Aun así, cuando se conocen de las regiones teóricamente propicias para desarrollar este tipo de proyecto, es preciso señalar que no en todas las desembocaduras de ríos se cumplen con las condiciones idóneas. Puede influir negativamente que presenten gran cantidad de partículas en sus aguas o que el delta sea muy ancho y plano.

La falta de datos y mediciones en las variables implicadas para saber el potencial energético, pueden ser factores que condicionen los casos de estudios, dado que sin éstas no se puede llegar a resultado teórico alguno.

2.2.1 Río Grijalva

2.2.1.1 Localización

La cuenca del río Grijalva, se localiza en el sureste de México, es una cuenca transfronteriza que nace en Guatemala y cruza los Estados de Chiapas y Tabasco; las áreas propensas a inundaciones son las zonas adyacentes a los cauces y sus afluentes y efluentes. Existe una zona crítica de inundaciones hacia la parte centro-norte del Estado de Tabasco.

El área de estudio se ubica entre las longitudes -92.73° a -92.68° Oeste y las latitudes 18.57° a 18.67° Norte, en la propia desembocadura del río. El punto llamado: “Grijalva, marca el lugar exacto de donde se extrajeron las mediciones de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y Salinidad (psu), a dos metros de profundidad, desde el año 2010-2015, descargados del modelo HYBRID COORDINATE OCEAN MODEL (según sus siglas en inglés HYCOM). Se escoge este punto para conocer el comportamiento de la variación temporal de las variables temperatura y salinidad. Ver Imagen 2.2.



Imagen 2.2 Área de estudio en la desembocadura del río Grijalva. Fuente: Google Earth

2.2.1.2 Descripción

Características Físicas, Morfología.

El Alto y Medio Grijalva se ubica en la Depresión Central de Chiapas, en el centro de este Estado, es una extensa zona semiplana bordeada por la Sierra Madre, los Altos y las Montañas del Norte de Chiapas. En el Bajo Grijalva se ubica la Sierra del Norte de Chiapas, éstas están comprendidas por una serie de serranías separadas por alargados valles que bordean a los Altos y las Montañas del Oriente. La disposición de las montañas permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que propicia un clima húmedo con lluvias todo el año.

El Bajo Grijalva también presenta una planicie que se ubica en la Llanura Costera del Golfo, esta llanura es ocupada en su mayoría por el estado de Tabasco. Esta es una llanura formada por grandes cantidades de aluvión acarreado por los ríos más caudalosos del país - Papaloapan, Coatzacoalcos, Grijalva y Usumacinta-, los cuales atraviesan la provincia para desembocar en la parte sur del Golfo de México. Ver Imagen 2.3.

Según (Rubio Gutiérrez & Triana Ramírez, 2006) las condiciones del clima varían radicalmente conforme el Grijalva avanza río abajo, el Alto y Medio Grijalva tienen una precipitación media que oscila entre los 1200 y 1700 mm anuales, debido a que esta zona está ubicada entre dos barreras meteorológicas: las zonas montañosas del norte y costa de Chiapas, que bajo condiciones del efecto Föhn generan condiciones secas, sin embargo a través de Guatemala la influencia de ondas del este genera la mayor parte de la precipitación en estas dos cuencas, donde el 95% de la precipitación es de origen tropical. En la parte alta

de la cuenca Bajo Grijalva (al sur) se ubica una de las zonas de mayor precipitación en México, con poco más de 4000 mm anuales, las lluvias se presentan todo el año y por influencia se sistemas tropicales y de invierno, estos últimos pueden generar hasta lluvias de 300 mm en 24 horas cada año, generando grandes escurrimientos y avenidas con incrementos de hasta 3.0 metros en 12 horas, debido principalmente a intensidades de precipitación inducidas por efectos de ascenso orográfico. Esta zona registra las más altas precipitaciones cuando se combina un sistema tropical con la entrada de frentes o irrupciones de aire frío con severas inundaciones aguas abajo.

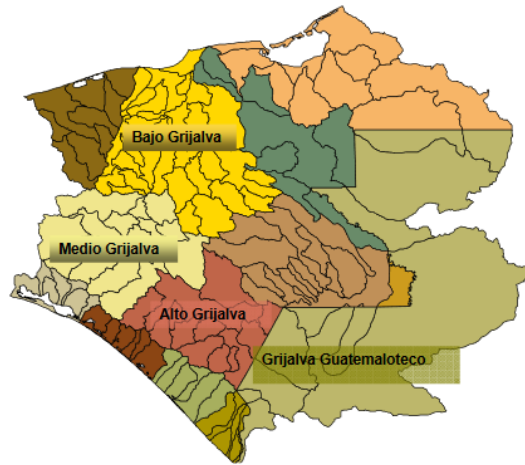


Imagen 2.3 Mapa de los cauces del río Grijalva. Fuente (Rubio Gutiérrez & Triana Ramírez, 2006)



Imagen 2.4 Distancia desde la estación hidrográfica Porvenir hasta la desembocadura del río Grijalva. Fuente Google Earth

En la imagen 2.4 se muestra el cauce recorrido por el río Grijalva desde la estación hidrográfica Porvenir, perteneciente a la dirección local de Tabasco. Esta estación nos proporciona datos de caudal en m³/s. La distancia desde la estación la estación Porvenir hasta la desembocadura es de 107 kilómetros.

2.2.2 Río Jamapa

2.2.2.1 Localización

La Cuenca del Río Jamapa se ubica en la vertiente del Golfo de México, sus coordenadas geográficas extremas y cuencas colindantes se muestran en la Tabla 2.1. En un contexto fisiográfico, la parte este de la Cuenca se ubica en la Llanura Costera del Golfo Sur, mientras que la parte oeste se ubica en el Eje Neovolcánico (Faja Volcánica Mexicana). Esta cuenca ocupa una superficie de 3,918 km² y está conformada por los estados de Veracruz (98%) y Puebla (2%), el primero representado por 31 municipios, y el segundo por 3. La mayor elevación registrada es de 5,670 msnm y la menor es de 0, con una elevación promedio de 1376 msnm. El cauce principal del río Jamapa se extiende hasta 148.47 km. (PAMIC, 2017)

Tabla 2.1 Datos de coordenadas, áreas y alturas de la cuenca del río Jamapa. Fuente: (PAMIC, 2017)

Dirección	Coordenadas extremas						Cuencas Colindantes
	Longitud			Latitud			
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	
Norte	-96	58	55,43	19	12	56,36	Antigua y río Tolome
Sur	-96	34	20,05	18	44	33	Río Blanco
Este	-95	57	4,64	18	56	37,07	Golfo de México
Oeste	-97	16	53	19	8	54	Salado
Parámetros generales de la cuenca							
Área	3918	Km ²		Longitud del río principal: 148 km			
Altitud del relieve (msnm)		Máxima	Mínima	Promedio	Desnivel altitudinal en (m)		
		5670	0	1376	5670		

El área de estudio se ubica entre las longitudes -96.04° a -96.10° Oeste y las latitudes 19.08° a 19.14° Norte. El punto llamado: “Jamapa”, marca el lugar exacto de donde se extrajeron las mediciones de Temperatura (°C) y Salinidad (ups) a dos metros de profundidad, desde el año 2010-2015, descargados del modelo HYBRID COORDINATE OCEAN MODEL (según sus siglas en inglés HYCOM). Se escoge este punto para analizar el comportamiento temporal de las variables: temperatura y salinidad. Ver Imagen 2.5.

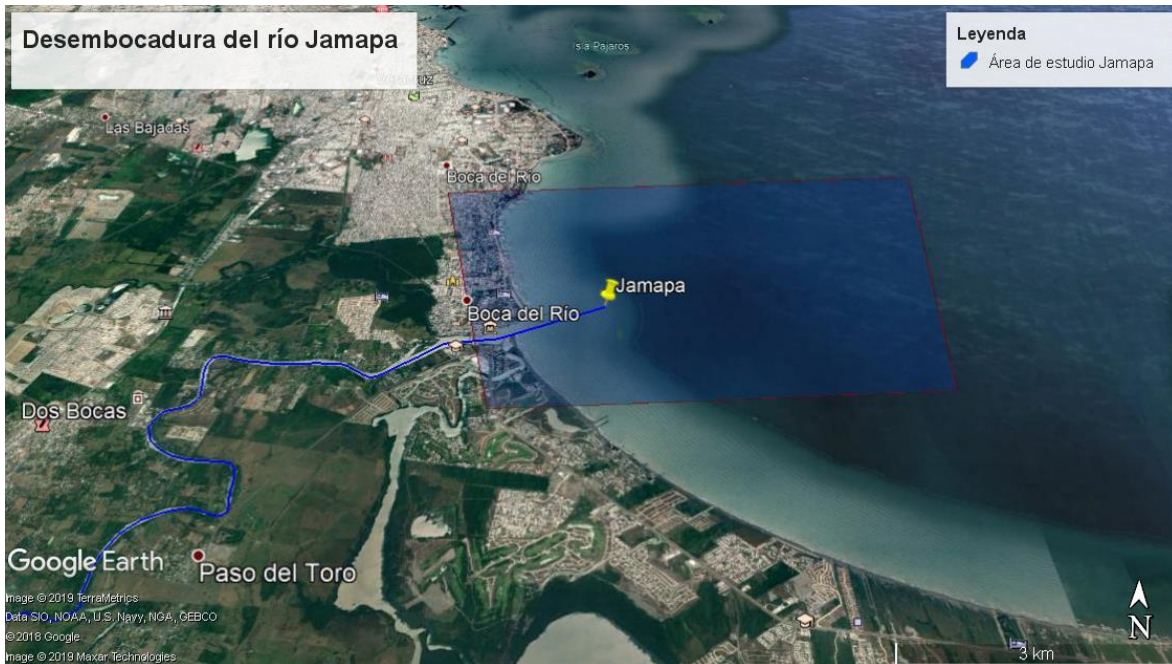


Imagen 2.5 Área de estudio en la desembocadura del río Jamapa. Fuente Google Earth

En la imagen 2.6 se muestra el cauce recorrido por el río Jamapa desde la estación hidrográfica El Tejar, perteneciente al Organismo de Cuenca Golfo Centro con sede en Xalapa de Enríquez, Veracruz. Esta estación nos proporciona datos de caudal en m^3/s . La distancia desde la estación El Tejar hasta la desembocadura es de 15 kilómetros.



Imagen 2.6 Distancia desde la estación hidrográfica El Tejar hasta la desembocadura del río Jamapa. Fuente Google Earth

2.3 Gestión de datos, Comisión Nacional del Agua.

2.3.1 Datos BANDAS (CONAGUA)

La Comisión Nacional del Agua tiene como objeto ejercer las atribuciones que le corresponden a la autoridad en materia hídrica y constituirse como el Órgano Superior con carácter técnico, normativo y consultivo de la Federación, en materia de gestión integrada de los recursos hídricos, incluyendo la administración, regulación, control y protección del dominio público hídrico. Tiene como misión “Administrar y preservar las aguas con la participación de la sociedad, para lograr un uso sustentable del recurso”

Dado que el manejo digital de la información hidrométrica es de suma importancia para la gestión del recurso hídrico de México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República mexicana. Cuenta con los datos de 2,070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la Conagua y el IMTA. Aproximadamente 480 estaciones fueron actualizadas hasta el año 2006 y tiene registradas aproximadamente 180 presas. (BANDAS, 2015)

La información que se puede encontrar de cada estación hidrométrica es:

- Valores diarios: Gasto medio diario (m^3/s) día 1 a día 29-31.
- Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo (m^3/s). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de m^3), sedimentos (miles de m^3) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo (m^3/s). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m^3), además del volumen anual de escurrimientos (miles de m^3), gasto medio anual (m^3/s) y volumen anual de sedimentos (miles de m^3).
- Hidrograma: Incluye la fecha en que ocurre el gasto, hora en que ocurre el gasto y Gasto instantáneo (m^3/s).
- Limnograma: Muestra la fecha de lectura, hora de lectura y lectura de escala (m).
- Sedimentos: Se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento

A pesar de la gran cantidad de estaciones hidrométricas existentes, estas bases de datos estuvieron inhabilitadas en la WEB, durante el período de confección de esta investigación, noviembre de 2018- junio de 2019.

2.3.2 Estaciones hidrométricas.

Las estaciones hidrométricas (ver Imagen 2.7) miden la cantidad de agua que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. El caudal es generado originalmente por la precipitación pluvial, así como por la entrada de agua subterránea a los canales superficiales. También deben considerarse las descargas asociadas a los diversos usos del agua. En ocasiones los cauces y por consiguiente los flujos de agua están regulados por presas y otras obras de control operadas por el hombre. (CONAGUA, 2016)

El conocimiento de la cantidad y la calidad del agua es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable municipal e industrial, el control de avenidas, el diseño y operación de presas, la generación de energía, la irrigación, las actividades recreativas relacionadas con el agua, la navegación fluvial, el cuidado y preservación de la flora y fauna, el drenaje, el tratamiento de aguas residuales y la potabilización. (Viessman & Lewis, 1989)

En la Tabla 2.2 se muestran las regiones hidrológicas administrativas (RHA) y los números de estaciones hídras que les pertenecen, en total hasta el 2015 se contaban con 861 estaciones en operación. Ver en la Imagen 6 la distribución espacial de las mismas.

Tabla 2.2 Estaciones hidrométricas operadas por CONAGUA, 2015. Fuente: (CONAGUA, 2016)

Clave	RHA	Número de estaciones
I	Península de Baja California	1
II	Noroeste	14
III	Pacífico Norte	50
IV	Balsas	81
V	Pacífico Sur	19
VI	Río Bravo	57
VII	Cuencas Centrales del Norte	19
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	267
IX	Golfo Norte	133
X	Golfo Centro	52
XI	Frontera Sur	121
XII	Península de Yucatán	12
XIII	Agua del Valle de México	35
	Total	861



Imagen 2.7 Distribución espacial de las estaciones hidrométricas. Fuente: (CONAGUA, 2016)

Las estaciones Porvenir Centro y El Tejar pertenecen al río Grijalva y al Jamapa respectivamente, las cuales presentan mediciones de caudal desde el año 2001 a 2019 y de 1958 hasta 2018 por ese orden. Se indica de igual forma las distancias a las que se encuentran por el cauce de los ríos de las desembocaduras. Ver Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Coordenadas de las estaciones Porvenir Centro y El Tejar.

Nombres Estaciones	Corriente	Cuenca	Estado	Coordenadas Geográficas (GMS)						Grados decimales	
				Latitud	Longitud	Altitud	Latitud	Longitud	Altitud		
Porvenir Centro	Grijalva	Río Grijalva	Tabasco	18°	02'	37.00	92°	48'	52	18,00	-92,87
El Tejar	Río Jamapa	Río Jamapa-Cotaxtla	Veracruz	18°	65'	58	96°	6'	9.5	19,06	-96,15

Se muestran las regiones hidrológicas administrativas, la distancia de la estación a la desembocadura del mar, el tamaño temporal de los datos, de las estaciones hidrológicas Porvenir Centro y el Tejar. Ver tabla 2.4

En la Tabla 2.5 se exponen las principales características de los ríos analizados Grijalva y Jamapa y la vertiente a la que pertenecen.

Tabla 2.4 Datos de interés de las estaciones hidrológicas Porvenir Centro y El Tejar

Nombres Estaciones	Región hidrológica-administrativa	Distancia desde la estación a la desembocadura (Km)	Tamaño temporal de la data del caudal.
Porvenir Centro	X. Golfo Centro	107	2002 - actualidad
El Tejar	IX. Golfo Norte	15	1958- 2018

Tabla 2.5 Características de los ríos estudiados y sus vertientes. Fuente: (CONAGUA, 2016)

Nombre del río	Longitud del río (km)	Escorrentamiento natural medio superficial (hm ³ /año)	Área de la cuenca (km ²)	Vertiente
Grijalva-Usumacinta	1 521	101 517	83 553	Golfo de México y Mar Caribe
Jamapa	368	2 055	4 061	Golfo de México y Mar Caribe

2.3.3 Estaciones pluviométricas

Los datos de precipitación estudiados en esta investigación, provienen de la red de estaciones climatológicas perteneciente a CONAGUA. Con estos datos de precipitación en (mm) se confeccionan gráficas con promedios diarios durante todo el año. Para ambas estaciones se emplean datos con un tamaño temporal de 13 años. Ver Tabla 2.6 y 2.7

Tabla 2.6 Datos de la estación climatológica 30056, El Tejar, perteneciente al estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Fuente: CONAGUA

Estación:	30056
Nombre:	El Tejar
Estado:	Veracruz de Ignacio de la Llave
Municipio:	Medellín
Latitud (°):	19.0672
Longitud (°):	-96.1583
Altura (msn):	10
Situación:	Operando
Datos desde	1 de enero de 1961
Hasta:	31 de diciembre de 2016

Tabla 2.7 Datos de la estación climatológica 27096, Porvenir, perteneciente al estado de Tabasco. Fuente: CONAGUA.

Estación:	27096
Nombre:	Porvenir
Estado:	Tabasco
Municipio:	Centro
Latitud (°):	18.0089
Longitud (°):	-92.8772
Altura (msn):	5
Situación:	Operando
Datos desde	1 de enero de 2001
Hasta:	31 de diciembre de 2013

2.4 Modelo HYCOM (HYBRID COORDINATE OCEAN MODEL)

Debido a que no se cuenta con información detallada y temporal de los ríos en México, se acudió a este modelo del cual se extraen datos de temperatura y salinidad, puesto que son relevantes para este proceso de ósmosis.

El consorcio HYCOM es un esfuerzo multi-institucional patrocinado por el National Ocean Partnership Program (NOPP), como parte del Experimento de Asimilación de Datos Oceánicos Globales (GODAE) de EE. UU. Se enfoca en desarrollar y evaluar un híbrido de asimilación de datos isopycnal-sigma-pressure (generalizado) modelo coordinado del océano (llamado Modelo híbrido coordinado del océano o HYCOM).

Los objetivos de GODAE de la representación tridimensional del estado oceánico en resolución fina en tiempo real, la provisión de condiciones de frontera para los modelos costeros y regionales, y la provisión de condiciones de frontera oceánicas para un modelo de predicción global de atmósfera y océano acoplado, están siendo abordados por un Asociación de instituciones que representan un amplio espectro de la comunidad oceanográfica. (HYCOM, 2018)

La coordenada híbrida es una que es isopícnica en el océano abierto, estratificado, pero vuelve suavemente a una coordenada de seguimiento del terreno en regiones costeras poco profundas, y a coordenadas de nivel z en la capa mixta y/o mares no estratificados. La coordenada híbrida amplía el rango geográfico de aplicabilidad de los modelos de circulación de coordenadas isopínicas tradicionales (la base del presente código híbrido), como el Modelo oceánico coordinado isométrico de Miami (MICOM) y el Modelo oceánico en capas de la marina (NLOM), hacia mares costeros poco profundos y partes no estratificadas del mundo oceánico. La base teórica para implementar tal coordenada se expuso en Bleck y Boudra (1981) y Bleck y Benjamin (1993). En HYCOM, a cada superficie de coordenadas

se le asigna una referencia isopycnal. El modelo verifica continuamente si los puntos de la cuadrícula se encuentran o no en sus isopycnals de referencia y, si no, intenta moverlos verticalmente hacia este último. Sin embargo, no se permite que los puntos de la cuadrícula migren cuando esto conduciría a una acumulación excesiva de superficies de coordenadas. Por lo tanto, en aguas poco profundas, los puntos verticales de la rejilla están limitados geoméricamente para permanecer a una profundidad fija mientras se les permite unirse y seguir sus isopycnals de referencia sobre el océano profundo adyacente.

