

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEDIO SALINO OPERANDO CON ALTA CARGA ORGÁNICA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. Marchena Q., Aurimar D.
Godoy R., Jonathan A.
para optar al título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEDIO SALINO OPERANDO CON ALTA CARGA ORGÁNICA

Tutor: Prof. María Rincones

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. Marchena Q., Aurimar D.
Godoy R., Jonathan A.
para optar al título de
Ingeniero Químico

Caracas, 2009

Caracas, Noviembre de 2009

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Aurimar D. Marchena Q. y Jonathan A. Godoy R., titulado:

“Evaluación de un sistema de reactor biológico secuencial a escala piloto para tratamiento de aguas residuales en medio salino operando con alta carga orgánica”

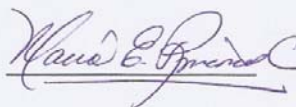
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.



Prof. Andrés Rosales
Jurado



Prof. Armando Vizcaya
Jurado



Prof. María Rincones
Tutor Académico

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Caracas, 06 de Noviembre de 2009

ACTA

MENCIÓN HONORÍFICA

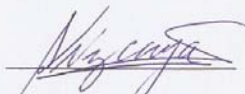
Los miembros del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniería Química presentado por los bachilleres **Aurimar D. Marchena Q.** y **Jonathan A. Godoy R.** que se titula **"Evaluación de un sistema de reactor biológico secuencial a escala piloto para tratamiento de aguas residuales en medio salino operando con alta carga orgánica"** consideramos que merece ser reconocido con una **Mención Honorífica**.

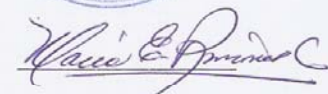
Luego de finalizada la defensa pública y considerando que el Trabajo Especial de Grado es un aporte significativo, desde el punto de vista técnico y de desarrollo, en el área de tratamientos de agua domésticas residuales propias de islas o islotes, mediante reactores secuenciales por cargas. Además de haber realizado su presentación de forma excelsa y responder las preguntas que tuvieron a bien realizar el jurado mostrando un amplio dominio del trabajo que se realizó.

Acordado y firmado a los seis días del mes de Noviembre de dos mil nueve.


Prof. Andrés Rosales
Jurado




Prof. Armando Vizcaya
Jurado


Prof. María Rincones
Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

En primer queremos agradecer a la Ilustre Universidad Central de Venezuela, la que nos forjó con sabiduría y vivencias que marcaron nuestra vida, es un orgullo para nosotros ser un universitario ucevista y eso perdurará por siempre.

Aurimar D. Marchena Q.

A mis padres, Aura y Elio, quienes han sido mi ejemplo a seguir, mi inspiración y mi apoyo, de ellos he aprendido gran parte de mis principios, me han enseñado a perseverar por lo que quiero, a no tener límites en la vida y a aspirar hasta lo imposible porque confían en que puedo alcanzarlo. Gracias por creer en mí a ustedes dedico mis logros. A ti mami, que con tu rectitud en la vida me has enseñado a ser intachable, honesta y colaboradora. Admiro tu don de dar sin recibir nada a cambio. A ti papi, por consentirme tanto, por todos tus consejos que siempre han sido oportunos y por tu apoyo en todo. A ustedes gracias por darme todo en la vida y por luchar tanto para que nada me faltara. A mi hermano Elio por protegerme y por haber estado siempre disponible para ayudarme, porque eres un ser muy cariñoso y por aconsejarme. Ustedes son mis tesoros valiosos. Los amo.

A mi familia, en especial a mis tíos Gerardo y Pina, siempre han estado en mi vida, formaron parte de mi crianza, por lo cual mis logros se que los enorgullecen, gracias por su amor de padres. A mi primo Tom, quien es como mi hermano menor, gracias por estar siempre presente. Estoy orgullosa de tí.

A Andrés Benítez, quien me ha acompañado a lo largo de mi carrera, ha sido un amigo muy especial, un compañero de estudios y de vida. Gracias por ser incondicional, por darme tu ayuda constante, por comprenderme siempre, por todo el amor que me has dado y por ser como eres, sincero, fiel y detallista. Colmaste mis años de estudio con alegrías y diversión y estuviste presente en buenos y malos momentos. Te mereces todo el amor que te tengo.

Quiero agradecer a mis amigos del colegio que han sido mis amigos de toda una vida: Nahyr, Mariangela, Josmary, Frank, Goya y Victor. Ustedes son como mi familia, hemos vivido tantos momentos juntos, hemos crecido compartiendo

experiencias y viendo como logramos nuestras metas, a todos los adoro y quiero tenerlos presentes en mi vida por siempre.

Mis amigos de la universidad, debo comenzar por Mary quién abrió las puertas de su casa brindandome un ambiente familiar cuando llegué a Caracas, creo que aún no sabes cuan especial eres para mí. A Jessica, que sabe como colmarme de alegría y hacerme reir tanto, quiero que sepas que eres importante en mi vida. A Fela, Rubén y Anita les agradezco por la bella etapa que vivimos juntas en nuestros inicios en la universidad. A los amigos del introductorio que continuan siendo especiales a pesar de que tomamos rumbos distintos: Carla, Santiago, Elimar y Damastes.

Quiero agradecerles de forma especial a mis amigos que conocí en la escuela. A Sorely por ser además de una compañera de estudios una buena amiga. A Andrea, por compartir conmigo tu buen humor, tu cariño y tu amistad incondicional y desinteresada. A Yozika, por ser una amiga especial, formas parte del bello recuerdo de esta etapa de mi vida. A Oscar, Joan y Julia, por transmitir sus conocimientos conmigo, por ayudarme sin esperar a cambio durante la carrera y por su amistad que hoy en día es muy valiosa. A Ramón, quién junto a Andrea fueron una compañía en la diversión y el entretenimiento. A Xuxa, que en tan poco tiempo me abrió su corazón y las puertas de su casa, permitiéndome conocer y contar con la amistad de sus hermanas Milka, Jos y Dasha. A Nela, que conocí por casualidad y resultó ser una amiga incondicional, a ella le agradezco su ayuda en éste Trabajo Especial de Grado. A Ari, que llenó mi vida con muchisima alegría y se convirtió rápidamente en una amiga de verdad. A Daye, que con sus locuras y sinceridad nos hace reir a todos. A José G. por ser tan servicial. A Angela, Gaby y Pepi por unirme al grupo a pesar de que no estudiamos juntas. Todos tienen un espacio en mi corazón.