Las aplicaciones regionales / costeras son un atributo importante de las simulaciones HYCOM de asimilación de datos es la capacidad de proporcionar condiciones de contorno a los modelos regionales y costeros. (Chassignet & Hurburt, 2007)

En la capa de mezcla, los puntos de la cuadrícula se colocan verticalmente, de modo que se produce una transición suave de cada interfaz de capa desde una superficie isopícnica a una superficie de profundidad constante donde la interfaz sobresale en la capa de mezcla. Por lo tanto, HYCOM se comporta como un modelo sigma convencional en regiones oceánicas muy poco profundas y / o no estratificadas, como un modelo de coordenadas de nivel z en la capa mixta u otras regiones no estratificadas, y como un modelo de coordenadas isopínicas en regiones estratificadas. Al hacerlo, el modelo combina las ventajas de los diferentes tipos de coordenadas en la simulación óptima de las características de la circulación costera y en el océano abierto. El procedimiento actual de manejo de modelos costeros de alta resolución (que invariablemente usan redes verticales fijas) con salida de un modelo isopícnico a escala de cuenca puede simplificarse, ya que HYCOM podrá proporcionar los datos requeridos cerca de la costa a intervalos de profundidad fijos.

HYCOM presenta una resolución de 0.08 ° entre 40 ° S y 40 ° N, 0.04 ° hacia los polos desde estas latitudes.

El tamaño temporal de la data de temperatura y salinidad en el modelo HYCOM va desde el año 1994 hasta el año 2015. Se analizaron los años comprendidos entre el 2001 y el 2015. Cada día el modelo realiza mediciones cada 3 horas, unas 8 diarias, se trabajó con los promedios diarios de estos datos.

En la zona de estudio se seleccionó **1 punto** de la desembocadura de los ríos analizados, del cual se descargaron los datos de salinidad y temperatura. Sus coordenadas se muestran en las Tabla 2.8 y Tabla 2.9.

Desembocadura río Grijalva.

Tabla 2.8 Coordenadas de las mediciones de datos de salinidad y temperatura, desembocadura río Grijalva.

Nombre del punto seleccionado	Coordenadas			
	N	S	E	W
Grijalva	18.60810	18.60310	-92.69415	-92.69915

Desembocadura río Jamapa.

Tabla 2.9 Coordenadas de las mediciones de datos de salinidad y temperatura, desembocadura río Jamapa.

Nombre de los puntos seleccionados	Coordenadas			
	N	S	E	W
Jamapa	19.10890	19.10390	-96.08575	-96.09075

2.4.1 Formato NetCDF

Las variables temperatura y salinidad descargadas del modelo HYCOM se encuentran en formato NetCDF.

Este formato, NetCDF (Network Common Data Form) es un conjunto de interfaces para acceso a datos orientado a matrices y una colección distribuida libremente de bibliotecas de acceso a datos para C, Fortran, C ++, Java y otros lenguajes. Las bibliotecas de netCDF admiten un formato independiente de la máquina para representar datos científicos. Juntas, las interfaces, las bibliotecas y el formato admiten la creación, el acceso y el intercambio de datos científicos. Los datos de NetCDF son:

Un archivo netCDF incluye información sobre los datos que contiene.

- Las computadoras pueden acceder a un archivo netCDF con diferentes formas de almacenar números enteros, caracteres y números de punto flotante.
- Se puede acceder a un pequeño subconjunto de un gran conjunto de datos de manera eficiente.
- Los datos pueden adjuntarse a un archivo netCDF adecuadamente estructurado sin copiar el conjunto de datos o redefinir su estructura.
- Un escritor y varios lectores pueden acceder simultáneamente al mismo archivo netCDF.
- El acceso a todas las formas anteriores de datos de netCDF será compatible con las versiones actuales y futuras del software..

El software netCDF fue desarrollado por Glenn Davis, Russ Rew, Ed Hartnett, John Caron, Dennis Heimburger, Steve Emmerson, Harvey Davies y Ward Fisher en el Centro de Programas de Unidata en Boulder, Colorado, con contribuciones de muchos otros usuarios de netCDF (Unidata, 2019)

2.5 Sistema de Información Geográfico SIATL

El Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas (SIATL), del INEGI 2010. Es un Sistema de Información Geográfica. El mismo permite hacer cálculos de áreas de cuencas, flujos volumétricos, con la participación de las variables más importantes que intervienen en los escurrimientos superficiales, como el tiempo de concentración y la intensidad promedio de la lluvia; asignando los valores conocidos en tablas de períodos de retorno y coeficiente de escurrimiento. Utiliza el método racional y la ecuación de Cadena Cepeda. Para la intensidad de la lluvia.

2.5.1 Definición de las cuencas por medio de SIATL (Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas)

A través del SIATL se definen las cuencas de los ríos Grijalva (ver Imagen 2.8) y Jamapa (ver Imagen 2.9). Estas nos muestran las áreas de las cuales se suministran de agua tanto superficial como subterráneamente. Donde depende el valor y comportamiento del caudal de estos ríos de los aportes de agua por todas las vías de las que pueda nutrirse.



Imagen 2.8 Cuenca definida por el SIATL para el río Grijalva. Fuente: (INEGI, 2010)

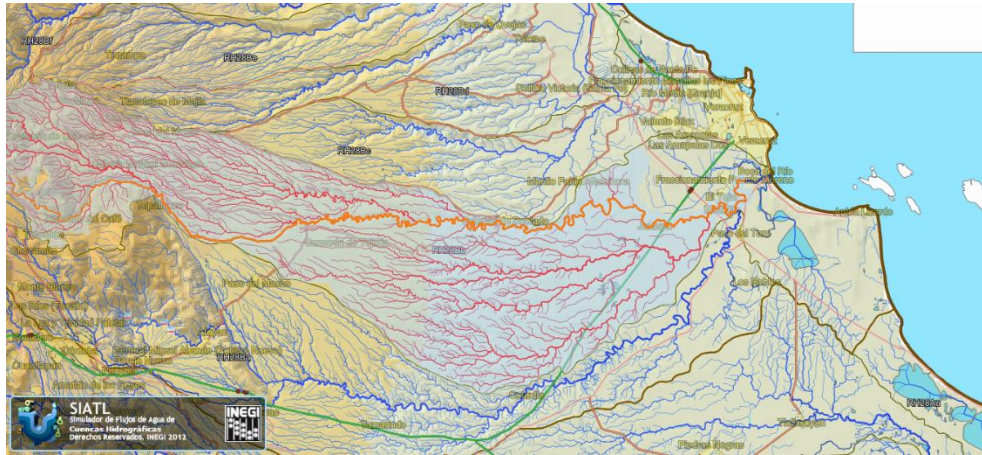


Imagen 2.9 Cuenca definida por el SIATL para el río Jamapa. Fuente: (INEGI, 2010)

2.8 Análisis de datos reales de salinidad, temperatura y densidad en la desembocadura del río Jamapa.

Una sonda multiparamétrica permite la realización y monitorización de medidas de perfil de la conductividad, temperatura, presión, oxígeno disuelto y turbidez, a lo largo de la columna de agua dulce o salada, hasta 350 m de profundidad en agua dulce o salada. La frecuencia de recogida y registro de datos, para su tratamiento posterior, es de 4 Hz. (Oceanografía litoral, 2019)



Imagen 2.10 Desembocadura del río Jamapa. En el Sitio 1 se efectuaron mediciones reales de salinidad y temperatura. Fuente: Google Earth.

En el Sitio 1, se analizaron datos de CTD ver Imagen 2.13 (conductividad, temperatura, profundidad) de los días 28 y 29 de junio. Con este equipo se efectuaron 11 mediciones en los horarios: 13 h, 15 h, 17 h, 19 h, 21 h, 23 h, 00 h, 02 h, 04 h, 06 h, 08 h de las que se procesaron los datos para mostrar los perfiles verticales desde superficie hasta los 3.5 metros de profundidad. Ver imagen 2.12.

Fueron efectuadas mediciones con Divers a 3.4 m de profundidad, cada 10 minutos, desde el 27 de agosto al 9 de septiembre de 2018 en el mismo sitio 1.

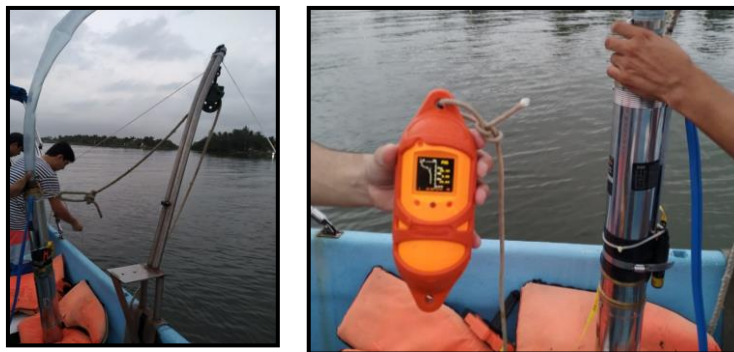


Imagen 2.11 Procedimiento de trabajo desde una lancha en el río e instrumento CTD, recaudación de datos para perfil vertical.

2.9 Metodología para la estimación del Potencial Teórico

2.9.1 Cálculo del potencial energético. Ecuación de Van't Hoff

Basado en la ecuación de Van't Hoff, estudiada por (Skillhagen, Dugstad, & Aaberg, 2008) y (Bárceñas, 2014) se muestran las variables necesarias para efectuar una evaluación del potencial energético del gradiente salino, ver Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Variables implicadas en el cálculo del potencial energético del gradiente salino

No.	Variable	Unidades
1	Caudal o flujo volumétrico promedio mensual del agua de río	m^3/s
2	Velocidad mensual del flujo	m/s
3	Le temperatura promedio mensual en la desembocadura del río	$^{\circ}C$
4	Concentración promedio de NaCl del agua de mar en la desembocadura	mol/kg o psu
5	Dirección del flujo del río	<i>Flujo – Reflujo</i>

La presión osmótica es capaz de elevar el nivel del agua salada por encima del nivel de agua dulce, creando una columna de agua que detendrá su aumento al igualarse a la presión hidrostática (Ec.1) de la columna de agua salada de acuerdo a la ecuación de Van't Hoff, Ec.2. La altura teórica h quedaría directamente proporcional al gradiente salino y a la temperatura Ec.3. El gradiente de alturas puede utilizarse como en una hidroeléctrica, y su velocidad viene dada en función de esa altura Ec.4. En teoría, una corriente de agua dulce que fluye a $1m^3/s$ produciría 1MW de electricidad. Los lagos interiores hipersalinos tienen un mayor potencial, (Gerstandt, Peinemann, Skillhagen, & Thorsen, 2008)

$$P = \rho g h \quad (1)$$

Dónde:

$P = \text{presión hidrostática } N/m^2$

$\rho = \text{densidad del agua } kg/m^3$

$g = \text{aceleración de la gravedad } 9,8 m/s^2$

$h = \text{altura de la columna de agua, m.}$

Van't Hoff observó en 1886 que el comportamiento de la presión osmótica es similar a los gases ideales, a partir de eso formuló a la ecuación de la presión osmótica y por eso su similitud con la ecuación de los gases ideales y el uso de la misma constante de gases ideales **R**.

$$\pi_{osmótica} = i c_{NaCl} R T \quad (2)$$

La ecuación de Van't Hoff es válida para soluciones diluidas donde:

i = factor van't Hoff

$R = 8.314472 J/(K mol) = 0.082 atm L/(K mol)$ (*constante de los gases ideales*)

$T = \text{temperatura absoluta (Kelvin)}$

$C = \text{concentración de NaCl (mol/kg)}$

El factor de Van't Hoff simbolizado con la letra *i*, se refiere al grado de disociación que tienen las moléculas de soluto. La disociación es un proceso en el que las moléculas de sustancias iónicas solubles, al disolverse, se separan en sus átomos constituyentes o en moléculas más simples. Estos átomos y moléculas más simples, se denominan iones, y tienen carga eléctrica positiva y negativa. El factor de Van't Hoff indica en cuántas partes se separa un determinado tipo de molécula. Por ejemplo:

Las moléculas de sal común (NaCl o Cloruro de Sodio), al disolverse en agua se separan en átomos de Na y Cl, por lo tanto, para la sal común (NaCl) **i** es igual a 2. Para las moléculas de MgCl₂ (Cloruro de Magnesio) el factor de Van't Hoff **i** es igual a 3, ya que, al disolverse, sus moléculas se separan en 3 iones (1 de Mg y 2 de Cl).

En el caso de las sustancias que no son iónicas, por ejemplo, la glucosa, como al disolverse no se disocian, para ellas el factor Van't Hoff **i** es igual a 1.

El factor Van't Hoff es necesario para medir la presión osmótica debido a que como se explicó más arriba, por ser una propiedad coligativa que no depende del tipo de soluto disuelto sino de su concentración, las partes constituyentes de solutos iónicos al disociarse se comportan como partículas separadas, lo cual aumenta la concentración de soluto y por ende a la presión osmótica. Por ejemplo, si a una temperatura dada, se disuelve en un recipiente con agua, 1 mol de glucosa y en otro recipiente con agua se disuelve 1 mol de sal común (NaCl), como las moléculas de sal son iónicas y cada una se disocia en dos iones (**1**

ion de Na y 1 ion de Cl, es decir $i = 2$), esto duplicará la concentración de sal y por ende la presión osmótica. O sea, que en el recipiente con sal disuelta la presión osmótica será doble.

Igualando 1 y 2, despejando h (Ec.3)

$$h = \frac{2 c R T}{\rho g} \quad (3)$$

Se aplica la ecuación de Bernoulli (Ec 3.1):

$$\rho g h_a + P_{atm} = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h_b + P_{atm} \quad (3.1)$$

De donde:

$$\rho g h_a = \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h_b \quad (3.2)$$

Esta expresión se conoce como el teorema de Torricelli:

$$v = \sqrt{2 g h} \quad (4)$$

La altura de la columna de agua proporciona una velocidad teórica de acuerdo a la relación existente entre la altura y la velocidad (Ec. 4).

La potencia de un aprovechamiento de este tipo depende de la velocidad y del caudal del que se dispone. Para obtener el valor de la potencia partimos de la fórmula de la energía cinética, que es la que posee el agua debido al movimiento (Ec. 5).

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5)$$

La variación de la energía cinética con respecto al tiempo es la potencia (Ec. 6), por tanto:

$$P_{e(v)} = E_c / t \quad (6)$$

La masa de agua por la unidad de tiempo es el flujo másico, quedando así la fórmula anterior:

$$P_{e(v)} = \frac{1}{2} \eta \dot{m} v^2 \quad (7)$$

La potencia eléctrica se considera una eficiencia total del sistema de 0.5 debido a la eficiencia de la turbina hidráulica, el acople mecánico y del generador eléctrico (Ec. 7). Sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en la ecuación 7 queda la ecuación 8 que explica la potencia eléctrica generada por el gradiente salino y por el flujo másico. Dónde η = eficiencia de la turbina hidráulica, acople mecánico y generador eléctrico, (0,5); \dot{m} = flujo másico del agua por la turbina (Kg/s) y v = velocidad del fluido a través de la turbina (m/s).

$$P_{e(v)} = 2 \eta \dot{m} c R T \quad (8)$$

Análisis dimensional de la (Ec. 8).

$$\dot{m} \left[\frac{Kg}{s} \right], c \left[\frac{mol}{Kg} \right], R \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right], T [K]$$

$$P_{e(v)} = \frac{Kg}{s} * \frac{mol}{Kg} * \frac{J}{mol * K} * K$$

$$P_{e(v)} = \frac{Kg}{s} * \frac{mol}{Kg} * \frac{J}{mol * K} * K$$

$$P_{e(v)} = \frac{J}{s}$$

$$P_{e(v)} = Watt$$

2.9.2 Cálculo de la Presión Osmótica (bar), Potencial (MJ/m³) y Generación de energía (KWh/año). Kelada 2010.

Según (Kelada, 2010) en un intento de analizar los pocos puntos de datos que fueron publicados por la prueba de la empresa Statkraft de Noruega para postular un escenario para la generación de energía osmótica desde el río Mississippi. La teoría básica de que Statkraft de Noruega ha adoptado en el desarrollo de su planta piloto de generación de energía osmótica, que fue encargado el 24 de noviembre de 2009 se basa en el trabajo de (Loeb S. , 2001). La evaluación final de esa planta piloto no ha sido revelada, aunque si fue indicado que el sistema era capaz de producir 2 KW de potencia a la carga diferencial de 120 metros, el empleo de 2000 metros cuadrados de membrana enrollado en espiral. A pesar de la escasez de información de la prueba, estos datos son suficientes para debatir los méritos de agua-dulce agua-salada y el escenario de generación de energía por ósmosis.

En su artículo, “Seawater Osmotic Salinity Power Reality” sin entrar en muchas derivaciones termodinámicas, las leyes combinadas primera y segunda de la termodinámica se pueden reducir en términos de energía libre de Gibbs para:

$$dG = Vdp - SdT + \sum_i \mu_i dN_i$$

Donde, la entropía (S), el volumen (V) y la cantidad de sustancia (N) son propiedades extensivas y la temperatura (T), la presión (p) y el potencial químico (μ) son cantidades intensivas conjugadas con energía.

Esta relación se reduce aún más para dar una relación matemática simple en términos de presión osmótica π , concentración y temperatura, ver ecuación 9. La presión osmótica fue originalmente propuesta por el Premio Nobel Van't Hoff y modificada para incluir el coeficiente de reflexión osmótica de Staverman para convertirse en:

$$\pi = \varphi I C R T \quad (9)$$

Donde:

π = Presión Osmótica o fuerza impuesta en la membrana [bars, atm, psi]

φ = Coeficiente de reflexión osmótica (NaCl = 0.93, CaCl² = 0.86, MgCl² = 0.89, etc.),

[Es una relación de presiones osmóticas reales e ideales para una membrana dada]

I = Concentración de iones por moléculas de soluto disociado (Na⁺ and Cl⁻ ions = 2),

C = Concentración molar de sales de iones,

R = Constante de los gases (0.08314472 litro· bar / (k.mol)),

T = Temperatura en grados Kelvin (20° C +273° = 293° K).

La cantidad de concentración promedio de sal de los océanos es de aproximadamente 3.5% (35 gramos / litro), principalmente en forma de cloruro de sodio (NaCl). Para simplificar el cálculo, se supone que el agua de mar contiene 35 gramos de NaCl / litro. El peso atómico del sodio es de 23 gramos, y el del cloro es de 35.5 gramos, por lo que el peso molecular del NaCl es de 58.5 gramos. Por lo tanto, el número de moles de NaCl en el agua de mar es 35 / 58.5 = 0.598 mol / litro y la presión osmótica del agua de mar es:

$$\pi = [0.93] [2] [0.598 \text{ mol/liter}] [0.08314 \text{ litro.bar/ (k.mol)}] [293 \text{ K}] = 27.1 \text{ bar}$$

Como 1 bar = 100,000 Pascal (Pa) y 1 kg de fuerza por centímetro cuadrado (kg_f/cm²) = 98066.5 Pascal. Entonces,

$$\pi = [27.1 \times 10^5 \text{ Pa}] / [98066.5 \text{ Pa / (kg}_f\text{/cm}^2)] = 27.63 \text{ kg}_f\text{/ cm}^2$$

$$\pi = [27.63 \text{ kg}_f\text{/ cm}^2] [m/100 \text{ cm}] [1000 \text{ cm}^3\text{/litro}] = 276.3 \text{ kg}_f\text{. m/ litro}$$

1) Energía potencial de agua de mar (Sea Water Energy Potential), SW_E

$$SW_E = [276.3 \text{ kg}_f\text{. m/litro}] [9.80665 \text{ Joule/ kg}_f\text{. m}] = 2711 \text{ Joule/litro} = 2.711 \text{ MJ/m}^3$$

[El valor de la presión osmótica en bars /10 = el valor de la energía en MJ/m³]

$$SW_E = [2711 \text{ Joule/litro}] [1 \text{ cal/ } 4.184 \text{ J}] [1 \text{ kcal/1000 cal}] = 0.6479 \text{ kcal/litro}$$

$$SW_E = [2711 \text{ Joule/litro}] [1000 \text{ litro/m}^3] = 2.711 \text{ MJ/m}^3$$

En caso de generar energía continuamente (1 m³ por segundo, de cada hora), como es el caso de los sistemas de generación de energía, la energía potencial de este sistema es:

$$SW_E = [2.711 \text{ MJ/m}^3] [(1 \text{ m}^3/\text{sec}) (3600 \text{ sec})] = 9.759 \times 10^9 \text{ J}$$

Dónde: 1 Watt = 1 Joule/Segundo

$$SW_E = [9.759 \times 10^9 \text{ W.s}] [\text{h} / 3600 \text{ s}] [1 \text{ kW} / 1000 \text{ W}] = 2711 \text{ kWh}$$

[o el simple uso de la relación $3.6 \times 10^6 \text{ J} = 1 \text{ kWh}$]

$$SW_E = [2711 \text{ kWh}] [24 \text{ hrs/día}] [365 \text{ días/año}] = 23.75 \times 10^6 \text{ kWh/año}$$

El valor de 1 m³/s es una unidad de flujo volumétrico convencional en aplicaciones de ósmosis. La velocidad de 1 m³/s puede parecer a algunos como una pequeña cantidad de agua. De hecho, el volumen de agua de 1 m³/s, en términos de litros, es de unos 50 millones de galones por día. preparación y entrega de agua consume una cantidad apreciable de energía, que requieren un examen cuidadoso antes de considerar cualquier combinación de energía osmótica.

La generación de energía osmótica a gran escala empleando esquema de agua dulce agua de mar es una empresa importante, con méritos cuestionables y consecuencias económicas negativas. Basado en el ejemplo postulado de la estación de energía osmótica New Orleans, requisito de potencia total es de 305 MW, mientras que la generación de energía teórica es de 270 MW. El déficit energético es de 35 MW, lo que podría ser mucho mayor si la eficiencia de la turbina de un 85 por ciento se utiliza y si se consideraron todos los requisitos diversos de energía y el déficit de energía puede representar hasta el 30%.

Capítulo 3 Discusión de los resultados.

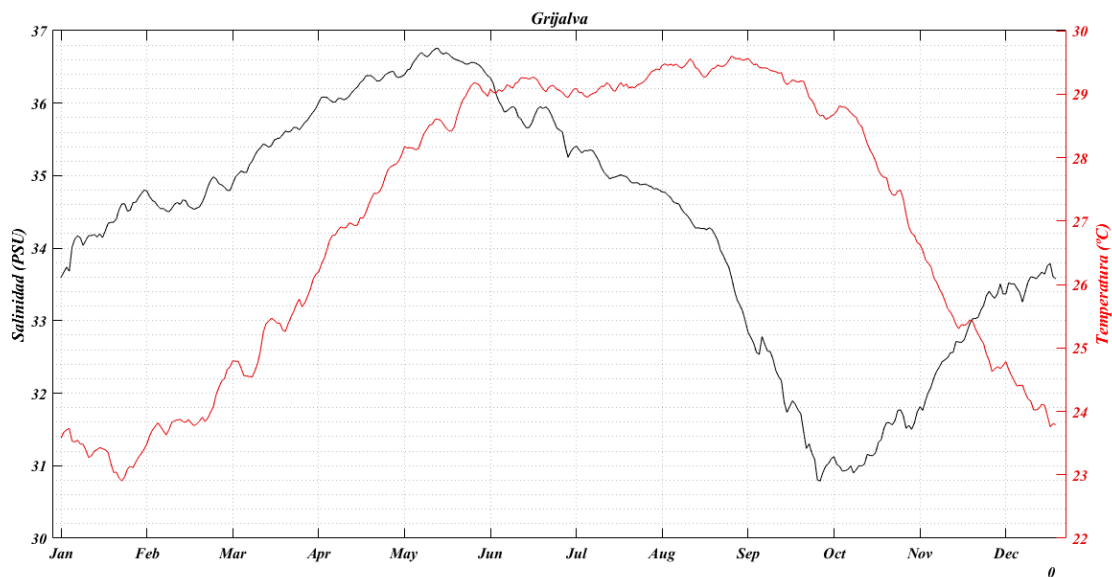
Para poder entender el comportamiento espacial y temporal de las variables analizadas, se necesita hacer un análisis integrado de las mismas. En ocasiones sus fluctuaciones son el resultado de la suma de factores meteorológicos, oceanográficos y antropogénicos.

3.1 Comportamiento y variación temporal de las variables temperatura, salinidad y caudal

En los gráficos siguientes se muestran los resultados del comportamiento de las variables salinidad y temperatura a dos metros de profundidad, en la desembocadura de los ríos Grijalva y Jamapa. Para la confección del mismo se emplean los datos recopilados durante 15 años para cada variable en el período de 2001 al 2015, provenientes de HYCOM.

3.1.1 Río Grijalva

La desembocadura de los ríos se caracteriza por tener agua mezclada según la intensidad de su caudal. Se puede observar en la Gráfica 3.1 el resultado a dos metros de profundidad del comportamiento temporal de la temperatura y la salinidad en la desembocadura del río Grijalva. La concentración salina oscila entre las 30.8 y 36.8 unidades prácticas de salinidad según sus siglas en inglés (psu). En los meses de junio a noviembre ocurre mayor evaporación debido a la radiación solar, es precisamente en estos meses donde se ve una disminución de la salinidad. El mes de mayo se comporta como el de mayor concentración salina llegando hasta los 36.8 PSU.

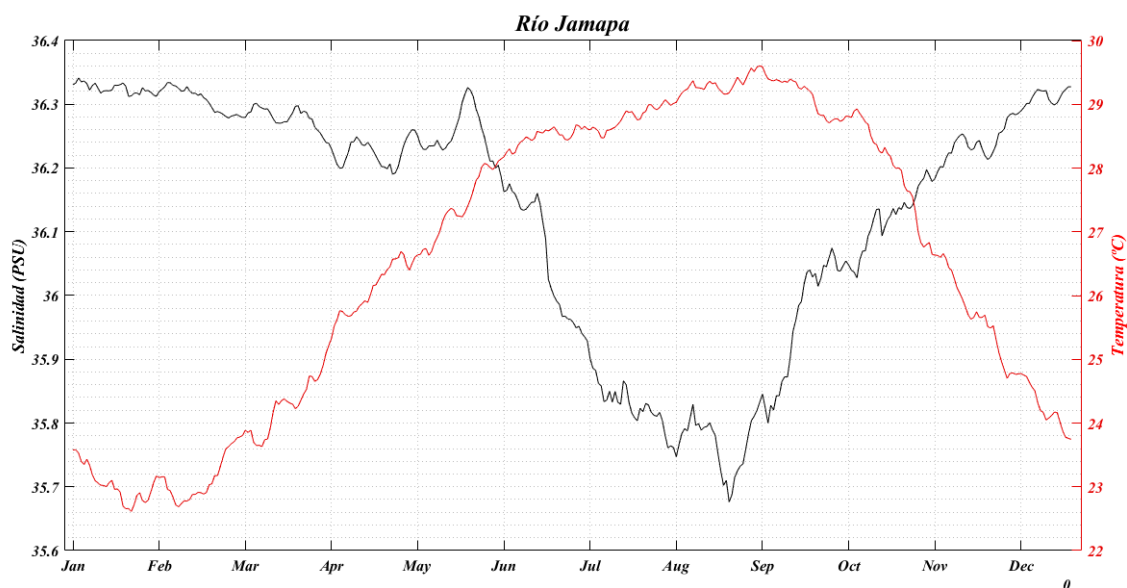


Gráfica 3.1 Variabilidad temporal promedio de la Salinidad y la Temperatura en la desembocadura del río Grijalva.

La temperatura oscila entre los 22-30 °C durante el año, donde alcanza los valores más bajos en el trimestre diciembre-enero-febrero y llega a los valores más elevados de mayo a septiembre, lo cual coincide con los meses de más precipitación ver Gráfica 3, debido a las condiciones climatológicas propias de estos meses y para esta región.

3.1.2 Río Jamapa

En la Gráfica 3.2 se puede observar el resultado del comportamiento temporal de la temperatura y la salinidad en la desembocadura del río Jamapa a dos metros de profundidad. La concentración salina oscila entre las 35.6 y 36.4 psu, existiendo muy poca amplitud de esta variable. El comportamiento de la concentración salina y la temperatura mantienen una buena correspondencia, pues al aumentar la temperatura, aumenta la precipitación, Gráfica 3.3 disminuye la salinidad y viceversa.



Gráfica 3.2 Variabilidad temporal promedio de la Salinidad y la Temperatura en la desembocadura del río Jamapa.

El momento de menos concentración salina es a finales de agosto, dado que es de los meses que más evaporación hay debido a la radiación solar y por tanto formación de condiciones para que se propicie aporte de agua de lluvia por precipitación al cauce del río, la temporada lluviosa se extiende de mayo a noviembre. El mes de enero se comporta como el de mayor concentración salina llegando hasta los 36.35 psu, coincidiendo este mes como el de menos precipitación, ver Gráfica 5.

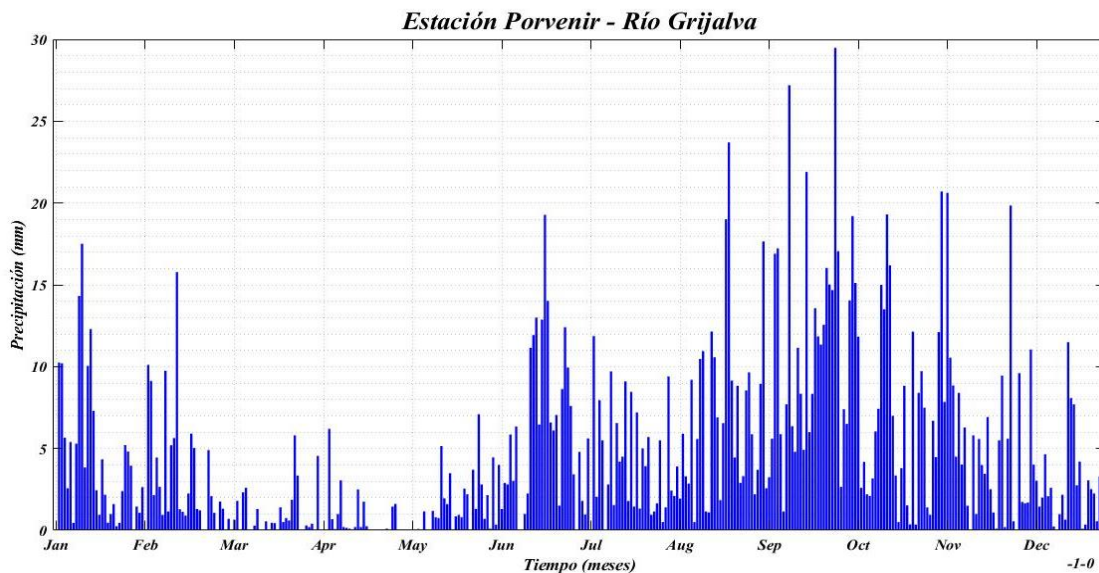
La temperatura oscila entre los 22.6 y 29.6 °C durante el año, donde alcanza los valores más bajos en enero-febrero y llega a los valores más elevados precisamente de agosto y septiembre, coincidiendo con los meses de más precipitación para esta región, como resultado de las condiciones climatológicas propias de estos meses.

3.2 Comportamiento temporal de la precipitación y el caudal en los ríos analizados.

Los resultados de la variabilidad temporal del caudal de los ríos obtenidos de datos de CONAGUA, donde se utiliza una data de 15 años desde (2001-2015). Se grafican datos promedios por meses.

3.2.1 Río Grijalva

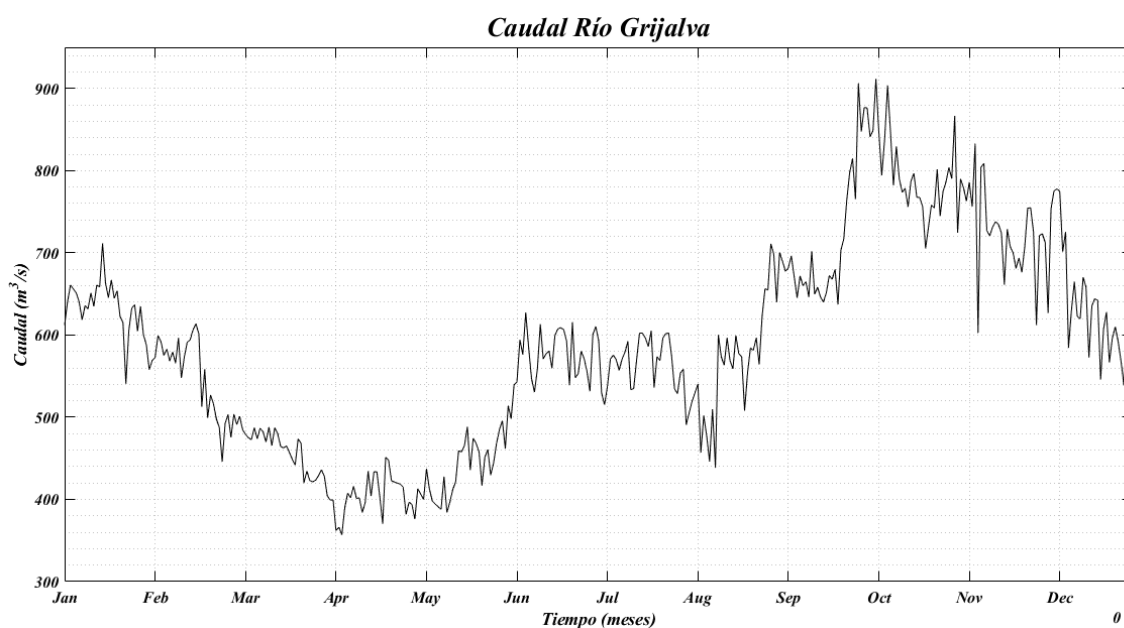
La temporada de lluvias es en general de junio a octubre en el Alto Grijalva y de junio a febrero en el Bajo Grijalva; cómo se puede observar, esta última es la que tiene un período de lluvias que abarca la mayor parte del año, comprendiendo tres estaciones: verano, otoño e invierno. Sólo la primavera es relativamente seca en estas subregiones; en verano llueve con intensidad; donde llegan las lluvias torrenciales conocidas como turbonadas. Cuando el calendario marca el otoño y el invierno, empiezan a soplar los nortes, que se traducen en prolongadas lluvias, menos impetuosas que las del verano y que pueden durar varias semanas. Los ríos y lagunas alcanzan su máximo nivel entre septiembre y noviembre, entonces se producen las inundaciones, cuyo efecto para la agricultura resulta desastroso, especialmente en la llanura tabasqueña.



Gráfica 3.3 Precipitación promedio (2001-2015). Estación 27096, Porvenir. Aledaña al río Grijalva.

La estación hidrométrica 27096 con nombre Porvenir, está localizada en el estado de Tabasco. Sus registros pluviométricos se encuentran desde 2001-2013. En la Gráfica 3.3 se aprecia el comportamiento promedio por día de la precipitación en (mm) durante el año.

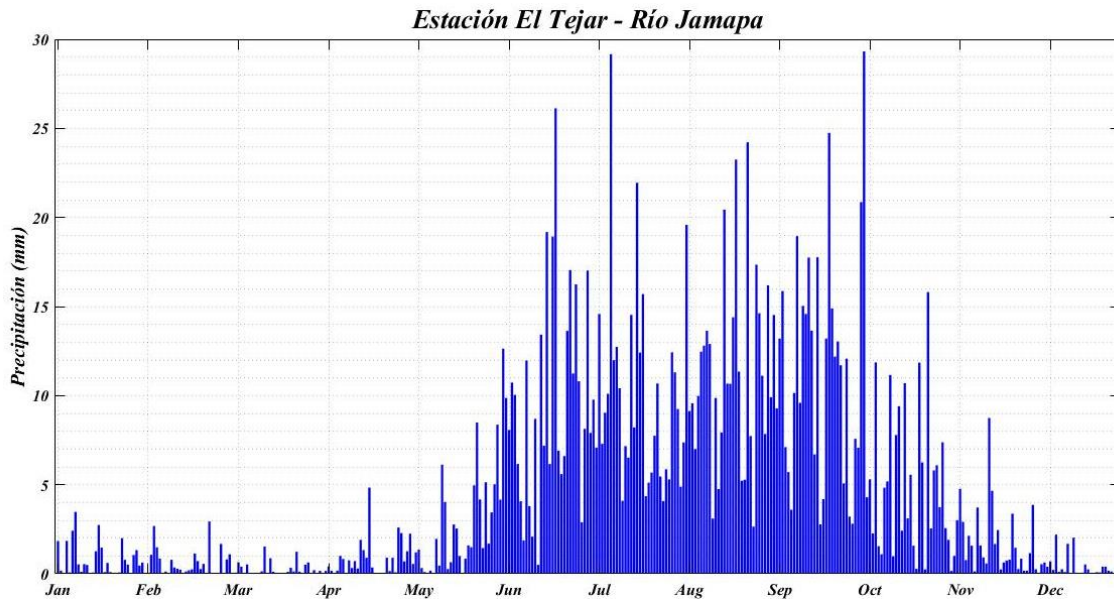
El comportamiento del caudal del río Grijalva se manifiesta principalmente por la contribución a la cuenca de los cauces secundarios y a la precipitación en la región en gran medida, ver Gráfica 3.4. Al comparar las fluctuaciones de la precipitación y del caudal, se logra apreciar que la tendencia del comportamiento de este último está condicionado por la precipitación. Desde los meses de enero a abril hay un decrecimiento del aporte de agua precipitable y por consiguiente una notable disminución del caudal. El momento donde mayores registros de lluvia hay es a finales de septiembre con un pico máximo de alrededor de 30 mm, denotándose en esta misma fecha máximos de caudal de entre 800 y 900 m³/s. Cuando hay más descarga se diluye un poco el mar y cuando hay menos descarga no se diluye. El factor limitante real, para la generación de energía es el propio caudal, todo depende de la cantidad de agua que esté presente en el río analizado.



Gráfica 3.4 Variación temporal promedio del caudal en el río Grijalva (2001-2015).

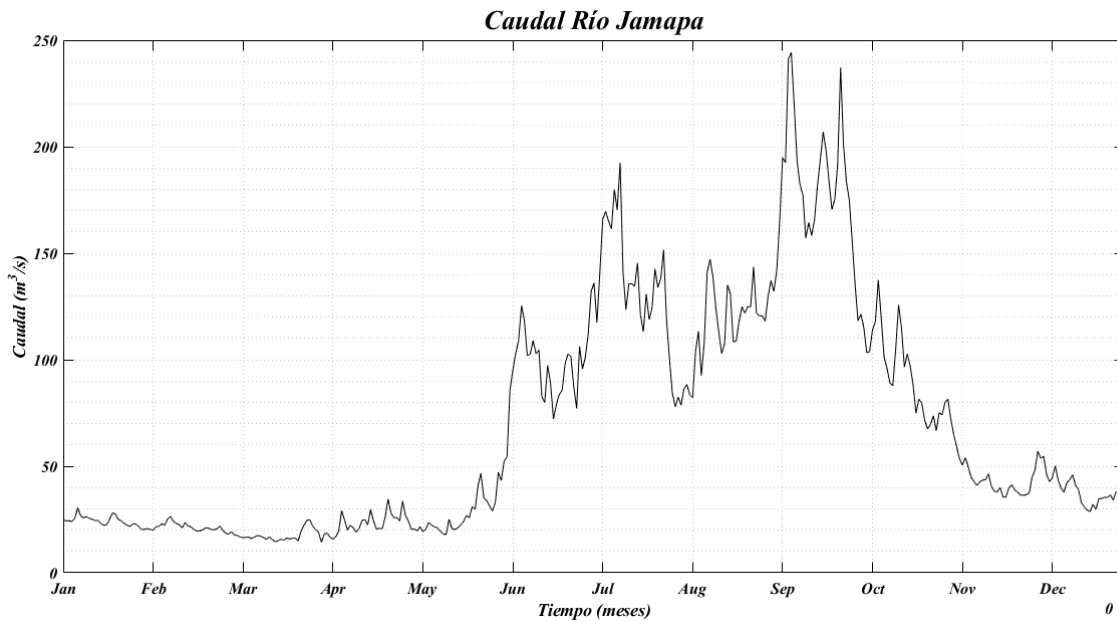
3.2.2 Río Jamapa

La estación 30056 El Tejar, perteneciente al estado de Veracruz de Ignacio de La Llave registra datos de variables meteorológicas correspondientes a un clima tropical. En invierno hay en Veracruz mucho menos lluvia que en verano. El régimen de lluvia impuesto, incide directamente en el comportamiento del caudal de río Jamapa como se puede observar en la Gráfica 3.5.