Finalmente y no menos importante agradezco a la profesora María Rincones, por sus conocimientos para llevar a cabo éste Trabajo Especial de Grado y en especial por brindarme su confianza, por conversar conmigo y por los consejitos que pudo darme en el poco tiempo que llevamos conociéndonos. Gracias a Reina, Alejandro y Jacson por su colaboración en la planta, por ser tan simpáticos y por su contribución en el desarrollo de esta investigación.

A mis profesores de la carrera Alí Lara, Humberto Kum y Viscaya por su ayuda en todo momento, todos sin esperar nada a cambio, hicieron un excelente trabajo como profesores y consejeros.

Jonathan A. Godoy R.

Quiero en primer lugar agradecer a esa energía infinita que se encuentra en todos y cada uno de los seres y es capaz de todo, por proveerme de las ganas de seguir adelante y ayudarme a llegar a lugares más allá de lo imaginado, por darme el siguiente aliento para no desfallecer y permitirme una nueva oportunidad todos los días de aprender y disfrutar miles de cosas nuevas, por incluir en mi camino a muchos, únicos y especiales todos, y a cada uno de mis seres queridos los cuales quiero desde lo más profundo de mi corazón.

En segundo lugar, doy gracias a mi abuela Josefa, ya que con su carácter forjó los mejores cimientos para mi crecimiento y el completar este trabajo de grado, por ser el norte en la tiniebla, por tener esa palabra alentadora y por nunca perder la esperanza en todos los seres, a ti abuela, mil gracias por llevarme de la mano y protegerme en mi niñez, por nunca esperar nada a cambio y darme todo y más, gracias por apoyarme y creer en mí en cada uno de tus alientos y proveerme del consejo oportuno, a ti abuela te dedico mucho de mí y siempre te tengo presente y gracias por estar a mi lado viejita, te quiero.

Quiero más que dar las gracias en tercer lugar, dar el más grande de los reconocimientos a ti mamá, tú que con tu carácter y conducta intachable me has dado desde pequeño la semilla de un mejor hombre día a día, tú que con tu personalidad perseverante y con todos y cada uno de tus logros sabes lo duro de la tarea, te dedico todo, y este es uno de tantos triunfos por venir que poco a poco recogeremos y disfrutaremos juntos, a ti Mirta Riera que con profunda admiración veo tu caminar en esta vida, me llena de orgullo el decirte lo feliz que me haces y que te quiero con toda mi fuerza y eres la mejor mamá del mundo y nada ni nadie puede cambiar eso.

A ti papá que con tus cuidados y humildes enseñanzas has hecho toda la mella en mi personalidad y me has llevado a ser un hombre de bien, capaz de seguir sus convicciones y creencias y a aceptar que un ser humano es mucho más que la suma de sus logros, sino la suma de toda la ayuda capaz de dar y hacer feliz a la gente incondicionalmente y es por esto que todos creen en ti y pueden darte todo para seguirte y apoyarte, a ti papá que con tus historias en nuestros viajes siempre me alegras el recuerdo y ahora son sonrisas en tu cara, a ti papá que no tengo como dar infinitas gracias al universo por darme lo mejor de sí en una persona, te doy mil gracias por todo.

A mi hermanito Nabor, que me guio en mis primeros pasos y estuvo siempre de manera sincera feliz de mi existencia y nunca tuvo remilgos para demostrarlo al mundo entero, te dedico estas líneas con toda la sinceridad del mundo, eres un ser maravilloso lleno de una imaginación voraz que no dudo por un segundo serán llevadas a cabo, te tengo en lo más alto y te deseo hoy y siempre todo el éxito del mundo, nunca olvides que eres grande y si he recorrido grandes distancias hasta ahora es porque siempre me has ayudado. A ti hermano siempre tendré un abrazo fuerte y lleno de alegría para darte y siempre te tengo presente.

Gracias a ti Yozika Samar Glavan Moreno por llenarme de alegrías y los más bellos momentos que nunca imagine, quiero que sepas y que nunca olvides que te quiero con todo lo que soy capaz de dar, que eres la fuerza que me levanta todas mis mañanas y me inspira a seguir adelante, que eres mi próximo aliento para completar la tarea y que no me permite desfallecer, que gracias a ti veo el mañana con una nueva claridad llena de alegría y que tus experiencias me han enseñado una nueva óptica para observar la vida, gracias por tus palabras y por ser como eres, dulce, tierna y cariñosa, de ti he aprendido mucho y no dudo que seguirá así, doy gracias por tenerte a mi lado y por ser mi apoyo cuando lo he necesitado, eres el ser que me llena y hace que mucho tenga sentido, gracias por ser siempre sincera y quiero que tengas claro que te tengo una profunda admiración. Hoy y siempre que Dios te bendiga y te llenes de todo lo maravilloso que el mundo tiene para darte.

Agradezco a mi hermano en la vida Lenny que siempre me ha apoyado y me ha cuidado y tiene la palabra justa, eres una persona con cualidades inigualables y que siempre tiene un chiste para compartir, siempre me has ayudado a alcanzar mis metas y quiero que sepas que éste es un logro tuyo también, estoy muy feliz de ser tu amigo y conocerte, quiero que sepas que eres una persona exitosa de por sí porque te mantienes leal a ti mismo, eso mi amigo es sinceridad, nunca olvides que cuentas conmigo para lo que sea y siempre tendrás una mano tendida para alcanzar tus sueños, se te aprecia un mundo.

A mi hermano de la universidad de la vida Taslim, ya son muchos años conociéndote y vendrán muchos más, gracias por ser una persona digna y justa, a ti hermano, te dedico todo lo que me queda para apoyarte en la vida y quiero que sepas que estoy muy orgulloso de ti, siempre hemos soñado este momento, te agradezco por estar conmigo para compartir estos triunfos y sé que he de dar gracias por tu existencia, pero me quedo corto, tienes un gran porvenir y no dudes ni por un segundo que gracias a ti alcanzo esta meta, todo el triunfo lo tienes asegurado, te pertenece.