Gráfica 3.5 Precipitación promedio (2001-2015). Estación El Tejar.

El caudal del río Jamapa presenta un comportamiento muy estable durante los primeros cinco meses del año mostrándose con fluctuaciones entre los 15 y 45 m³/s, ver Gráfica 6. Se comparan las tendencias de la precipitación y del caudal para este río, donde se logra apreciar que el comportamiento tiene un parecido a la campana de Gauss en ambas gráficas. Desde los meses de junio a octubre hay un aumento del aporte de agua precipitable y por consiguiente un notable aumento del caudal. Esto producto a la influencia del anticiclón subtropical que se encuentra en estos meses sobre el océano Atlántico y el mar Caribe que a su vez incentiva la formación de centros de bajas presiones sobre el área de estudio, provocando inestabilidad, movimientos convectivos (formaciones nubosas) y precipitación durante estos meses. El momento donde mayores registros de lluvia hay en el mes de septiembre con valores sobre los 15 mm, denotándose en esta misma fecha máximos de caudal de entre 200 y 250 m³/s. Por otro lado es sabido que el caudal es también un factor limitante, donde es verdad que cuando es menor habrá una menor difusión marina y por lo tanto la salinidad mayor nos empuja el potencial energético hacia arriba pero también es posible que el caudal no sea suficiente para la producción en determinados lugares. ver Gráfica 3.6.



Gráfica 3.6 Variación temporal promedio del caudal en el río Jamapa (2001-2015).

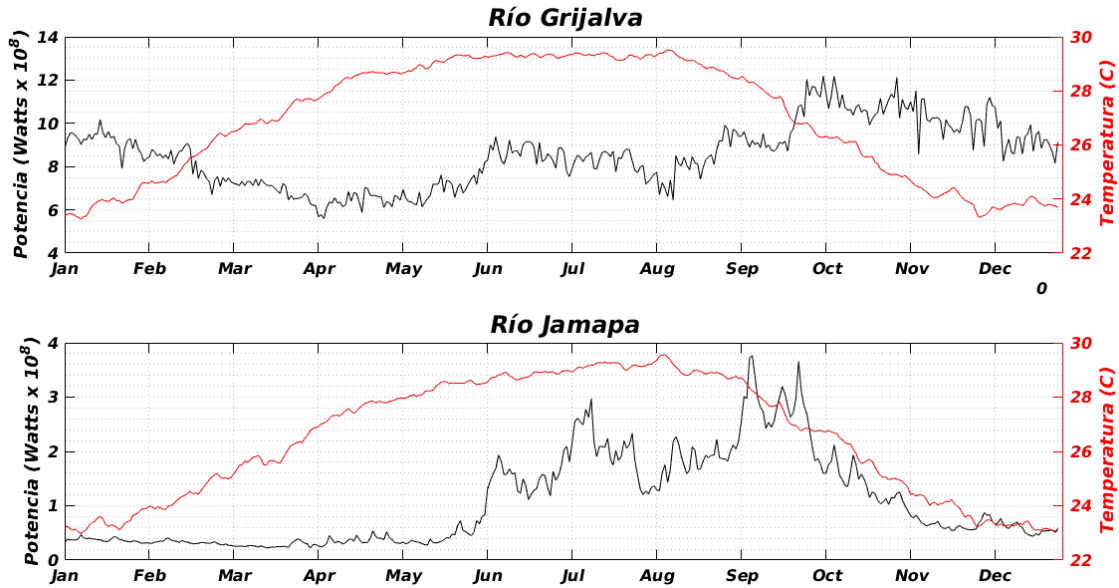
3.3 Potencial de Energía Osmótica casos de estudio

El potencial de energía osmótica (watts) alcanzado en cada uno de los ríos estudiados, responde al análisis realizado al valor de las variables implicadas directamente en las ecuaciones de: Van't Hoff, la presión hidrostática, la ecuación de Bernoulli, el teorema de Torricelli y la energía cinética.

Los resultados del potencial que se obtienen de este análisis están sobre estimados y una de las causas es que se emplea en su cálculo todo el caudal del río, cuestión que es imposible de efectuar, por lo que se aclara y se tiene en cuenta. La metodología empleada en la de (Bárceñas, 2014)

3.3.1 Potencial y Temperatura vs tiempo

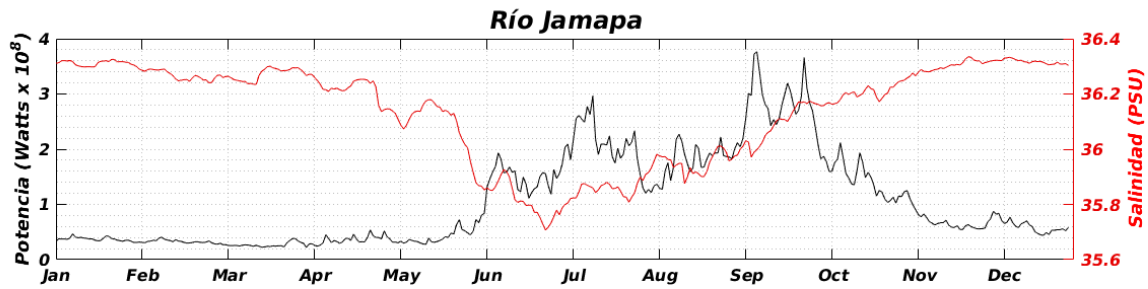
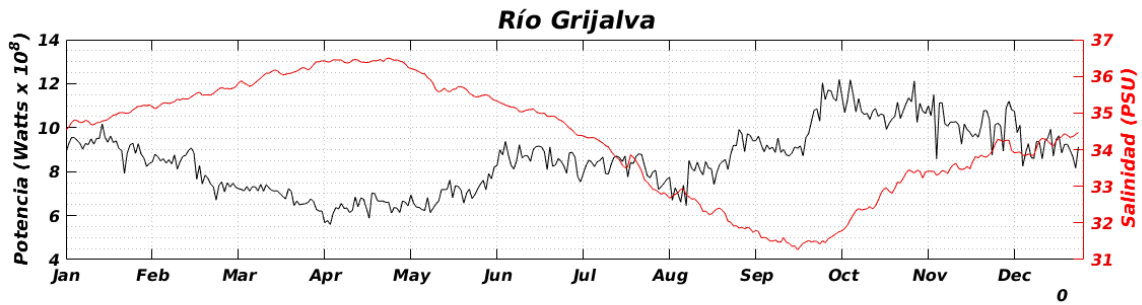
El potencial obtenido presenta un comportamiento distinto en ambos ríos durante todo el año según la Gráfica 3.7. Oscila para el Grijalva entre los 5 y 12 x 10⁸ Watts y para el Jamapa entre los 0.1 y 4 x 10⁸ Watts. Se puede apreciar que su comportamiento no depende de la variación de la temperatura. Esta última presenta una amplitud para ambos ríos desde los 23 hasta los 30°C y su comportamiento temporal es similar, regido por los períodos de lluvias y por la temperatura ambiente.



Gráfica 3.7 Comportamiento del Potencial (Watts) y su correspondencia con la temperatura. Río Grijalva gráfica superior y río Jamapa gráfica inferior.

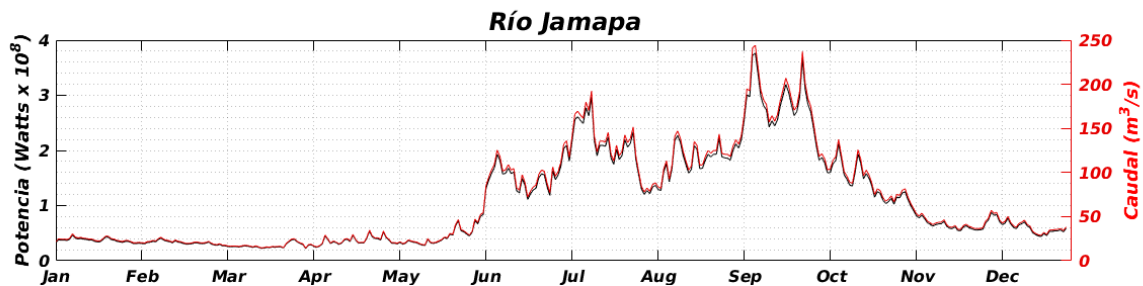
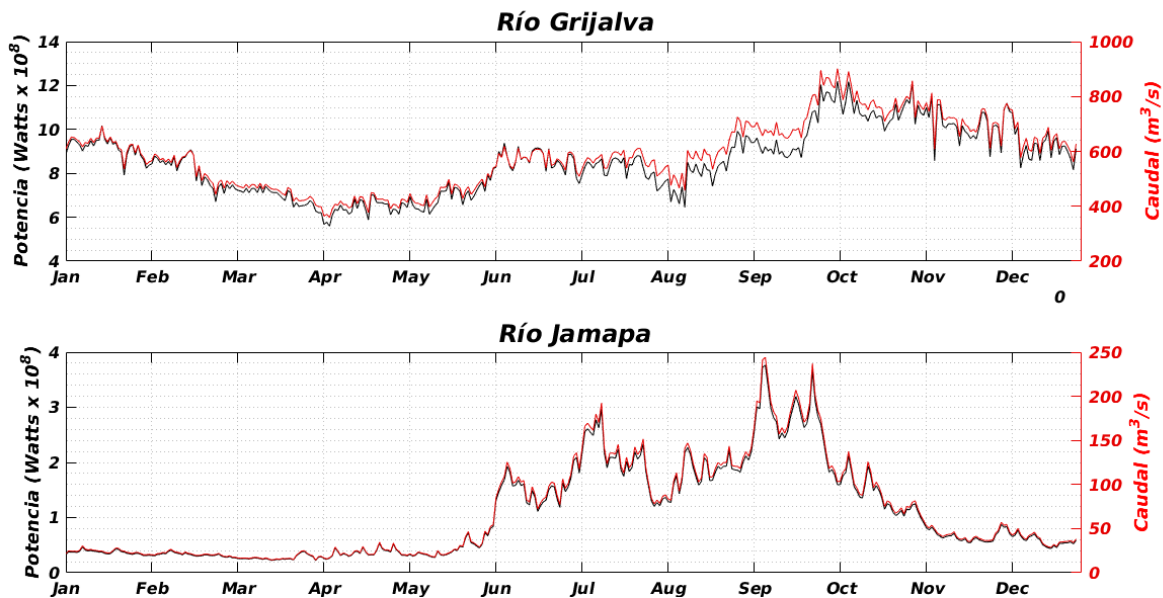
3.3.2 Análisis temporal del Potencial y la Salinidad vs tiempo

En la Gráfica 3.8 se muestra el comportamiento de la salinidad (psu) y su incidencia sobre el Potencial. Donde esta variable no incide de forma fuerte en el comportamiento del potencial. Se aprecia que la salinidad para el río Grijalva oscila entre los 31 y 37 psu. En el análisis para el río Jamapa se observa como fluctúa su comportamiento temporal, aunque en este caso su amplitud apenas llega a 1 psu, puesto que se encuentra entre 35.6 y 36.4 psu. En este último río se puede entender que la salinidad a 2 m de profundidad no disminuye como en el caso del Grijalva, porque presenta un caudal menos fuerte y esto hace que la presencia de agua con más salinidad se encuentre presente por más tiempo.



Gráfica 3.8 Comportamiento del Potencial (Watts) y su correspondencia con la salinidad. Río Grijalva gráfica superior y río Jamapa gráfica inferior.

3.3.2 Análisis temporal del Potencial y el Caudal vs tiempo



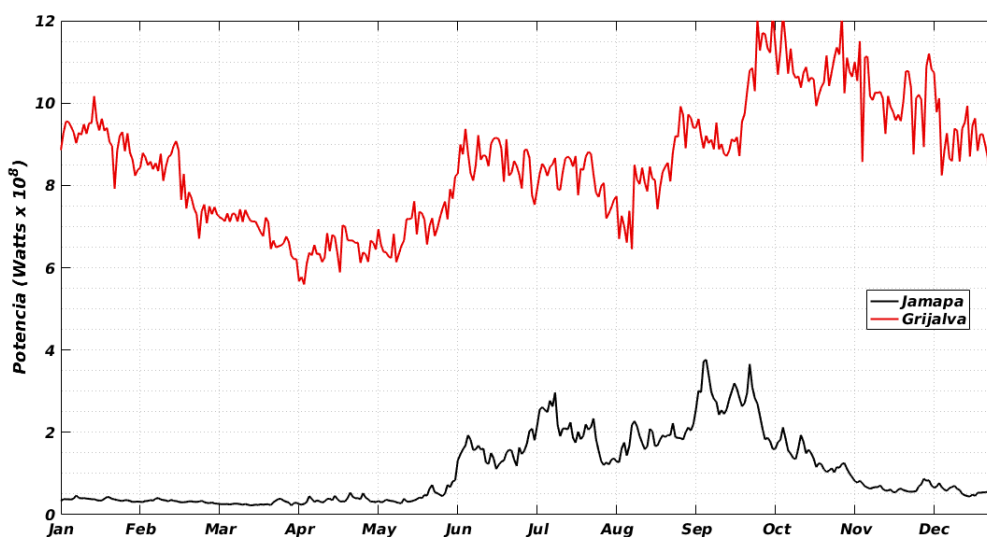
Gráfica 3.9 Comportamiento del Potencial (Watts) y su correspondencia con el caudal. Río Grijalva gráfica superior y río Jamapa gráfica inferior.

En la Gráfica 3.9 se logra apreciar el comportamiento del potencial y el caudal en el año. Para el río Grijalva se hace evidente que son casi iguales los comportamientos de los gráficos del Potencial y del caudal, esto se demuestra por la magnitud que tiene la variable “caudal”

en la ecuación para el cálculo del potencial en la metodología de (Bárceñas, 2014). Similar comportamiento se observa en la Gráfica 3.9, río Jamapa, donde coinciden las fluctuaciones del potencial y el caudal de igual forma.

3.3.3 Análisis temporal del Potencial en el río Grijalva y Jamapa vs Tiempo

El potencial energético teórico proveniente del gradiente salino en determinados sitios, viene regido por la propia diferencia de salinidad entre dos masas de aguas, la temperatura del agua, la densidad de la misma y el caudal existente en el caso de la desembocadura de los ríos. En la Gráfica 3.10 se puede observar que el potencial del río Grijalva es superior al del río Jamapa y esto se debe a que, en la metodología empleada para llegar a estos resultados, el caudal rige en gran medida el comportamiento temporal y la magnitud del potencial.



Gráfica 3.10 Comparación del potencial entre los ríos Grijalva y Jamapa.

Y es precisamente el caudal del río Grijalva superior al del Jamapa y esto se refleja en la comparación de ambos potenciales.

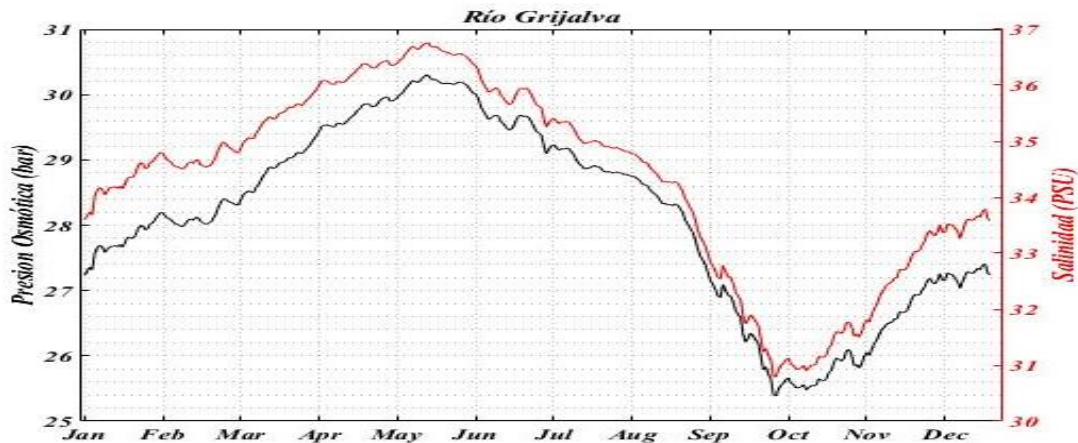
La metodología por la que se llegan a estos resultados subestima en gran medida los valores del Potencial, esto es debido a que se utiliza todo el caudal en la ecuación empleada, cuestión que es imposible debido a que no se puede emplear todo el caudal en la generación de energía del gradiente salino.

3.4 Comportamiento y variación temporal de las variables temperatura y salinidad vs Presión Osmótica, Potencial y Generación de energía (Kelada, 2010).

3.4.1 Presión Osmótica

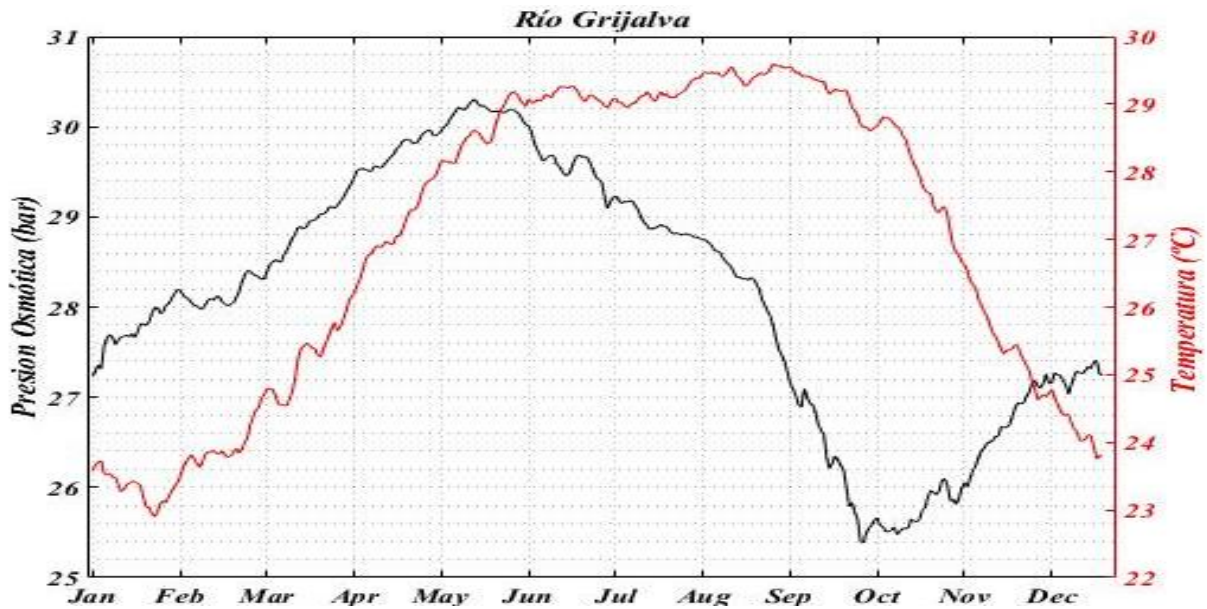
3.4.1.1 Río Grijalva

A partir de la ecuación de presión osmótica analizada por (Kelada, 2010) en la sección 2.9.2, podemos ver en Anexos Gráfica A el comportamiento temporal de la Presión, y su correlación con la salinidad, ver Gráfica 3.11. El comportamiento de la Presión depende en gran medida de la variabilidad de la salinidad, observándose un máximo de presión en el mes de mayo y un mínimo a finales de septiembre y principios de octubre.



Gráfica 3.11 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Grijalva

La temperatura del agua, es parte del resultado del comportamiento de la presión osmótica, esta muestra un comportamiento correlacionado con la presión, donde sus valores se encuentran desde 23 °C hasta 29.5 °C ver gráfico 3.12.

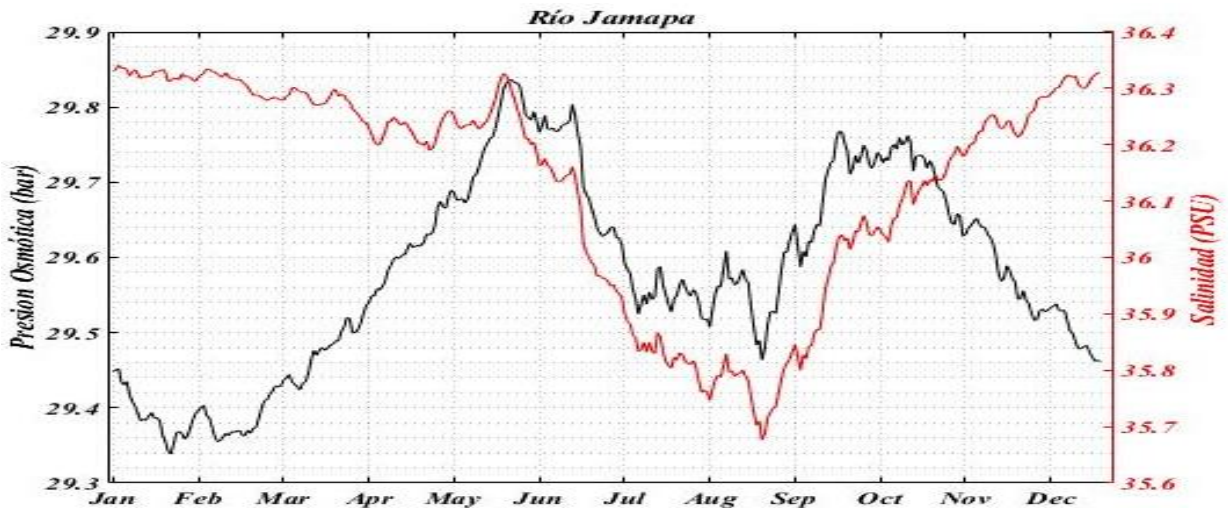


Gráfica 3.12 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Grijalva

Los sitios donde las condiciones son propicias para la generación de energía proveniente del gradiente salino, presentan un determinado potencial teórico, el cual se puede aprovechar para el beneficio social. A partir de la presión osmótica se determina el potencial en MJ/m^3 .

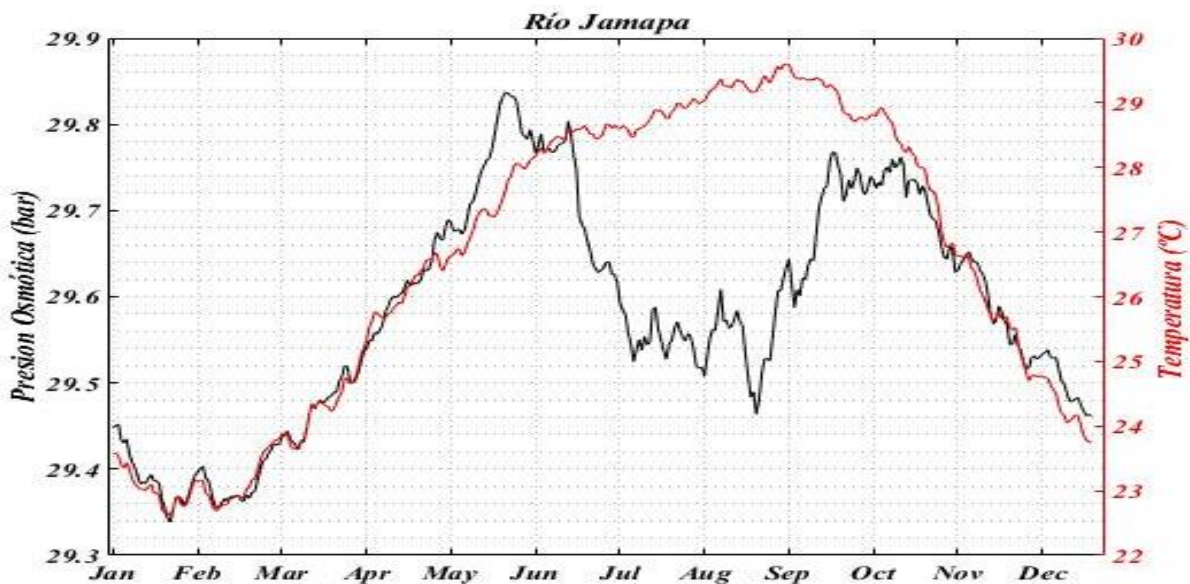
3.4.1.2 Río Jamapa

El comportamiento temporal de la presión de río Jamapa se aprecia en Anexos Gráfica B y su correlación con la salinidad se puede observar en la Gráfica 3.13. La conducta de la presión varía desde los 29.3 hasta los 29.9 bar. En los primeros cinco meses del año, a pesar de que la salinidad se comporta de forma estable la tendencia de la presión es a aumentar su valor desde enero hasta mayo. Desde el mes de junio hasta noviembre, se puede observar como si tienen una correlación directa la salinidad con la presión osmótica. A finales del mes de octubre se aprecia comportamientos opuestos entre la presión y la salinidad, donde a pesar que sean directamente proporcionales en la ecuación, está la temperatura como otra variable implicada en el comportamiento de la presión osmótica.



Gráfica 3.13 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Jamapa

En la gráfica 3.14 la presión osmótica se vincula con la temperatura, donde se observa que desde enero hasta junio el comportamiento de la presión viene regido muy notoriamente por el comportamiento de la temperatura y de igual forma sucede así de octubre a diciembre. En los meses de junio a principios de octubre es la salinidad la que rige el comportamiento más marcado hacia el resultado de los valores de la presión osmótica.

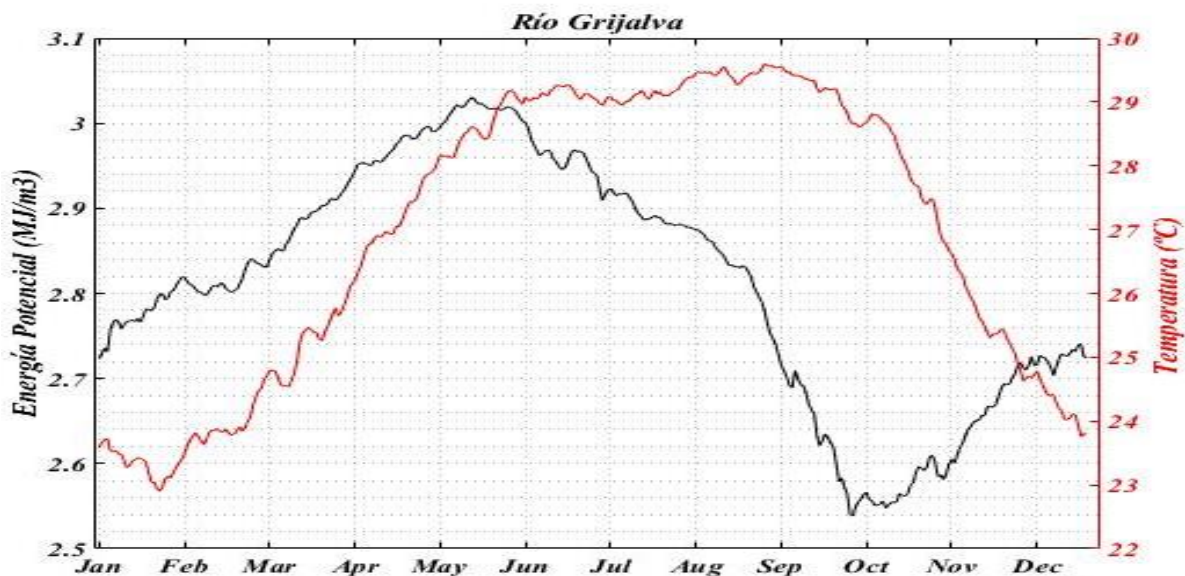


Gráfica 3.14 Comportamiento temporal de la Presión Osmótica y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Jamapa

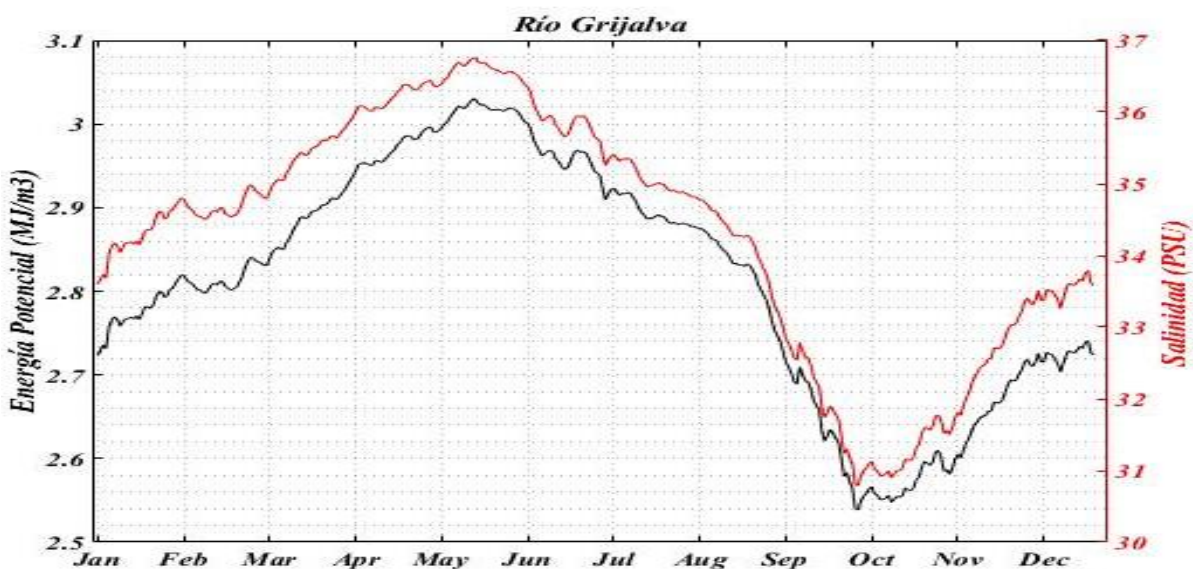
3.4.2 Energía Potencial

3.4.2.1 Río Grijalva

El río Grijalva presenta un potencial teórico, ver Anexos Gráfica C, que oscila desde 2.5 hasta 3.1 MJ/m³, donde se ve su comportamiento temporal y su vínculo con la temperatura en la Gráfica 3.15. En la gráfica 3.16 se muestra al potencial teórico y su correspondencia con la salinidad para el mismo río Grijalva.



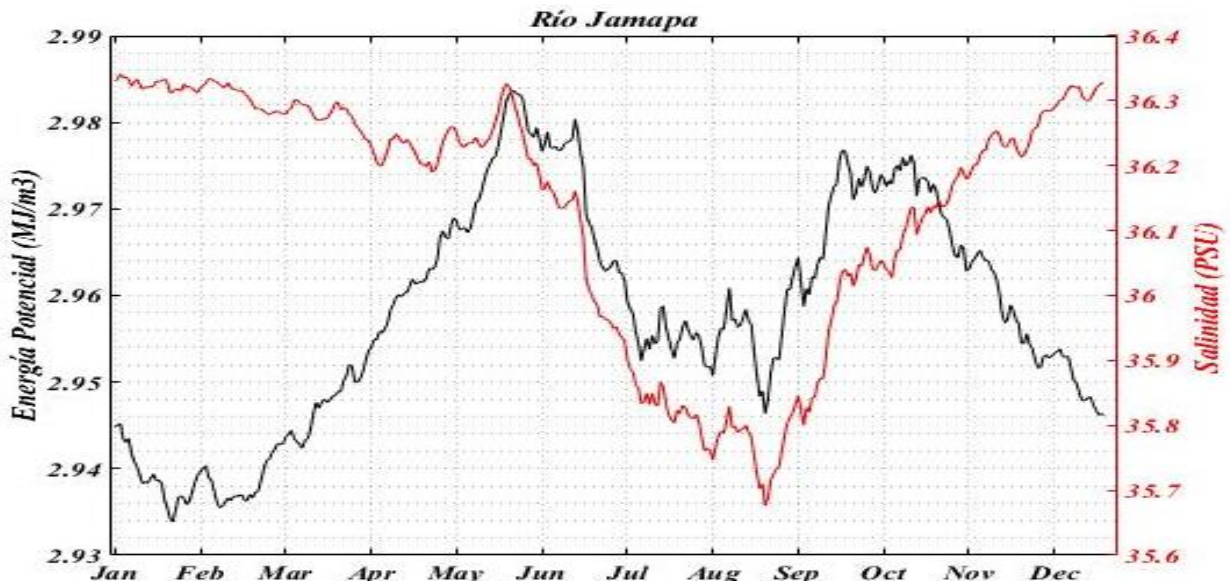
Gráfica 3.15 Comportamiento temporal de la energía potencial y la temperatura promedio en la desembocadura del río Grijalva



Gráfica 3.16 Comportamiento temporal de la energía potencial y la salinidad promedio en la desembocadura del río Grijalva

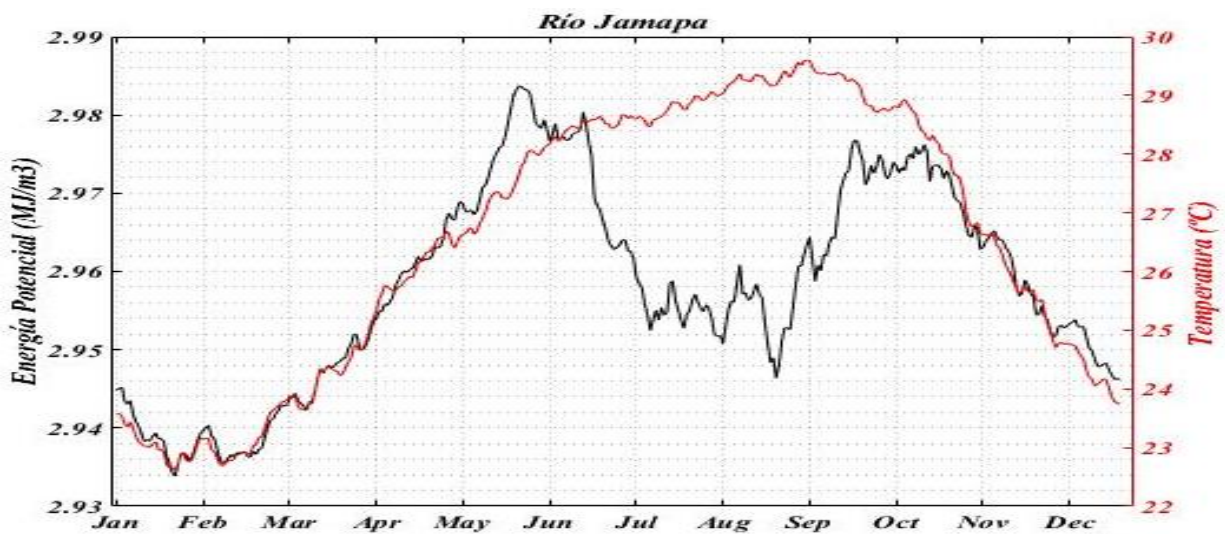
3.4.2.1 Río Jamapa

La energía potencial del río Jamapa oscila durante el año desde 2.93 hasta 2.99 MJ/m³ ver Anexos Gráfica D. El momento en el cual presenta mayor potencial es en mayo y el de menor valor se observa a finales de enero. En la gráfica 3.17 se muestra el comportamiento del potencial teórico y su vínculo con la salinidad.



Gráfica 3.17 Comportamiento temporal de la energía potencial y la salinidad promedio en la desembocadura del río Jamapa

En la gráfica 3.18 se muestra el potencial energético en MJ/m³ junto al comportamiento de la temperatura en igual período de tiempo.

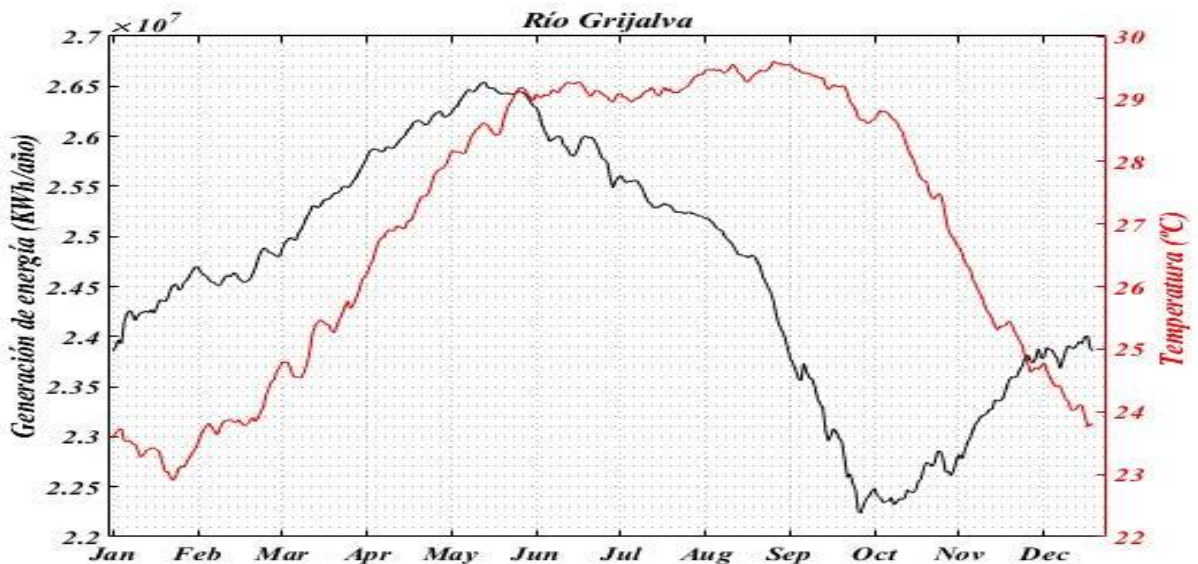


Gráfica 3.18 Comportamiento temporal de la Energía Potencial y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Jamapa

3.4.3 Generación de energía

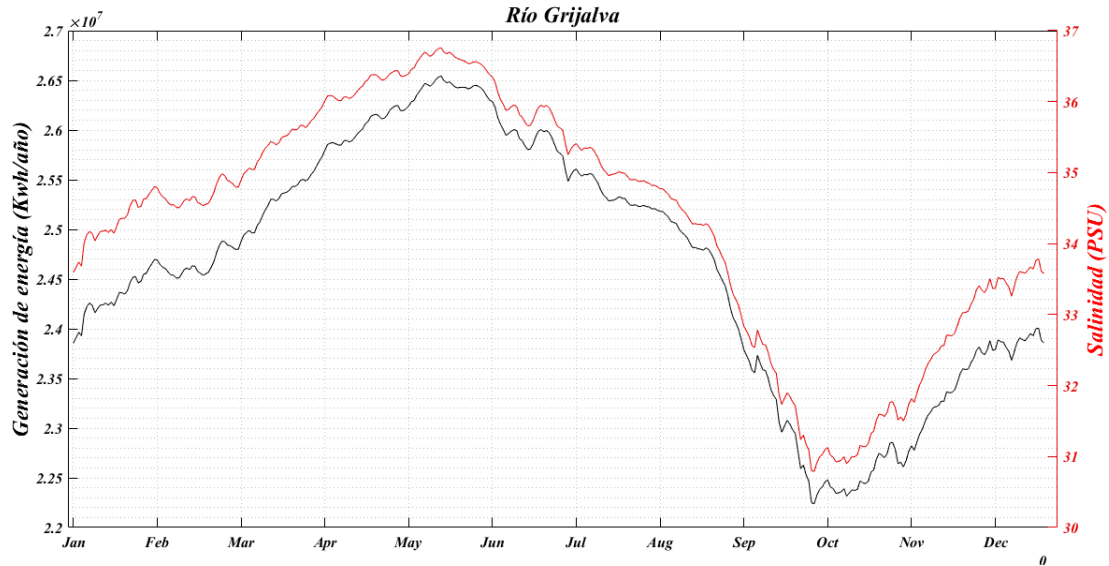
3.4.3.1 Río Grijalva

En caso de generar energía continuamente (1 m^3 por segundo, de cada hora), como es el caso de los sistemas de generación de energía y se asume que está en funcionamiento sin parar 365 días, cuestión que es imposible debido al mantenimiento que debe efectuarse como parte del proceso de funcionamiento de una planta de generación de energía. Se tendría una generación de energía en el río Grijalva como se observa en Anexos Gráfica E, y su correspondencia con la temperatura se observa en la Gráfica 3.19.