Gracias a toda mi familia de verdad no hay ninguna mejor, a mis tías Magdalena, Mireya y Minerva, que han seguido mi trayectoria y me aconsejan para seguir adelante, a ustedes las quiero con todo. A mis primos y mis primas que vivimos los mejores momentos de chicos y ahora de adolescentes, en especial a mi primo Manuel Guevara, mi hermanito menor, siempre te he deseado lo mejor del mundo y sé que vas a lograr todos tus sueños. A toda mi familia se le quiere.

A todos mis amigos, Patricia Peñaloza, Héctor Visconti, Antonio Cestari, Rafael, Pocho, Andrezzino, Joan, Oscar, Kevin, Luis, Aurimar y Mariana he aprendido a conocerlos y a disfrutar sus diferencias, son seres llenos de vida y esperanzas, que les puedo decir, son lo mejor que el mundo pudo darme, gracias a todos por estar a mi lado, a todos mis amigos les deseo el mejor de los éxitos en sus planes y que nunca olviden de donde vienen y a donde van, tienen el éxito asegurado. A ustedes, si he caminado grandes distancias es porque estoy parado en el hombro de gigantes...

Agradezco a los profesores Samir Marzuca, Anubis Pérez y al Profesor Martin Belmonte, por ser personas de conducta intachable y de amplio conocimiento y trayectoria, gracias por enseñarme la ingeniería química de la mejor manera, sinceramente les tengo un profundo respeto y admiración.

A todos las personas que me apoyaron y estuvieron a mi lado... Gracias.

**Marchena Q., Aurimar D.
Godoy R., Jonathan A.**

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL A ESCALA
PILOTO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MEDIO SALINO
OPERANDO CON ALTA CARGA ORGÁNICA**

Tutores Académicos: Profa. María Rincones.

**Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Escuela
de Ingeniería Química. Año 2009, 111 p.**

Palabras Claves. Reactor Secuencial por Carga, simulación de aguas residuales, aclimatación.

Resumen. Los reactores secuenciales por cargas (SBR) surgen como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas de comunidades ubicadas en islas e islotes, a pesar de que las sales que contienen dichas aguas causan efectos adversos sobre los microorganismos encargados de la remoción de materia orgánica biodegradable en este sistema de tratamiento. El siguiente Trabajo Especial de Grado plantea la evaluación de un SBR a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales con contenido salino operando con alta carga orgánica, haciendo una simulación de dichas aguas mezclando a diferentes proporciones, agua residual procedente del Colector Marginal Izquierdo del Río Valle con agua de mar. Los sistemas SBR son efectivos al operar con aguas residuales domésticas e industriales, sin embargo los microorganismos involucrados en estos sistemas son susceptibles a las sales, que al no tolerarlas, mueren por fenómenos como la plasmólisis. En tal sentido, se plantea la posibilidad de adaptación, introduciendo al sistema los contenidos salinos de forma gradual en busca de una aclimatación de la biomasa. Para estudiar el comportamiento del sistema ante la presencia de sales disueltas en el tiempo de experimentación, se realizó la caracterización y comparación de afluentes y efluentes mediante pruebas de $\text{DBO}_{5,20}$, DQO, sólidos en todas su formas, pH y conductividad. Luego del análisis se concluye que una adaptación adecuada de los lodos, hace posible el tratamiento de agua residual salina; el efecto de inhibición de la sal puede ser reducido significativamente después de un apropiado proceso de aclimatación de la biomasa y que los SBR pueden tratar efectivamente las aguas residuales con contenido salino, consiguiendo valores de remoción de $\text{DBO}_{5,20}$ mayores a 90%, siempre que la carga orgánica en el afluente tenga una $\text{DBO}_{5,20}$ superior a los 70 mg/l, además se optimizó el sistema para procesar eficazmente cuatro (4) cargas diarias de tratamiento de aguas residuales salinas.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
CAPÍTULO I	1
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II	6
MARCO REFERENCIAL	6
REACTOR SECUENCIAL POR CARGAS (SBR)	6
Descripción de una planta de tratamiento que utiliza reactores SBR	7
Criterios de diseño, construcción y operación de un SBR	9
Aplicaciones y usos.....	15

Ventajas y desventajas de los sistemas SBR	16
Etapas del proceso de un Reactor Secuencial por Cargas (SBR)	18
EFFECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS SBR Y EFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE SU RENDIMIENTO	20
CAPÍTULO III	26
MARCO METODOLÓGICO	26
METODOLOGÍA	26
Revisión bibliográfica	26
Evaluación del sistema SBR	27
Adaptación del sistema	27
Caracterización de las cargas	29
Optimización de los tiempos de operación y del rango adecuado de DBO 30	
CAPÍTULO IV	32
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	32
Generación de biomasa y adaptación del sistema	32
Caracterización de las aguas residuales con contenido salino y evaluación del sistema	42

Simulación de las aguas residuales con contenido salino	42
Caracterización de las cargas	46
Optimización de las condiciones de operación del SBR.....	67
Efectividad del sistema de tratamiento SBR para aguas residuales con contenido salino.....	74
CAPÍTULO V	81
CONCLUSIONES	81
CAPÍTULO VI	83
RECOMENDACIONES	83
CAPÍTULO VII	84
BIBLIOGRAFÍA	84
APÉNDICES	88
APÉNDICE A: Estructura del sistema SBR	88
APÉNDICE B: Cálculos tipo	91
Parámetros físico-químicos	91
Eficiencia del Proceso	93
Índice Volumétrico de Lodos.....	95

APÉNDICE C: Etapa de generación de biomasa y estabilización del sistema.	97
APÉNDICE D: Etapa de aclimatación del sistema al medio salino	99
APÉNDICE E: Etapa de optimización del sistema	107
APÉNDICE F: Normas estandarizadas.....	109
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁG
Figura 1. Etapas de un SBR.	6
Figura 2. Diagrama de una planta típica de tratamiento de aguas residuales, empleando sistema SBR.	8
Figura 3. Etapas del proceso de un SBR típico.....	18
Figura 4. Fenómeno plasmólisis.	22
Figura 5. Generación de biomasa en el reactor secuencial por cargas.	28
Figura 6. Pruebas de laboratorio para la caracterización de las cargas.	29
Figura 7. Representación del crecimiento de la biomasa en la etapa de adaptación.....	33
Figura 8. DBO diaria de una mezcla de agua residual con melaza.	34
Figura 9. Sólidos Sedimentables en el período de generación de biomasa.	35
Figura 10. Índice Volumetrico de Lodos en el período de generación de biomasa.....	36
Figura 11. Valores de DBO en los afluentes y efluentes en el período de generación de biomasa.	37