Gráfica 3.19 Comportamiento temporal de la generación de energía con un flujo constante de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ las 24 horas del día los 365 días del año y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Grijalva

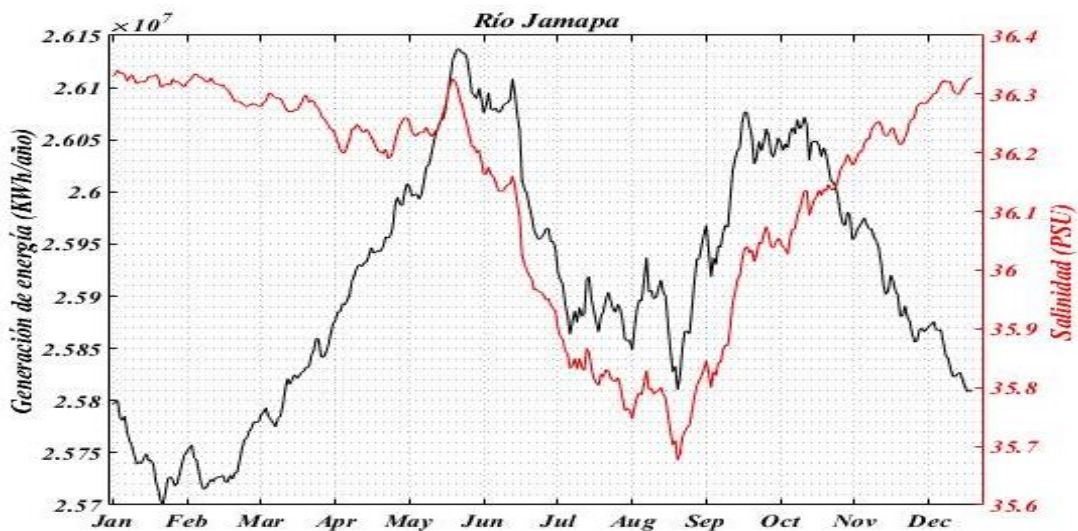
La generación de energía en el río Grijalva oscila desde 2.2×10^7 hasta los 2.65 KWh/año . Se observa en la Grafica 3.20 su correlación con la salinidad temporal durante todo el año. Es apreciable como a medida que aumenta la salinidad o disminuye así ocurre con la generación de energía, lo que demuestra que en su mayor medida están directamente proporcionales. Aunque no es la salinidad la única variable implicada en los resultados de la generación de energía.



Gráfica 3.20 Comportamiento temporal de la generación de energía con un flujo constante de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ las 24 horas del día los 365 días del año y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Grijalva

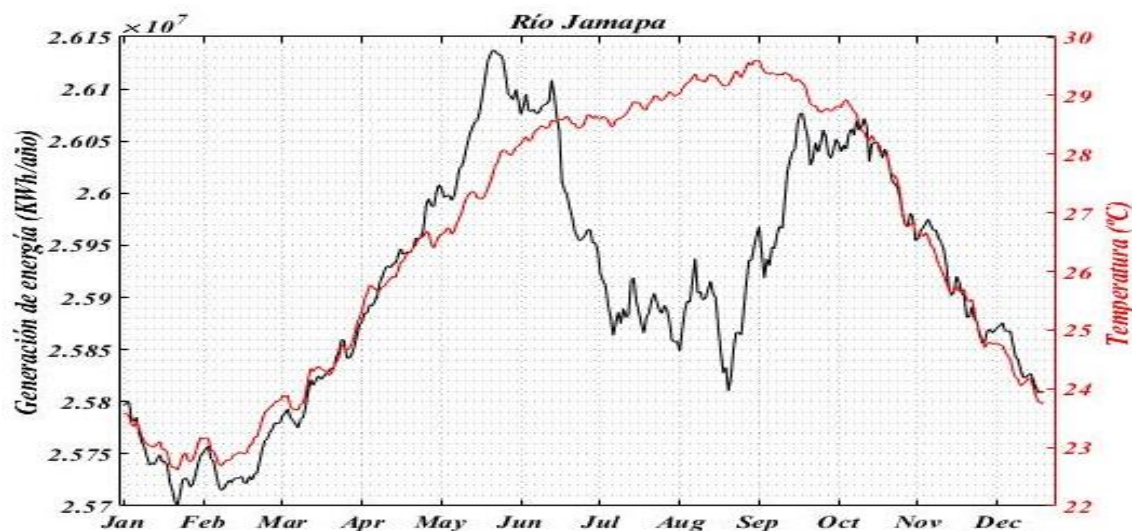
3.4.3.2 Río Jamapa

Para el análisis del río Jamapa se tienen las mismas condiciones de: (1 m^3 por segundo, de cada hora), sin parar los 365 días del año. Y se obtiene que la generación de energía oscila desde los 2.57 hasta los 2.615 KWh/año, ver Anexos Gráfica F. El máximo de generación se observa a finales de mayo y el mínimo a finales de enero. Y la salinidad oscila desde los 35.6 hasta los 36.4 psu, donde es máxima en el mes de enero y mínima en el mes de agosto. Ver Gráfica 3.21.



Gráfica 3.21 Comportamiento temporal de la Generación de energía con un flujo constante de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ las 24 horas del día los 365 días del año y la Salinidad promedio en la desembocadura del río Jamapa

En la Gráfica 3.22 se muestra la correlación existente entre la generación de energía y la temperatura en la desembocadura del río Jamapa. Es evidente que, en los primeros meses del año, tal y como va en aumento la temperatura así lo hace la generación de energía, luego del mes de octubre vuelven a comportarse similar la tendencia en sus valores.



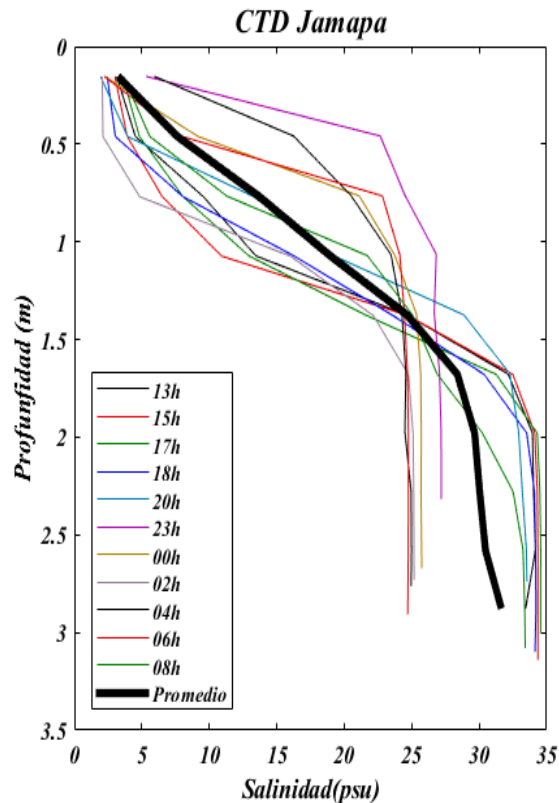
Gráfica 3.22 Comportamiento temporal de la Generación de energía con un flujo constante de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ las 24 horas del día los 365 días del año y la Temperatura promedio en la desembocadura del río Jamapa

3.5 Mediciones reales Río Jamapa

En el país existen numerosos ríos que tienen un afluente considerable y salinidad cercana a 0 psu que descargan al mar. Los mares mexicanos tienen régimen micro-mareal, lo que es favorable para el desarrollo de gradientes pronunciados, ya que permite la estratificación y por lo tanto convergencia de agua marina (34 psu) con agua dulce en distancias cortas.

Adicionalmente, la posición geográfica del país y sus características climáticas en combinación con la geomorfología continental de muchas regiones del país, permiten el desarrollo de agua con características hipersalinas en sistemas costeros, que pueden potencialmente incrementar de manera importante la fuerza de los gradientes de densidad por diferencias en concentración salina. Estos sistemas costeros existen tanto en el Pacífico como en el Golfo de México y en particular en sitios donde se explota naturalmente la sal marina, como Oaxaca y Yucatán.

Con un equipo CTD, se efectuaron 11 mediciones cada dos horas, durante 25 horas para cerrar un ciclo de marea completo (porque la marea en el golfo de México es diurna) en los días 28 y 29 de junio de 2018, de las que se muestran los resultados de los valores de salinidad desde superficie hasta los 3 metros de profundidad.



Gráfica 3.23 Lances de CTD en la desembocadura del Río Jamapa efectuados desde el día 28 de junio a las 13:00 hasta el 29 de junio a las 08:00

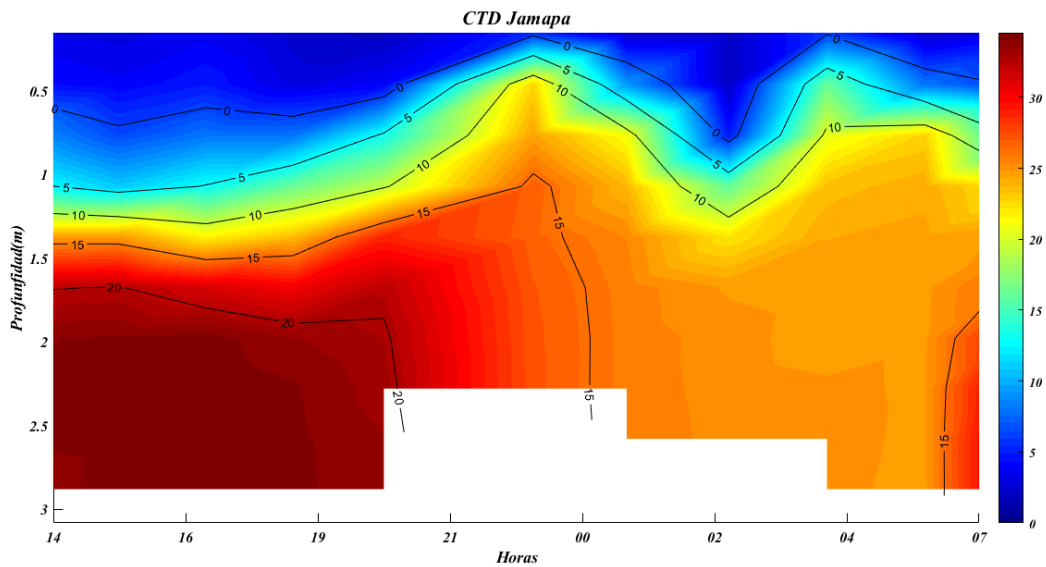
Por otro lado, en el planeta los procesos no nada más fluctúan en la escala temporal-estacional, se hace un análisis en una escala de tiempo mucho menor, donde se observa que está pasando a lo largo de horas en las mareas. Hay una pronunciada estratificación de la columna de agua que señala una cuña de agua marina en el fondo y el flujo de agua dulce flotando en la superficie hasta aproximadamente un metro de profundidad. en los perfiles se puede observar que esta condición varía con la marea, de forma que en algunos momentos el agua dulce superficial se reduce mucho y la columna de agua está mezclada con salinidad de agua salobre mientras que en otros momentos claramente hay agua dulce arriba y agua marina abajo, ver Gráfica 3.23. El perfil vertical en la desembocadura del río Jamapa, donde se muestra el comportamiento de la salinidad en 11 mediciones durante dos días. Como estamos en presencia de un río de poco caudal, se hace notorio que en superficie la salinidad en casi cero y a medida que va entrando en profundidad aumenta dicha salinidad hasta los 35 psu en tan solo 3.5 metros. Esto se debe a que el agua proveniente del mar hace entrada varios kilómetros río adentro, también están condicionados estos valores por el comportamiento de las mareas y el poco caudal en la desembocadura de este río.

En los Anexos Gráfica G, se aprecia el comportamiento de la salinidad a 1 km, a 10 km y 20 km de la desembocadura del río Jamapa, con datos descargados del HYCOM. Y a profundidades que van desde superficie hasta 12 m de profundidad. Ver Tabla 3.1

Tabla 3.1 Salinidad promedio a 1 km, 10 km y 20 km y a una profundidad de 12 metros de la desembocadura, del río Jamapa

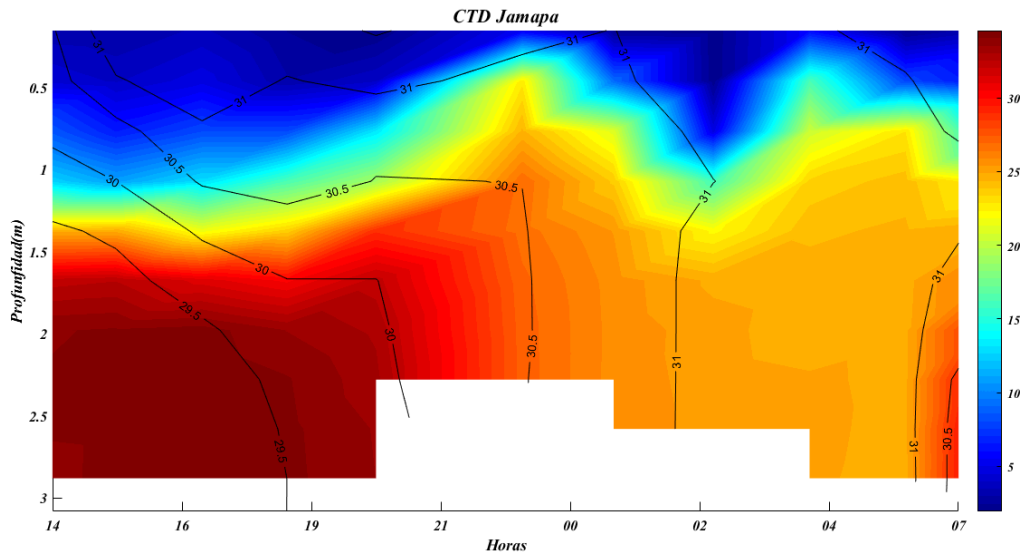
Profundidad m y distancia Km	1 km	10 km	20 km
Superficie	36.03 psu	36.01 psu	36.01 psu
6 m	36.05 psu	36.02 psu	36.03 psu
12 m	36.07 psu	36.07 psu	36.12 psu

Estos resultados se ven afectados en cuanto a sus valores reales y comportamiento en la vertical y la horizontal, debido a que el modelo HYCOM cerca de las costas no arroja valores que estén cerca de los valores reales. Más hacia el océano mejoran los resultados del comportamiento de las variables. Los ríos más importantes en cuanto a su interés social, económico y ambiental van a tener mejor resolución para sus estudios dado que son de más interés a la comunidad científica, ver Anexos Gráfica I.



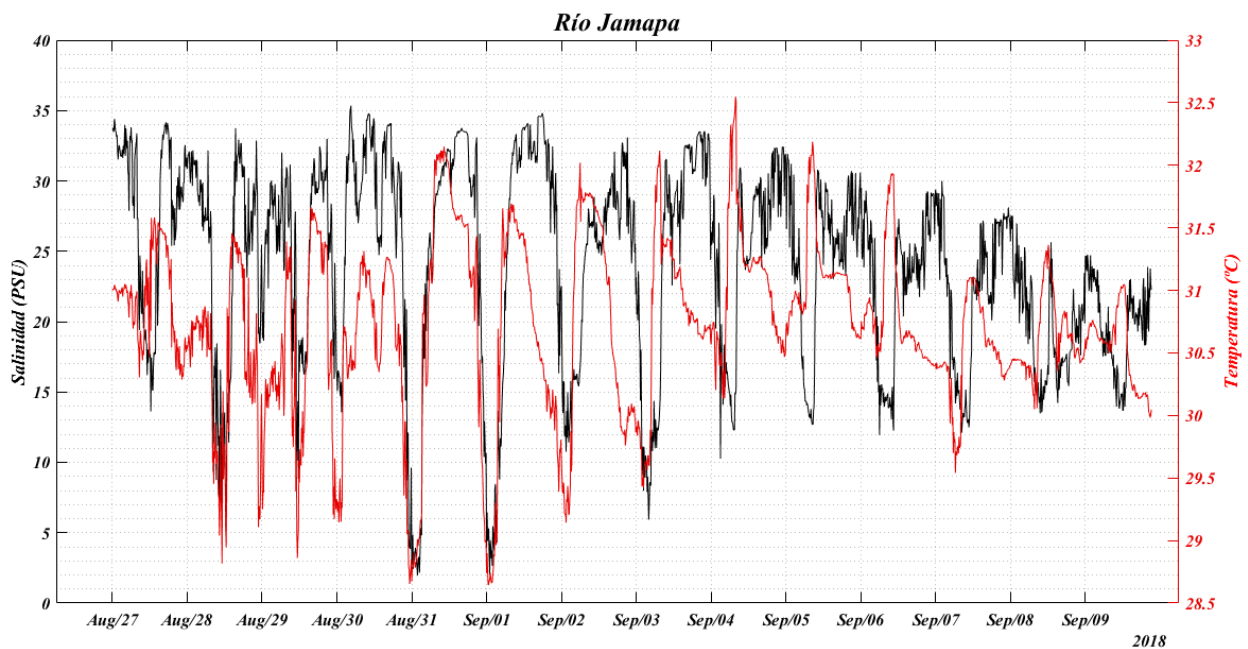
Gráfica 3.24 Lances de CTD desembocadura del Río Jamapa. Profundidad, salinidad y densidad del agua

En la Gráfica 3.24 se puede observar en la leyenda con colores el comportamiento de la salinidad que oscila desde 0 hasta 35 PSU. Las isolíneas muestran las líneas de igual densidad del agua (Kg/m^3), donde claramente se aprecia como aumenta con la profundidad dicha densidad. El ploteo de los valores es: 0 para 1000, 5 para 1005... 20 para 1020 kg/m^3 . El momento del día donde mayor salinidad ha es a tres metros de profundidad y va desde las 14:00 hasta las 19:00 del día 28 de junio.



Gráfica 3.25 Lances de CTD desembocadura del Río Jamapa. Profundidad, salinidad y temperatura del agua

En la Gráfica 3.25 se observa en las isoterma el comportamiento de los valores de temperatura en el perfil vertical y en el transcurso del tiempo. Los valores más elevados de temperatura se encuentran en la superficie y van decreciendo en la profundidad, oscila desde 29.5 hasta 31 °C. Con el tiempo se van homogenizando los valores de la temperatura desde la superficie hasta los tres metros de profundidad, esto se observa más marcado a partir de las 02:00 del día 28 de junio.



Gráfica 3.26 Datos de DIVERs cada 10 minutos, desde el día 27 de agosto al 09 de septiembre de 2018, a 3.4 metros de profundidad

La Universidad Veracruzana tiene instalados sensores permanentes de salinidad y temperatura a 3.4 m de profundidad en la desembocadura del río Jamapa, datos que fueron otorgados por el Dr. Mark Marin para complementar este trabajo.

En la Gráfica 3.26 se muestra el comportamiento de la salinidad y la temperatura con estos datos reales medidos in situ en la desembocadura del río Jamapa. La salinidad muestra una amplitud, la cual varía en un mismo día como máximo 30 PSU y como mínimo 5 PSU aproximadamente, esta variación es mucho más amplia en mareas vivas que en mareas muertas. Esto demuestra que en un mismo punto durante el día oscila su valor notablemente.

Para los días 8 y 9 de septiembre se nota como disminuye la amplitud de los valores de la salinidad y temperatura y esto se debe en parte, a que había **inestabilidad atmosférica superior** y el paso de las **ondas tropicales No. 36 y 37** sobre el occidente y sureste de México, ocasionaron desarrollo de nubes de tormenta con lluvias fuertes y muy fuertes en gran parte México. Lo que hace con las precipitaciones que haya agua mezclada.

La temperatura presenta una variación desde los 28.5 hasta los 32.5 °C. Para los días 31 de agosto y 1 de septiembre se muestra como la tendencia de aumentar o disminuir tiene una correlación directa con el comportamiento de la salinidad.

Estos resultados muestran, aproximadamente a 3.5 metros de profundidad, en la desembocadura del río Jamapa, que la salinidad puede variar durante el día con una gran amplitud. Esto es más provechoso para el proceso de obtención de energía cuando la diferencia de salinidad es más amplia.

Conclusiones

- El potencial de energía osmótica en la desembocadura de los ríos Grijalva y Jamapa fue determinado a través la metodología de Kelada 2010, con valores promedios de 2.8 MJ/m^3 para el Grijalva y 2.96 MJ/m^3 para el Jamapa. Por la metodología de Bárcenas 2014, $9 \times 10^8 \text{ W}$ para el Grijalva y $2 \times 10^8 \text{ W}$ para el Jamapa.
- Los valores de las variables estudiadas, (salinidad y temperatura en la desembocadura de ríos del Golfo de México), son propicias para generar energía osmótica, con valores de salinidad de entre 31 y 37 PSU para el río Grijalva y entre 35.7 y 36.4 PSU y los valores de temperatura entre los 23 y 30 °C para ambos ríos
- La variabilidad temporal de las precipitaciones influyó directamente en la salinidad, en las desembocaduras estudiadas. Regido por el período lluvioso (mayo-noviembre) y el poco lluvioso (diciembre-abril). Donde durante el período lluvioso la salinidad fue fluctuando con los valores más bajos (35.7 PSU) Jamapa y (30.9) Grijalva, y en el período poco lluvioso con los valores más elevados de (36.3 PSU) Jamapa y (36.8) Grijalva. Debido a la dilución de agua dulce con agua de mar.
- La capacidad de obtener energía de río Grijalva de forma estable es mayor que la del Jamapa debido a la variabilidad del caudal analizado en ambos ríos. Donde es de $650 \text{ m}^3/\text{s}$ el caudal promedio para el Grijalva y de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ para el Jamapa.
- La presión osmótica para el Río Grijalva presentó valores entre 25.5 bar y 28.4
- Si se mantiene una planta funcionando continuamente durante 1 año, puede generar energía en el río Jamapa con un valor de $2.59 \times 10^7 \text{ kWh/año}$ y en el río Grijalva $2.5 \times 10^7 \text{ kWh/año}$.

Recomendaciones

- Analizar a profundidad el impacto ambiental que generaría este tipo de tecnología en los sitios apropiados para su implementación
- Se recomienda medir con equipos in situ, las variables (temperatura y salinidad) a analizar para este tipo de tecnología, para los sitios: San Fernando, Panuco, Tuxpan, Papaloapan y Coatzacoalcos
- Se propone hacer los cálculos con la metodología de la energía Libre de Gibbs (ver epígrafe 1.2) para los ríos Grijalva y Jamapa.
- Se debe tener en cuenta la variabilidad de la salinidad en la escala temporal de unas horas, pues existe una variación muy notoria de la amplitud salina en un mismo día en el orden de 20 PSU, lo que puede afectar en el proceso de generación de energía eléctrica.
- Se propone hacer cálculos con las variabilidades de las variables analizadas a futuro para saber el comportamiento de las mismas y la efectividad de generación de energía a largo plazo.
- Hacer cálculos para obtener presión, potencia y generación de energía con datos de mediciones satelitales disponibles en el sitio: simar.conabio.gob.mx
- Analizar el costo económico que traería para México implementar este tipo de tecnología

Bibliografía

- CONAGUA. (2012). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México.
- Olsson, M., Wick, G. L., & Issacs, J. D. (1979). Salinity Gradient Power: Utilizing Vapor Pressure Differences. *Science*, 206, 452-454.
- AGUA.org.mx. (19 de 06 de 2019). Obtenido de <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>
- Banco Mundial. (23 de octubre de 2018). Obtenido de Banco Mundial: <http://www.bancomundial.org>, 2018
- BANDAS. (05 de 10 de 2015). *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. Obtenido de Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: <https://www.imta.gob.mx/bandas>
- Bárceñas, J. F. (2014). *Evaluación del potencial de conversión de energía renovable en el mar Caribe Mexicano*. Ciudad de México.
- BBC. (25 de Noviembre de 2009). Energía a base de Osmosis. *BBC*. Obtenido de https://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2009/11/091124_energia_osmotica_m_en
- Cavanagh, J. E., Clark, J. H., & Price, R. (s.f.). Ocean Energy Systems. *Renewable Energy: Sources for fuels and electricity.*, 513-547.
- CEMIE-OCEANO. (2018). *Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano*. Recuperado el 01 de 05 de 2019, de Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano: <https://cemieoceano.mx/index.html>
- Chassignet, E. P., & Hurburt, H. E. (2007). El sistema de asimilación de datos HYCOM (modelo híbrido coordinado oceánico). *Journal of Marine Systems*, 1-3.
- CONAGUA. (2011). Subdirección General Técnica.
- CONAGUA. (2014). Estudio para el proyecto hidrológico para proteger a la población de inundaciones y aprovechar mejor el agua (PROHTAB). Recuperado el 12 de mayo de 2019, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Capitulo12prohtab.pdf>
- CONAGUA. (2016). Ciclo hidrológico. *Atlas del agua en México 2016*, 20-32. Recuperado el 19 de 06 de 2019, de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/atlas-del-agua-en-mexico-2016.pdf>
- CONAGUA. (s.f.). Estudio para el proyecto hidrológico para proteger a la .
- Delgado Díaz, S. (2017). *Energía Osmótica: Una renovable prometedora en desarrollo*. Arrecife (Lanzarote).

- Drioli, E., & Macedonio, F. (2012). *Membrane Engineering for Water Engineering*. Industrial & Engineering Chemistry Research. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/ie2028188>
- Feng, J. e. (2016). Single-layer MoS₂ nanopores as nanopower generators. *Nature*, 536.
- Finley, W., & Pscheidt, E. (2001). Obtenido de Hydrocratic Generator: <https://patents.google.com/patent/ES2242599T3/es>
- Gerstandt, K., Peinemann, K., Skilhagen, S., & Thorsen, T. (15 de abril de 2008). Membrane processes in energy supply fot an osmoic power plant. *Desalination*, 224, 64-70. Recuperado el 5 de enero de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916408000325#!>
- GIWA. (01 de mayo de 2019). *Regions and network*. Obtenido de https://www.unenvironment.org/dewa/giwa/areas/regions_and_network.asp.
- Google Earth Pro. (2009). *La herramienta fundamental de investigación, presentación y colaboración para información específica sobre un lugar*. Obtenido de https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/es//intl/es_ar/enterprise/earthmaps/pdf/earth_pro_ds.pdf
- Gunderson, J. (11 de 05 de 2016). *Driving Process Water Efficiency in the Automotive Industry*. Obtenido de Water Wor: <https://www.waterworld.com/industrial/process-water/article/16210874/driving-process-water-efficiency-in-the-automotive-industry>
- Helfer, F., Lemckert, C., & Anissimov, Y. G. (2013). Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – a review. *Journal of Membrane Science*.
- HYCOM. (24 de 12 de 2018). *HYCOM*. Obtenido de HYCOM: <https://www.hycom.org/>
- iea. (12 de octubre de 2018). Obtenido de iea: <https://www.iea.org/weo2017/>, 2017)
- INEGI. (14 de 02 de 2010). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#
- Junyong Hu, S. X. (2019). Multi-stage reverse electrodialysis; Strategies to harvest salinity gradient energy. *Energy Conversion and Management*, 808-815.
- Kelada, M. (2010). Seawater Osmotic Salinity Power Reality. *MIK Technology*.
- Labrecque, R. (2011). *La exergía como una variable útil para evaluar rápidamente la potencia máxima teórica del sistema de energía con gradiente de salinidad*, *Entropy* (11 ed., Vol. 11).
- Lacey, R. E. (1980). Energy by reverse electrodialysis. *Ocean Engineering*, 7(1), 1-47.
- Leonczuk Minetto, R. A., & da Silva Monteiro, D. (2014). *Energía Azul: Generación de energía eléctrica a partir de la diferencia de salinidad del agua de los ríos con la de los mares*. Foz do Iguaçu. Obtenido de <https://unila.edu.br/sites/default/files/files/Robert%20Alexis%20Leonczuk%20Minetto.pdf>

- Loeb, S. (1975). Osmotic Power Plant. *Science*, 189, 654-655.
- Loeb, S. (1976). Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmotic, 1. Preliminary technical and economic correlations. *J. Membrane Science*, 1, 49-63.
- Loeb, S. (1998). Energy production at the Dead Sea by pressure-retarded osmosis: challenge or chimera? *Desalination*, 120(3), 247-262.
- Loeb, S. (1998). Energy production at the Dead Sea by pressure-retarded osmosis: Challenge or chimera? *Desalination*, 247-262.
- Loeb, S. (2001). "One hundred and thirty benign and renewable megawatts from Great Salt Lake? The possibilities of hydroelectric power by pressure-retarded osmosis". *Desalination*, 142, 207.
- Loeb, S. (2001). One hundred and thirty benign and renewable megawatts from Great Salt Lake? The possibilities of hydroelectric power by pressure-retarded osmosis. *Desalination*, 141(1), 85-91. Recuperado el 21 de 05 de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916401003927>
- Loeb, S. (2002). Large-scale power production by pressure-retarded osmosis, using river water and sea water passing through spiral modules. *Desalination*, 143, 115-122.
- Loeb, S., Honda, T., & Rali, M. (1990). Comparative mechanical efficiency of several plant configurations using a pressure-retarded osmosis energy converter. *J. Membrane Science*, 323-335.
- López de Haro, M. (18 de Agosto de 2014). Energía Azul. *Academia de Ciencias de Morelo*, 38-39. Obtenido de http://www.acmor.org.mx/descargas/14_ago_18_azul.pdf
- López de Haro, M. (2014). Energía Azul. *La Unión de Morelos*, 38-39. Obtenido de http://www.acmor.org.mx/descargas/14_ago_18_azul.pdf
- Mendoza, E. (2004). *Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del río Ebro*. Barcelona.
- Morales, J. (25 de noviembre de 2010). *Energía Osmótica o Energía Azul*. Recuperado el 20 de noviembre de 2018, de Energía y sostenibilidad: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2010/11/25/131037>
- Oceanografialitoral*. (01 de 09 de 2019). Obtenido de <http://www.oceanografialitoral.com/productos/ctd-y-sondas/ctd-y-sondas-multiparametricas>
- ONU Medio Ambiente. (5 de diciembre de 2017). *efe*. Obtenido de <https://www.efe.com/efe/espana/sociedad/casi-mil-millones-de-personas-en-el-mundo-viven-sin-electricidad-segun-onu/10004-3458659>
- PAMIC, P. d. (2017). *Cuenca del río jamapa*. Recuperado el 09 de 06 de 2019, de <http://www.c6.org.mx/wp-content/uploads/2017/06/JAM-PAMIC-web9Jun17baja.pdf>

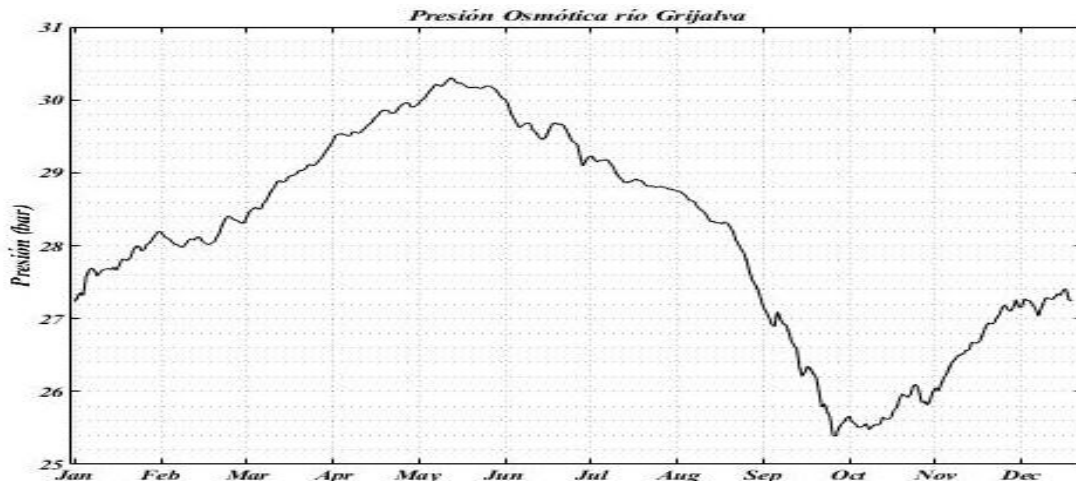
- Pattle, R. E. (1 de 10 de 1954). Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile. *Nature*. Recuperado el 14 de 05 de 2019
- Post, J. W. (2009). *Blue Energy: electricity production from salinity gradients by reverse electrodialysis (Doctoral Thesis)*.
- Post, J. W., Veerman, J., Hamelers, H. V., W. Euverink, G. J., Metz, S. J., Nymeijer, K., & N. Buisman, C. J. (23 de november de 2006). Salinity-gradient power: Evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis. *ScienceDirect*(288), 218-230. Recuperado el 14 de mayo de 2019
- Pousaz, L. (2016). *Iniversitam. Ciencia, investigación, tecnología y desarrollo*. Obtenido de DESARROLLAN UN SISTEMA DE ENERGÍA OSMÓTICA PARA PRODUCIR ELECTRICIDAD CON UNA EFICIENCIA SIN PRECEDENTES: <https://universitam.com/academicos/noticias/desarrollan-un-sistema-de-energia-osmotica-para-producir-electricidad-con-una-eficiencia-sin-precedentes/>
- PRODESEN. (2017). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2018-2032)*. SENER, Ciudad de México. Recuperado el 20 de 04 de 2018, de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>
- Redacción. (11 de junio de 2017). *EcoInventos*. Obtenido de <https://ecoinventos.com/energia-azul/>
- Redacción. (11 de junio de 2017). *EcoInventos*. (Redacción, Editor) Obtenido de Descubre que es la energía azul y su gran potencial.
- Rubio Gutiérrez, H., & Triana Ramírez, C. (2006). Gestión integrada de crecientes. Caso de estudio México: Río Grijalva. (U. d. Técnico, Ed.) *Organización Meteorológica Mundial*.
- SENER. (2017). *Mapa de ruta tecnológica en energía del océano*. Ciudad de México.
- Seppala, A., & Lampinen, M. J. (1999). Thermodynamic optimizing of pressure-retarded osmosis power generation systems. *J. Membrane Science*, 161, 115-138.
- Skilhagen, S. E., Dugtad, J. E., & Aaberg, R. J. (2008). Potencia osmótica - producción de energía basada en la diferencia de presión osmótica entre aguas con gradientes de sal variables. *Desalinización*, 220, 476-482.
- Stenzel, P., & Wagner, H. (2010). Plantas de energía osmótica: análisis de potencial y criterios de sitio. *3ra conferencia internacional de energías del océano*. Bilbao.
- Suk, M., & Aluru, N. (2010). *Water Transport through Ultrathin Graphene*. Beckman Institute for Advanced Science and Technology, Illinois. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/jz100240r>
- The Shift Project Data Portal*. (21 de octubre de 2018). Obtenido de The Shift Project Data Portal: <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source#tspQvDiscussion>, s.f

- Unidata. (17 de 06 de 2019). *Unidata*. Obtenido de Unidata:
<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/faq.html#whatisit>
- Valle-Levinson, A. (2010). *Definición y clasificación de estuarios, en: Temas contemporáneos en estuarios*. Reino Unido. Obtenido de
https://books.google.com.mx/books?id=bL08cUn8xewC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Vermaas, D. A., Saakes, M., & Nijmeijer, K. (2011). *Doble densidad de potencia de los gradientes de salinidad a una distancia reducida intermembrana*. Leeuwarden: Environ. Sci. Technol.
- Viessman, W., & Lewis, G. L. (1989). *Introduction to Hydrology*. Harper & Row.
- Weistein, & Leitz. (1976). "Electric Power from differences in Salinity: the Dyalitic Battery". *Science*, 191, 557-559.
- Wick, G. L. (1978). *Energy*.
- Wolanski, E. (2007). *Estuarine Ecohydrology*. Amsterdam: Elsevier.
- youbioit*. (19 de septiembre de 2018). Obtenido de youbioit:
<https://www.youbioit.com/es/article/shared-information/28121/que-es-osmosis-y-que-la-genera>

Anexos

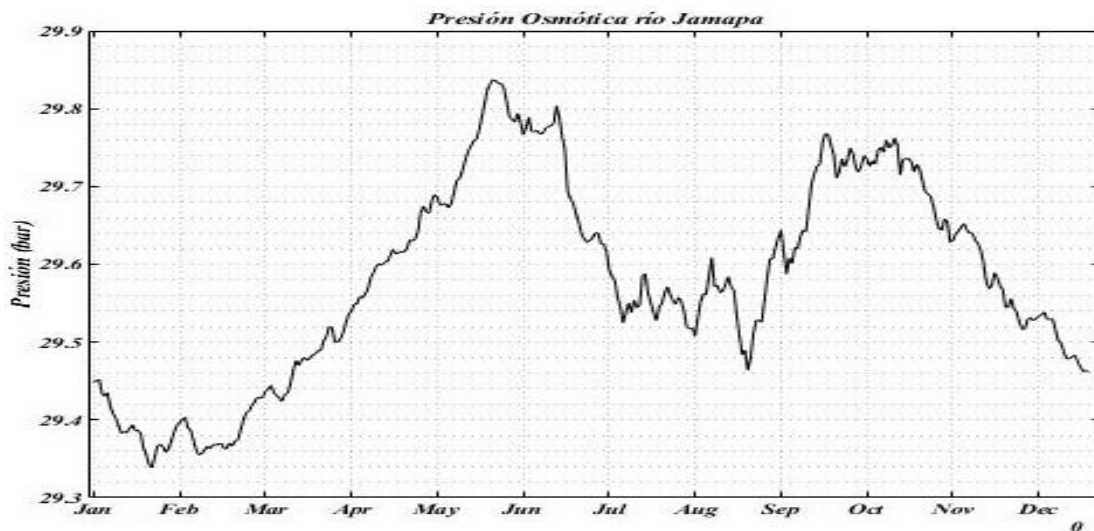
Presión Osmótica

Río Grijalva



Gráfica A Variación temporal promedio de la Presión Osmótica en la desembocadura del río Grijalva, (2001-2015).