Figura 12. Porcentaje de remoción en términos de DBO para el período final de generación de biomasa.	38
Figura 13. Porcentajes de remoción en términos de DQO para el período final de generación de biomasa.	39
Figura 14. Variación de los Sólidos Suspendidos en el afluente, efluente y en el licor mezclado para el período final de generación de biomasa.	40
Figura 15. Salinidad del agua residual para los diferentes porcentajes de contenido salino.	43
Figura 16. Conductividad del agua residual con diferentes porcentajes de contenido salino.	44
Figura 17. Presencia de Cloruros en el agua residual para los diferentes porcentajes de contenido salino.	45
Figura 18. Valores de pH del agua residual para los diferentes porcentajes de contenido salino.	46
Figura 19. Sólidos Sedimentables en el licor mezclado para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.	47
Figura 20. Porcentaje de remoción en términos de DBO para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.	48
Figura 21. Porcentajes de remoción en términos de DQO para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.	49

Figura 22. Variación de los sólidos suspendidos en la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.	50
Figura 23. Variación del Índice Volumétrico de Lodos para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.	51
Figura 24. Valores de las $DBO_{5,20}$ en los afluentes y efluentes para el 21% y el 35% de contenido salino.	53
Figura 25. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para el 21% y el 35% de contenido salino.	54
Figura 26. Variación de los Sólidos Sedimentables para el 21% y el 35% de contenido salino.	55
Figura 27. Sólidos suspendidos en los afluentes, efluentes y licores de mezcla para el 21% y 35% de contenido salino.	56
Figura 28. Variación del Índice Volumétrico de Lodos para el 21% y 35% de contenido salino.	57
Figura 29. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para el 45% y el 55% de contenido salino.	58
Figura 30. Variación de los Sólidos Sedimentables para el 45 % y el 55% de contenido salino.	59
Figura 31. Variación del Índice Volumétrico de Lodos para el 45% y el 55% de contenido salino.	60

Figura 32. Valores de las $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes para la etapa final de aclimatación con contenido salino.	62
Figura 33. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ en la etapa final de aclimatación con contenido salino.	63
Figura 34. Variación de los Sólidos Sedimentables en la etapa final de aclimatación con contenido salino.	64
Figura 35. Variación del Índice Volumétrico de Lodos en la etapa final de aclimatación con contenido salino.	65
Figura 36. Variación de los Sólidos Suspendidos en la etapa final de aclimatación con contenido salino.	66
Figura 37. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para la optimización del tiempo de reacción.	68
Figura 38. Valores de la $DBO_{5,20}$ para la optimización del tiempo de reacción.	69
Figura 39. Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para la optimización del tiempo de reacción.	70
Figura 40. Variación del Índice Volumétrico de Lodos en la optimización del tiempo de reacción.	71
Figura 41. Valores de la $DBO_{5,20}$ para el afluente y efluente en la optimización de la carga orgánica.	72

Figura 42. Variación del porcentaje de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para la optimización de la carga orgánica.....	73
Figura 43. Valores de la $DBO_{5,20}$ en función al tiempo total de operación del sistema.....	75
Figura 44. Porcentaje de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ en el tiempo total de operación del sistema.	76
Figura 45. Variación de los sólidos sedimentables en el tiempo total de operación del sistema.....	77
Figura 46. Variación de los Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor de mezcla para el tiempo total de operación del sistema.	78
Figura 47. Variación del índice volumétrico de lodos para el tiempo total de operación del sistema.	79

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁG
Tabla 1. Parámetros base de diseño para cargas convencionales.....	10
Tabla 2. Análisis para comprobar la estabilidad del sistema en la etapa intermedia de generación de biomasa.	97
Tabla 3. Análisis para evaluar el sistema en la etapa intermedia de generación de biomasa.....	97
Tabla 4. Análisis para comprobar la estabilidad del sistema en la etapa final de generación de biomasa.	98
Tabla 5. Análisis para evaluar el sistema en la etapa final de generación de biomasa.....	98
Tabla 6. Análisis para evaluar el sistema para el 1,4% de contenido salino.	99
Tabla 7. Análisis para evaluar el sistema para el 7% de contenido salino.	100
Tabla 8. Análisis para evaluar el sistema para el 21% de contenido salino.	101
Tabla 9. Análisis para evaluar el sistema para el 35% de contenido salino.	102
Tabla 10. Análisis para evaluar el sistema para el 45% de contenido salino.....	103

Tabla 11.	Análisis para evaluar el sistema para el 55% de contenido salino.....	104
Tabla 12.	Análisis para evaluar el sistema para el 65% de contenido salino.....	105
Tabla 13.	Análisis para evaluar el sistema para el 75% de contenido salino.....	106
Tabla 14.	Análisis para la optimización del tiempo de reacción.....	107
Tabla 15.	Análisis para la optimización de la carga orgánica.	108
Tabla 16.	Códigos de las normas estandarizadas empleadas para la realización de análisis del “ <i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i> ” ..	109

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

INTRODUCCIÓN

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos por uso doméstico e industrial, la parte líquida de los mismos conocida como agua residual es esencialmente el agua de la que se desprende la comunidad luego de haber sido empleada en sus diferentes usos. De forma más detallada el agua residual es una combinación de los residuos líquidos provenientes de residencias, instituciones públicas y de establecimientos industriales y comerciales, donde en algunos casos, pueden incorporarse aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Si se permite la acumulación y estancamiento de las aguas residuales, la descomposición de la materia orgánica que contiene provoca el consumo del oxígeno presente en los cuerpos de agua, ocasionando gradualmente la eutrofización de los mismos, que consiste en la presencia excesiva de materia orgánica en el agua, lo cual provoca un crecimiento rápido de algas (fitoplacton) que recubren la superficie e impiden el paso de luz solar a las capas inferiores, como consecuencia en el fondo se hace imposible la fotosíntesis, productora de oxígeno libre y a la vez que aumenta la actividad metabólica consumidora de oxígeno de los descomponedores. De esta manera el ambiente se vuelve pronto anóxico y la radical alteración del ambiente que suponen estos cambios, hace inviable la existencia de la mayoría de las especies que previamente formaban el ecosistema. En vista de la

necesidad de disminuir la carga orgánica presentes en las aguas residuales, se emplean métodos de tratamiento diversos entre los cuales están los tratamientos biológicos, los cuales involucran la presencia de microorganismos.

Dentro de los tratamientos biológicos, se encuentra el uso de reactores secuenciales por carga (SBR siglas correspondientes a Sequential Batch Reactor), cuyos fundamentos y su tecnología son cada vez más empleados debido a la eficiencia que proporciona el proceso, los bajos costos de instalación y operación en comparación con otros sistemas de tratamiento. El reactor secuencial por cargas ha sido exitosamente aplicado en el tratamiento de aguas residuales de diferentes procedencias, tanto industriales como domésticas, obteniéndose una alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos, sin embargo no se ha comprobado el éxito cuando se trata de aguas residuales con contenido salino, como las que resultan de comunidades ubicadas en islas o islotes. Por ello en el presente trabajo de grado se plantea la evaluación de un sistema SBR para tratamiento de aguas residuales con contenido salino, utilizando para tal estudio un reactor secuencial por cargas a escala piloto ubicado en la Planta Experimental de Tratamientos de Agua (PETA) de la Universidad Central de Venezuela.

Durante la investigación se quiere evaluar la adaptación de la biomasa ante la presencia de sales, lograda la misma se procederá a precisar los niveles de sal que puede aceptar el sistema manteniendo su eficiencia, de la misma manera se pretende establecer las condiciones óptimas a las cuales debe operar el sistema para alcanzar sus objetivos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los reactores secuenciales por cargas (SBR) son reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado. El proceso combina en un mismo tanque la reacción, la aireación y la sedimentación, a través de las cuales se logra una remoción de la materia orgánica biodegradable presente en el afluente. Estos sistemas de tratamiento tienen ventajas como la facilidad para el control de la operación y la alta eficiencia de operación en tratamientos de aguas residuales domésticas e industriales, sin embargo no se ha evaluado la efectividad del tratamiento para aguas residuales con contenido salino, producto de actividades domésticas de comunidades establecidas en islas.

En el Trabajo Especial de Grado de Azuaje y Muñoz, en el año 2006, se realizó el diseño, construcción y operación de un reactor secuencial por cargas a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales, además evaluaron de forma preliminar el sistema operando el mismo con agua residual procedente del Colector Marginal Izquierdo del Río Valle, el cual se encuentra ubicado en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas de la Universidad Central de Venezuela, obteniendo un tiempo óptimo de reacción de 4 horas y 6 horas de ciclo para una remoción superior al 90% en materia orgánica biodegradable expresada como demanda bioquímica de oxígeno ($\text{DBO}_{5,20}$).

Posteriormente Lorenzo y Lippo, en el 2008, evaluaron el reactor secuencial por cargas (SBR) diseñado y construido por Azuaje y Muñoz, operando con un afluente de agua residual combinada con agua salada, simulando así las condiciones del agua

residual de islas e islotes, donde concluyeron entre otras cosas, que si se puede lograr la aclimatación de la flora microbiana y alcanzar una remoción de nutrientes de hasta el 95 %, sin embargo debido al efecto combinado de las lluvias en el agua residual y la dilución con agua de mar, no lograron la evaluación del sistema para valores de salinidad mayores del 25% en volumen del agua de tratamiento, puesto que la carga orgánica del afluente al sistema tenía una demanda bioquímica de oxígeno menor a 30 mg/L, que no permitía evaluar la influencia del contenido salino en el tratamiento.

Se ha evidenciado que en comunidades pertenecientes a islas se emplean aguas para uso doméstico con mayores porcentajes en volumen de salinidad, superiores al 50% en volumen, las cuales deben ser llevadas a tratamiento, por tal motivo surge la necesidad de evaluar dicho sistema para mayores proporciones de salinidad en el agua residual que las alcanzadas en el Trabajo Especial de Grado de Lorenzo y Lippo, contribuyendo así con un estudio más completo dirigido a la optimización de los sistemas SBR como tratamiento para aguas residuales con contenido salino aplicable en zonas como Islas Tortugas, los Monjes, Isla de Coche y los Roques, lugares de especial interés, beneficiando así la calidad de vida de dichas comunidades y de estos frágiles ecosistemas.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Evaluar un sistema de reactor biológico secuencial (SBR) a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales producto de actividades domésticas con contenido salino, operando el sistema con alta carga orgánica.

Objetivos Específicos

- Generar alta carga orgánica en el efluente de agua residual que se alimenta al sistema de reactor biológico secuencial (SBR).
- Simular las aguas residuales propias de actividades domésticas provenientes de islas e islotes, caracterizadas por contener sales, que serán empleadas en la operación del SBR.
- Aclimatar la biomasa a las aguas residuales domésticas con contenido salino, logrando obtener las condiciones de operación del sistema.
- Caracterizar el afluente y efluente del sistema SBR, simuladas utilizando agua residual doméstica con proporciones de agua de mar a medida que se cambian las condiciones de operación en cuanto al contenido de sales.
- Evaluar el comportamiento del sistema de reactor biológico secuencial a diferentes condiciones de salinidad, superiores inclusive al 50% en volumen de agua salada - agua residual.
- Optimizar el proceso del sistema del reactor secuencial por cargas (SBR).
- Estudiar la efectividad del sistema de tratamiento de aguas basado en un reactor secuencial por cargas (SBR) bajo condiciones de salinidad.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

REACTOR SECUENCIAL POR CARGAS (SBR)

Según Bretti (2002), un reactor secuencial discontinuo o SBR es un sistema de tratamiento de lodos activados cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de ciclos de llenado y vaciado. Los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de lodos activados. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación o clarificación. No obstante, existen notables diferencias, en las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en los SBR los procesos tienen lugar en un mismo tanque o reactor. En la Figura 1 se muestran las etapas que conforman el proceso de un reactor SBR.