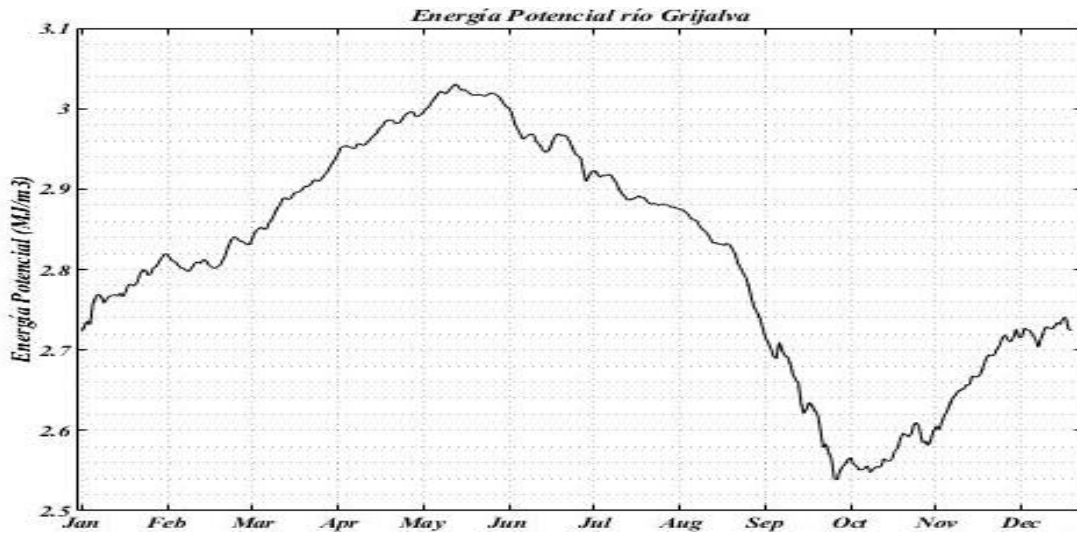
Río Jamapa



Gráfica B Variación temporal promedio de la Presión Osmótica en la desembocadura del río Jamapa, (2001-2015).

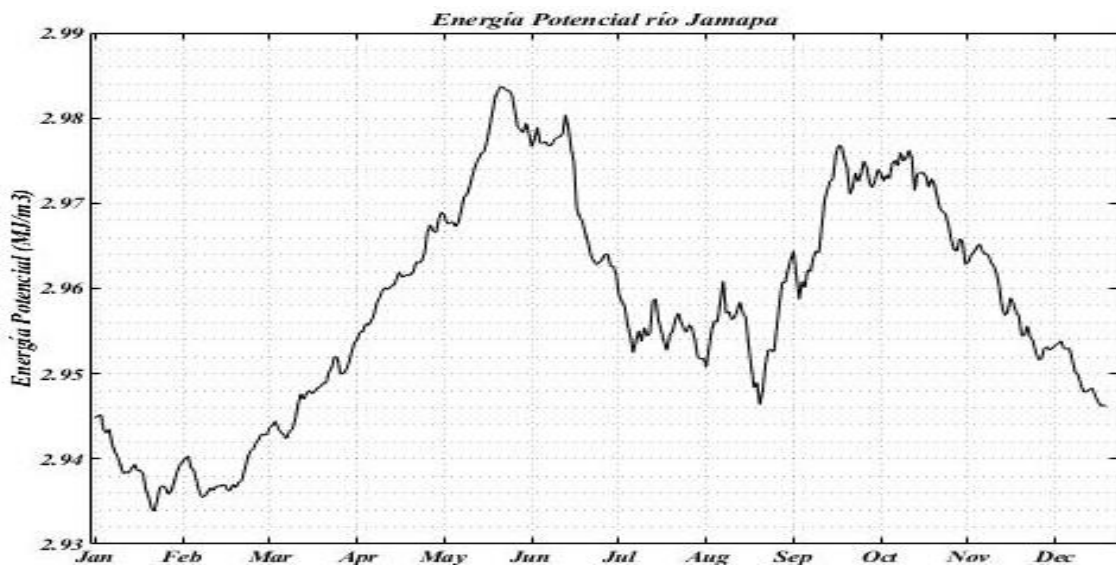
Energía Potencial

Río Grijalva



Gráfica C Variación temporal promedio de la Energía Potencial en la desembocadura del río Grijalva, (2001-2015).

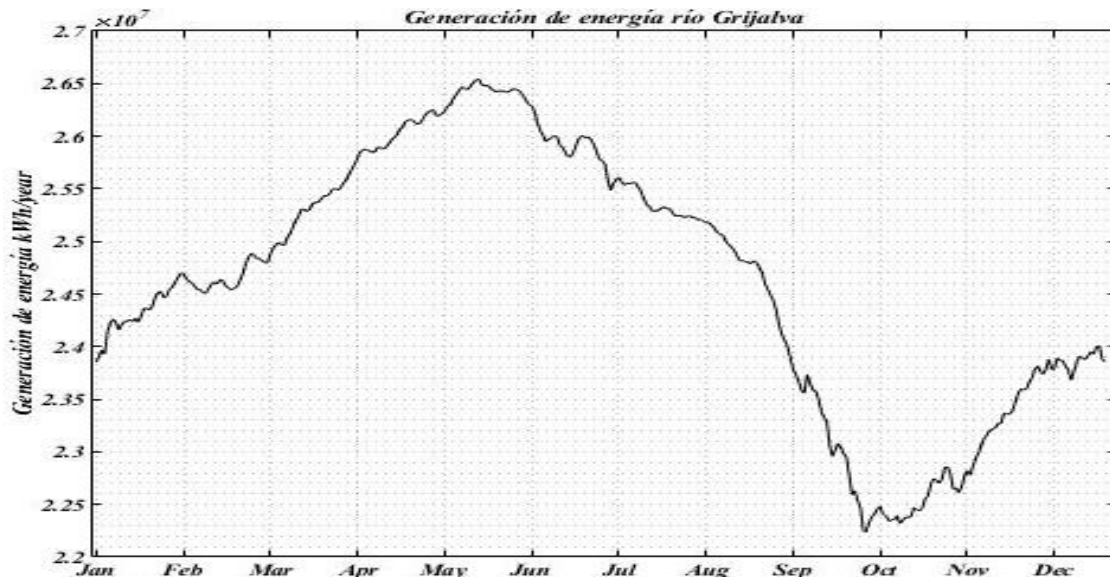
Río Jamapa



Gráfica D Variación temporal promedio de la Energía Potencial en la desembocadura del río Jamapa, (2001-2015).

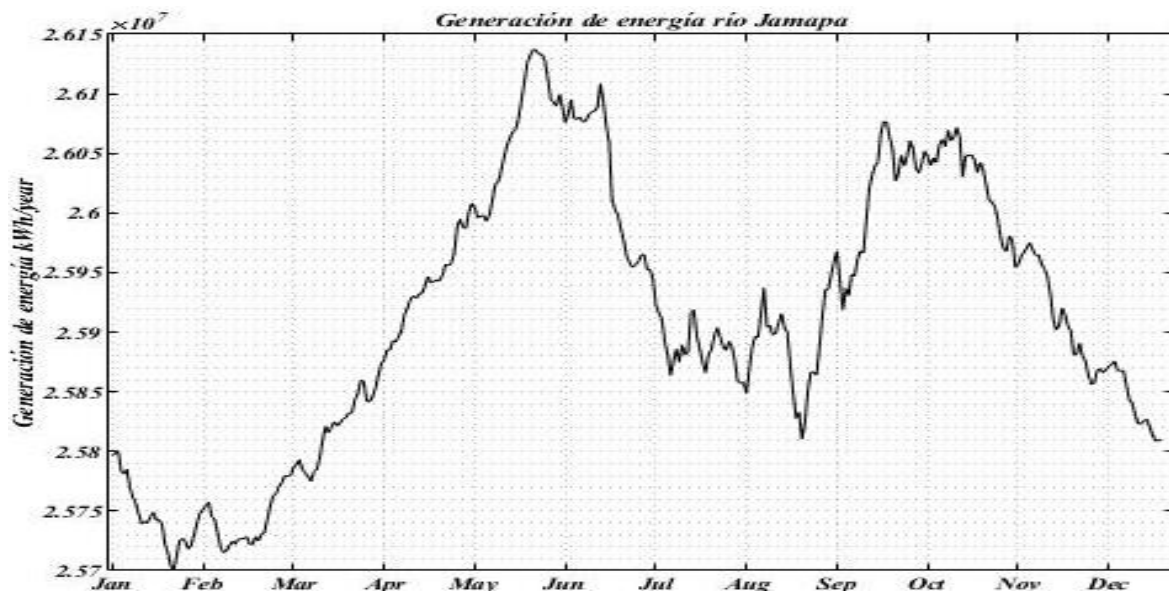
Generación de energía en la desembocadura de ríos

Río Grijalva

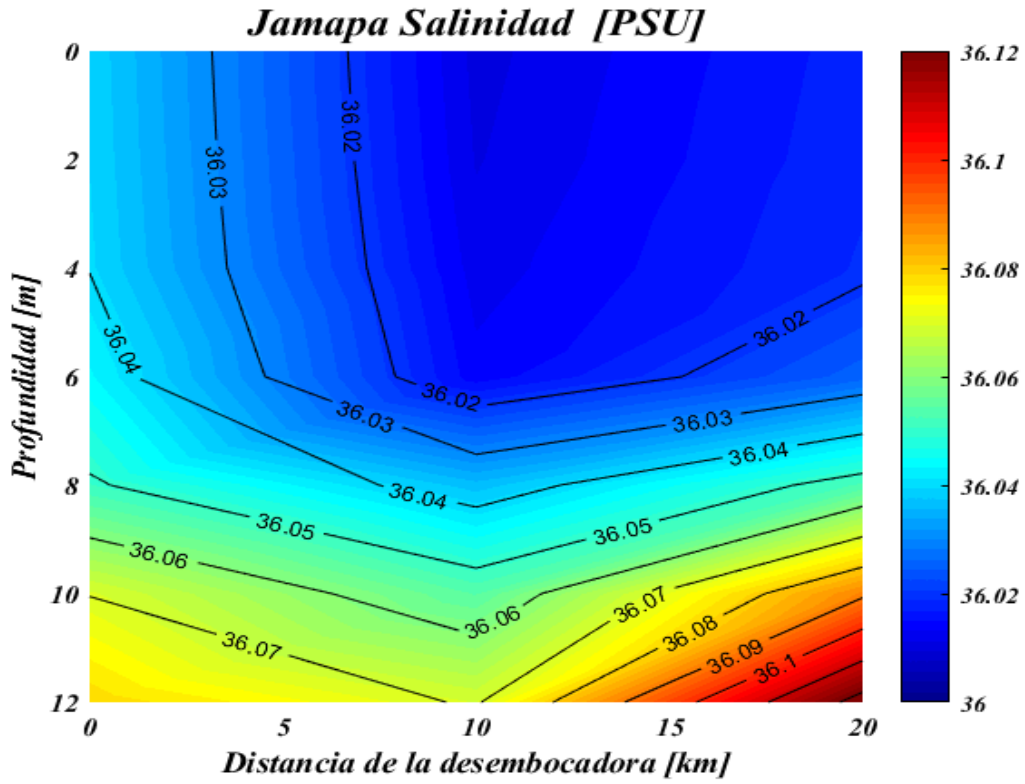


Gráfica 4 Comportamiento de la generación promedio de energía utilizando 1 m³/s. (2001-2015). Río Grijalva

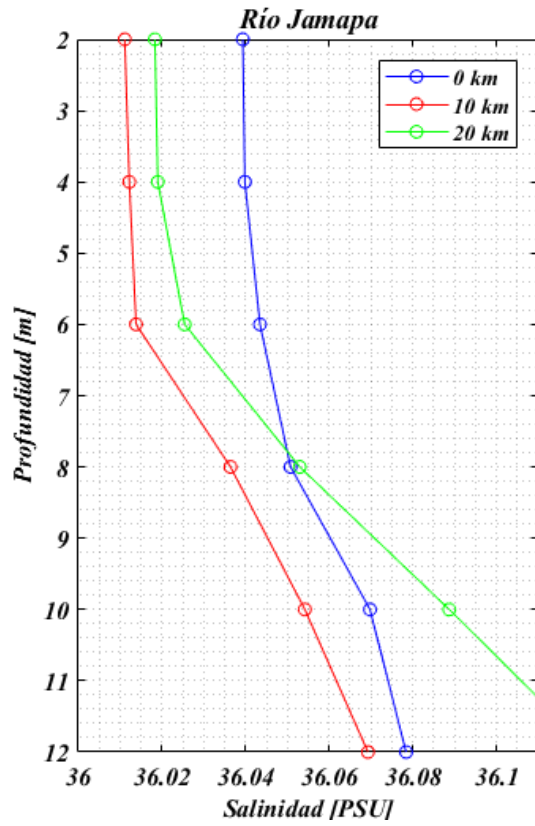
Río Jamapa



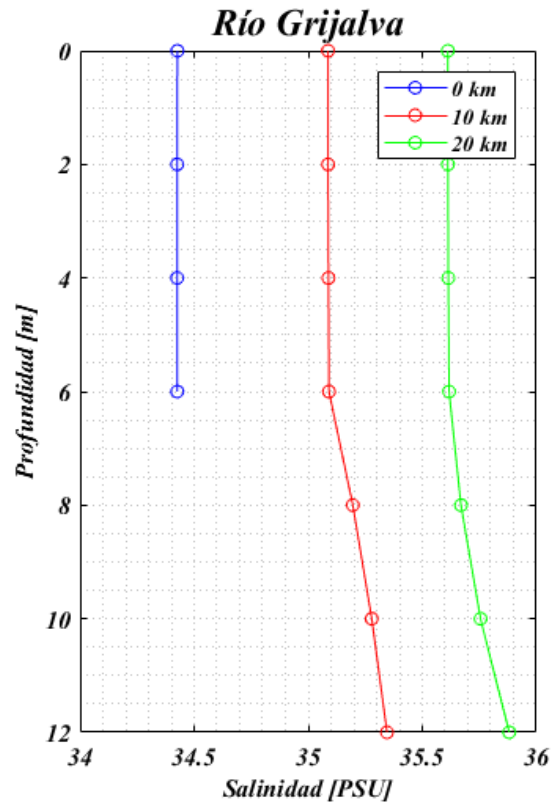
Gráfica F Comportamiento de la generación promedio de energía utilizando 1 m³/s. (2001-2015). Río Jamapa



Gráfica G Variación espacial de la salinidad a 20 km de la desembocadura del río Jamapa y a 12 m de profundidad.



Gráfica H Perfil vertical de salinidad en la desembocadura (0 km) azul, a 10 km) rojo y a (20 km) verde. Datos del Modelo HYCOM



Gráfica I Perfil vertical de salinidad en la desembocadura (0 km) azul, a 10 km) rojo y a (20 km) verde. Datos del Modelo HYCOM. Río Grijalva.

Ríos principales de la vertiente del Pacífico y Golfo de California, Golfo de México y Mar Caribe y de la Vertiente interior.

Ríos principales de la vertiente del Pacífico y Golfo de California						
No.	Río	Región hidrológico-administrativa	Escorrentamiento natural medio superficial (millones de $m^3/años$)	Área de la cuenca (Km^2)	Longitud del río (Km)	Orden Máximo
1	Balsas	IV Balsas	16587	117406	770	7
2	Santiago	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	7423	76416	562	7
3	Verde	V Pacífico Sur	5937	18812	342	6
4	Ornetepec	V Pacífico Sur	5779	6922	115	4
5	El Fuerte	III Pacífico Norte	5024	33590	540	6
6	Papagayo	V Pacífico Sur	4237	7410	140	6
7	San Pedro	III Pacífico Norte	3417	26480	255	6
8	Yaqui	II Noroeste	3163	72540	410	6
9	Culiacán	III Pacífico Norte	3122	15731	875	5
10	Suchiate ^{a,b}	XI Frontera Sur	2737	203	75	2
11	Ameca	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	2236	12214	205	5
12	Sinaloa	III Pacífico Norte	2100	12260	400	5
13	Armería	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	2015	9795	240	5
14	Coahuayana	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	1867	7114	203	5
15	Colorado ^a	I Península de Baja California	1928	3840	160	6
16	Baluart	III Pacífico Norte	1838	5094	142	5
17	San Lorenzo	III Pacífico Norte	1680	8919	315	5
18	Acaponeta	III Pacífico Norte	1438	5092	233	5
19	Piaxtla	III Pacífico Norte	1415	11473	220	5
20	Presidio	III Pacífico Norte	1250	6479	ND	4
21	Mayo	II Noroeste	1232	15113	386	5
22	Tehuantepec	V Pacífico Sur	950	10090	240	5
23	Coatán ^a	XI Frontera Sur	751	605	75	3
24	Tomatlán	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	668	2118	ND	4
25	Marabasco	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	648	2526	ND	5
26	San Nicolás	VIII Lerna-Santiago-Pacífico	543	2330	ND	5
27	Elota	III Pacífico Norte	506	2324	ND	4
28	Sonora	II Noroeste	408	27740	421	5
29	Concepción	II Noroeste	123	25808	335	2
30	Matape	II Noroeste	90	6606	205	4
31	Tijuana ^a	I Península de Baja California	78	3231	186	4
32	Sonoyta	II Noroeste	16	7653	311	5
			81141	563934		

Tabla A El escurrimiento natural medio superficial de este río incluye importaciones de otros países, excepto en el caso de río Tijuana, cuyo escurrimiento corresponde a la parte mexicana solamente. El área de la cuenca y su longitud se refiere únicamente

Tabla B. a El escurrimiento natural medio superficial de este río incluye importaciones de otros países, excepto en el caso de río Bravo y el Hondo, cuyo escurrimiento corresponde a la parte mexicana solamente. El área de la cuenca y la longitud se refiere únicamente

Ríos principales de la vertiente del Golfo de México y Mar Caribe						
No.	Río	Región hidrológico-administrativa	Escurrecimiento natural medio superficial (millones de m^3 /años)	Área de la cuenca (Km^2)	Longitud del río (Km)	Orden Máximo
33	Grijalva-Usumacinta ^a	XI Frontera Sur	115536	83553	1521	7
34	Papaloapan	X Golfo Centro	42887	46517	354	6
35	Coatzacoalcos	X Golfo Centro	28093	17369	325	5
36	Pánuco	IX Golfo Norte	19673	84956	510	7
37	Tonalá	X Golfo Centro	11389	5679	82	5
38	Tecolutla	X Golfo Centro	6095	7903	375	5
39	Bravo a	VI Río Bravo	5588	225242	ND	7
40	Jamapa	X Golfo Centro	2563	4061	368	4
41	Nautla	X Golfo Centro	2218	2785	124	4
42	La Antigua	X Golfo Centro	2139	2827	139	5
43	Soto La Marina	IX Golfo Norte	2086	21183	416	6
44	Tuxpan	X Golfo Centro	2072	5899	150	4
45	Candelaria ^a	XII Península de Yucatán	1861	13790	150	4
46	Cazones	X Golfo Centro	1712	2688	145	4
47	San fernando	IX Golfo Norte	1545	17744	400	5
48	Hondo ^{a,b}	XII Península de Yucatán	533	7614	115	4

Tabla C. a Este río se considera dentro de la vertiente interior porque desemboca en el Lago Chapala.

Ríos principales de la vertiente interior						
No.	Río	Región hidrológico-administrativa	Escorrentamiento natural medio superficial (millones de m^3 /años)	Área de la cuenca (Km^2)	Longitud del río (Km)	Orden Máximo
49	Lerma ^a	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	4742	47116	708	6
50	Nazas-Aguanaval	VII Cuencas Centrales del Norte	1912	89239	1081	7
		2	6654	136355		

Tablas tomadas de: (CONAGUA, 2011) Nota: ⁱ, ⁱⁱ, ⁱⁱⁱ, ^{iv}

ⁱ Los Datos del escurrimiento natural medio superficial representan el valor medio anual de su registro histórico e incluyen los escurrimientos de cuencas transfronterizas.

ⁱⁱ $1hm^3 = 1$ millón de metros cubicos

ⁱⁱⁱ ND= No disponible

^{iv} Orden máximo determinado al método Strahler.