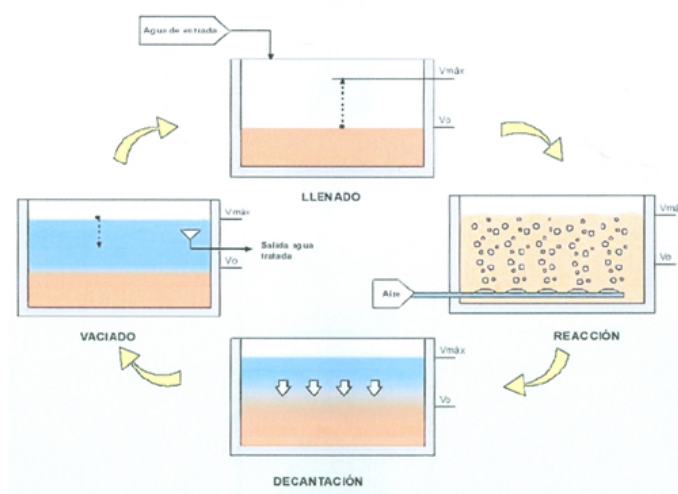


Figura 1. Etapas de un SBR.

Fuente: Biosistemas, tratamiento de aguas residuales S.A.

Dentro de este único reactor o tanque se llevarán a cabo las diferentes etapas del tratamiento. Tal como se opera hoy en día todos los sistemas SBR tienen cinco etapas: Llenado, Aireación – Reacción, Sedimentación, Extracción y Purga – Reposo. En el proceso de un SBR el lodo biológico se desarrolla en el reactor y permanecerá en éste hasta su eliminación en el proceso de purga. El sistema SBR, es un sistema de lodos activados de mezcla completa, sin clarificador o sedimentador secundario adicional, en el cual los flóculos bacterianos generados por él, se separarán por sedimentación en el reactor. Los sistemas SBR se caracterizan por su flexibilidad operativa, poco espacio requerido, ser totalmente automáticos, entre otras cosas. Como en todos los sistemas de lodos activados la etapa de Purga – Reposo es uno de los pasos más importantes del tratamiento, en el funcionamiento y rendimiento. (Bretti, 2002).

Descripción de una planta de tratamiento que utiliza reactores SBR

La Figura 2 muestra un esquema típico de flujo del proceso de una planta municipal de tratamiento de aguas residuales que utiliza reactores SBR, donde se puede observar que el agua residual (afluente) generalmente pasa a través de un proceso de desbaste, que consiste en un dispositivo con aberturas uniformes utilizado para retener generalmente los sólidos de cierto tamaño que arrastran las aguas residuales y posteriormente pasan por un proceso de desarenación, cuya misión es separar las arenas, la grasa, las cenizas y cualquier otro material pesado que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior a la de los sólidos orgánicos del agua residual.

Seguidamente, el agua residual entra a un reactor parcialmente lleno que contiene la biomasa ya aclimatada a los componentes del agua residual durante los ciclos anteriores. Una vez que el reactor se llena, éste opera como un sistema convencional de lodos activados pero sin el flujo continuo de afluente o descarga de efluente. La aireación y la mezcla se detienen después de completarse las reacciones biológicas, se sedimenta la biomasa y se remueve el sobrenadante. El exceso de biomasa se purga en cualquier punto de este ciclo. La purga frecuente hace que de un ciclo al siguiente se mantenga una relación de masas casi constante entre el sustrato afluente y la biomasa.

A continuación del reactor SBR, la tanda de agua residual puede fluir a un tanque de homogenización de caudales en donde el flujo de agua residual a otras unidades de proceso puede ser controlado a una tasa determinada. En algunos casos el agua residual es filtrada para remoción adicional de sólidos y luego desinfectada.

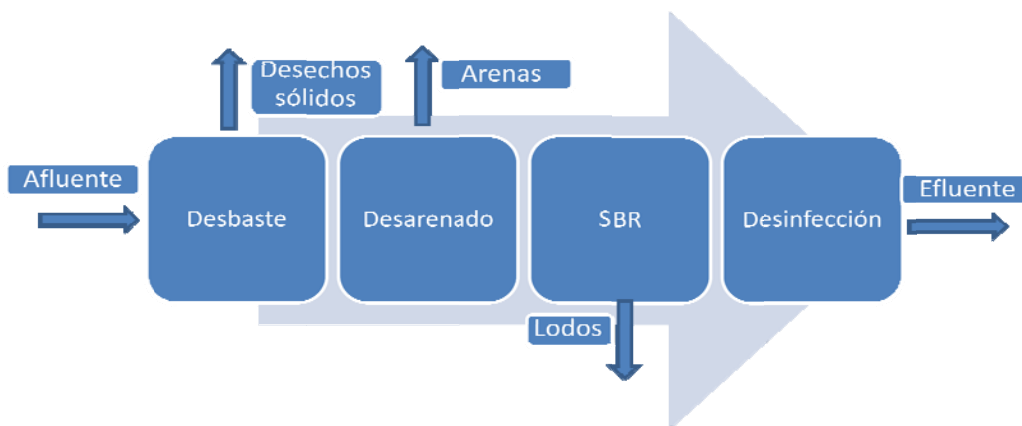


Figura 2. Diagrama de una planta típica de tratamiento de aguas residuales, empleando sistema SBR.

Con el sistema SBR típicamente sólo se maneja un tipo de lodo. La necesidad de uso de espesadores por gravedad antes de la digestión debe determinarse caso por caso dependiendo de las características del lodo. Un reactor SBR sirve como tanque de homogenización durante su llenado con agua residual, lo cual permite que el sistema tolere volúmenes variables y los homogenice dentro del reactor. En muchos sistemas convencionales de lodos activados se requiere que la homogenización se haga en forma separada para proteger al sistema biológico de cargas altas que podrían alterar el sistema de tratamiento.

Se debe enfatizar también que normalmente los sedimentadores primarios no son requeridos con anterioridad al SBR en aplicaciones de aguas residuales municipales. En la mayoría de las plantas de sistemas convencionales de lodos activados se requiere el uso de sedimentadores primarios antes del sistema biológico. Sin embargo, el uso de sedimentadores primarios puede ser recomendado por el fabricante del sistema SBR si los sólidos suspendidos totales (SST) o la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) son mayores a valores entre 400 y 500 mg/L. El historial de datos debe ser evaluado para determinar si es recomendable el uso de sedimentadores primarios o la homogenización para aplicaciones municipales o industriales, Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1999).

Criterios de diseño, construcción y operación de un SBR

Para cualquier diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, Brett (2002) explica que el primer paso es determinar por anticipado las características del

agua a tratar y los requisitos de los efluentes de salida. Estos parámetros del afluente típicamente incluyen: caudal de diseño, temperatura, máxima demanda bioquímica de oxígeno medida a los 5 días ($DBO_{5,20}$), pH, alcalinidad. Una vez que el afluente y las características del efluente del sistema son determinadas, se procede a la construcción del diseño recomendable. Para ello se utilizan los siguientes parámetros de diseño, para cargas convencionales mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros base de diseño para cargas convencionales

Parámetro	Efluente Domiciliario	Efluente Industrial
Relación F/M [d^{-1}]	0,15 – 0,40	0,15 – 0,60
Ciclo completo [hora]	6	4 – 24
Mínimo típico SSLM [mg/l]	2.000 – 2.500	2.000 – 4.000
Tiempo de Retención Hidráulica [hora]	4 – 14	varia

Fuente: Bretti, 2002

Uno de estos parámetros es la concentración de lodos, la cual se manifiesta como una concentración de lodos en suspensión y se denomina “sólidos suspendidos en el licor mezclado” o por sus siglas SSLM, se conoce que en esos sólidos existe material inorgánico puesto que son una suma de sólidos. En la etapa de aireación la concentración de los lodos presente en el sistema es denominado “sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado” o SSVLM y aporta una medición de

concentración de materia orgánica presente, la determinación de SSVLM no aporta una diferencia entre el material inerte existente en los lodos y el material bioquímicamente activo.

La concentración de SSVLM (microorganismos) está íntimamente relacionado a las condiciones a las que opera el reactor, depende del oxígeno disuelto en el licor mezclado, la cantidad de nutrientes contenidos en el afluente alimentado al sistema reactivo, la relación alimento/microorganismo (F/M), entre otros.

La relación F/M o relación Alimento/Microorganismo es una razón entre la cantidad de carga orgánica que se alimenta al sistema y la cantidad total de masa activa y la misma puede fluctuar durante todo el año según los cambios en las condiciones de trabajo, incluidas las características del afluente. Otro parámetro ampliamente utilizado es el que indica el tiempo que pasa el afluente en el reactor, denominado tiempo de retención hidráulico (TRH). Los cambios en el TRH pueden afectar la actividad biológica, por ejemplo, la disminución del TRH afecta negativamente a la nitrificación y también trae como consecuencia una descarga con mayor DBO. Su importancia radica en maximizar la reacción biológica en el reactor, permitiendo obtener valores de remoción de materia orgánica biodegradable, dado por los microorganismos existentes, los cuales cumplen un rol vital ya que son los encargados de degradar la materia orgánica, tomar energía del medio, sintetizar el resto de materia orgánica presente y ser capaces de transformarla en nuevas células, una porción es oxidada a bajos contenidos energéticos como lo son los nitratos (NO_3), sulfatos (SO_4) y dióxido de carbono (CO_2) y el resto es transformado a tejido celular.

Según Bretti (2002) “Gerard Kiely determinó que la duración del ciclo puede variar entre 4 y 48 horas, el tiempo de retención hidráulico (TRH) está entre 15 y 80 día y la relación F/M, para el caso de plantas tipo SBR, puede rondar entre los 0,03 y 0,18 d⁻¹.”

Una vez determinados los parámetros de diseño, el número de ciclos, el número de reactores y el volumen del reactor, se pueden estimar los tiempos de las distintas etapas, en forma teórica.

Los componentes más importantes de la planta SBR son: el sistema de aireación, el cual típicamente consta de difusores, un dispositivo flotante para la extracción, una bomba de succión, peras de nivel y el tablero de mandos y PLC que son usualmente ubicados dentro de un edificio cercano de control.

Los ciclos de tiempos son controlados para un volumen determinado, previsto para maniobrar los caudales de diseño. Si el flujo o caudal entrante es significativamente menor al caudal de diseño, entonces sólo una porción del reactor será utilizada y la aireación para estos casos puede acortarse logrando ahorrar energía. (Bretti, 2002).

Según Bretti (2002) es necesario el control lógico provisto por un PLC. Las plantas pequeñas pueden experimentar una variada cantidad de problemas asociados con la operación, mantenimiento y cargas. Por consiguiente, se utilizan criterios más conservadores de diseño debido a la gran variedad de cargas orgánicas e hidráulicas generadas. Este tipo de diseño utiliza una relación F/M inferior y un tiempo de retención hidráulica mayor (TRH).

La construcción de sistemas SBR normalmente requiere una superficie menor a la de los sistemas convencionales de lodos activados porque con el uso de SBR a menudo se elimina la necesidad de sedimentadores primarios y nunca se requieren los secundarios. El tamaño de los tanques en sí mismos varía para cada sitio específico, pero en general se tiene una ventaja con el uso de sistemas SBR cuando el sitio propuesto tiene limitaciones de terreno.

Para caudales menores a 0,05 MG/d ($190 \text{ m}^3/\text{d}$) se tiene que un solo reactor es suficiente para su tratamiento, claro está, se ha de dividir una parte este para la digestión del barro. Para sistemas pequeños es recomendada la utilización de reactores de acero y no de hormigón, por cuestiones de costo. Para caudales de 0,1 a 1,5 MG/d (380 a $5.680 \text{ m}^3/\text{d}$) se utilizan múltiples reactores de hormigón.

En la operación del sistema se suelen presentar problemas, entre ellos el fenómeno conocido como hinchamiento, en el cual el lodo en el reactor no sedimenta y por otro lado se puede presentar el desarrollo de espuma biológica en la superficie. Cuando se presenta hinchamiento una parte de los sólidos suspendidos del licor mezclado se descargan en el efluente, el hinchamiento puede ser causado por el crecimiento de organismos filamentosos que no sedimentan. Es común también encontrar formación de espuma, la cual es causada en su mayoría por el crecimiento excesivo de organismos *Nocardia*. (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Se puede dar la presencia de bajo oxígeno disuelto en el tanque de aireación, el cual puede estar asociado con varios problemas operativos, entre ellos, con el crecimiento inadecuado de organismos filamentosos, la pérdida de la eficiencia del

tratamiento para la eliminación de DBO y la interrupción de la formación de flóculos. Los valores de oxígeno disuelto responsables de la interrupción de la formación de flóculos y la pérdida de sólidos finos, son los menores a 1 mg/l durante diez o más horas consecutivas.

La baja concentración de oxígeno disuelto en el licor mezclado se puede corregir a través de varias medidas operativas. En primer lugar, la capacidad de aumentar o hacer las reparaciones adecuadas a los equipos de aireación para que haya un mayor suministro de oxígeno. En segundo lugar, el afluente debe ser supervisado y regulado para evitar el ingreso de un exceso de desechos nitrogenados. (Gerardi, 2002).

De acuerdo a lo explicado por Gerardi (2002), en la operación del sistema puede existir un incremento de los sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado. La adsorción física de los aceites y grasas (FOG) por las partículas de los flóculos dan como resultado el aumento del porcentaje de SSVLM. Para prevenir el problema mencionado se debe dotar al sistema con un apropiado separador de grasas o emplear productos al afluente que tengan la capacidad de degradación enzimática de grasas y aceites, especialmente aquellos con enzima lipasa.

La producción y acumulación de espuma en el reactor se debe al menos en el cambio de una de las condiciones de funcionamiento. El crecimiento de la espuma debe ser controlado y las condiciones operativas responsables deben ser identificadas y corregidas. La deficiencia de nutrientes en el proceso por lo general se asocia con la producción de espuma blanca ondulante (lodos jóvenes) o de

espuma gris graso (lodos viejos). Las secreciones de polisacáridos insolubles en el interior de los flóculos cuando hay deficiencia de nutrientes son las responsables de la producción y acumulación de espuma blanca ondulada o espuma gris grasienta. La degradación de polisacáridos almacenados dentro de los flóculos deben ser corregidas añadiendo nutrientes adecuados. (Gerardi, 2002)

Aplicaciones y usos

A comienzo de los años 1970 con el desarrollo de nuevos equipos y nuevas tecnologías, renació el interés por los sistemas de llenado y vaciado. Las mejoras en los dispositivos de aireación y de control han logrado el desarrollo de este tipo de sistemas hasta alcanzar el nivel de eficacia actual, que permite que la tecnología SBR compita con éxito con los sistemas convencionales, o continuos. Los sistemas SBR requieren un área relativamente pequeña, siendo útiles para lugares donde el terreno disponible está limitado. Son apropiados para parques, casas, barrios cerrados, áreas de camping, la construcción, escuelas rurales, hoteles y otras aplicaciones pequeñas. Estos sistemas son también útiles para la industria cervecera farmacéutica, lechera, papelera y química.

Para las industrias con cargas de DBO altas, como plantas de producción alimenticia o química, los SBR son útiles para tratar dichos efluentes. Son también adecuados para sitios con una asistencia mínima del operador, que tienen una gran variedad de efluentes y/o cargas orgánicas.

Los sistemas SBR son aplicables para áreas donde los requisitos de los efluentes pueden cambiar frecuentemente y/o pueden ponerse más estrictos, ya que estos sistemas tienen gran flexibilidad para cambiar las opciones de tratamiento. (Bretti, 2002)

Ventajas y desventajas de los sistemas SBR

Bretti plantea en su publicación del 2002, que el sistema del tipo SBR presenta algunas ventajas comparativas con respecto al proceso de flujo continuo de lodos activados:

- Como el reactor funciona como un tanque de igualación durante la etapa de llenado, puede tolerar picos de caudal, carga orgánica, nutrientes o pH sin pérdida de la calidad del efluente;
- Los sólidos pueden ser mantenidos por largos tiempos en el reactor, evitando problemas de fuga de lodos;
- Condiciones ideales para la sedimentación, lo cual permite la obtención de pequeños flóculos;
- Aumento de la eficiencia de aireación;
- Mejor control y eliminación del crecimiento de organismos filamentosos, que pueden ser controlados variando las estrategias del proceso, como por ejemplo el llenado en ausencia de oxígeno;
- Tiene menores costos constructivos que una planta convencional continua;

- Produce menor cantidad de lodos, un subproducto los sistemas activados continuos. La experiencia a nivel internacional es que la cantidad de lodos producidos es 20 a 30% inferior;
- Capacidad de operar la planta desde un lugar remoto a esta;
- Menor cantidad de potencia instalada que los sistemas convencionales continuos;
- Menor espacio requerido, para igual capacidad de tratamiento;
- Potencial ahorro de costos al no requerir un clarificador o sedimentador secundario;
- Pueden realizar nitrificación así como también desnitrificación y extracción fosfórica;
- Gran flexibilidad operacional;

Desventajas

- Un nivel más alto de sofisticación de instalación es requerido (comparando con los sistemas convencionales), especialmente para los sistemas grandes, de controles y PLC;
- Niveles más sofisticados de mantenimiento (comparado con los sistemas convencionales) asociados a la automatización de interruptores, PLC y válvulas automatizadas;
- Riesgo de obstrucción de los dispositivos de aireación durante los ciclos operativos;
- Los lodos deben ser eliminados frecuentemente (operación de purga);

- Posible necesidad de igualación después del tratamiento SBR, dependiendo del proceso requerido;
- Gran dificultad de ajustar los ciclos o etapas de tratamiento, en plantas pequeñas de tratamiento;
- Potencial riesgo de descargar lodo sedimentado o en suspensión, durante algunas de las fases de descarga o extracción.

Etapas del proceso de un Reactor Secuencial por Cargas (SBR)

La publicación de la EPA (1999) explica detalladamente las etapas del proceso de un reactor secuencial por cargas, las cuales fundamentalmente son: inactividad, llenado, reacción, sedimentación y descarga. En la Figura 3 mostrada a continuación se ilustran las etapas que conforman el proceso típico de los reactores secuenciales por cagas SBR.

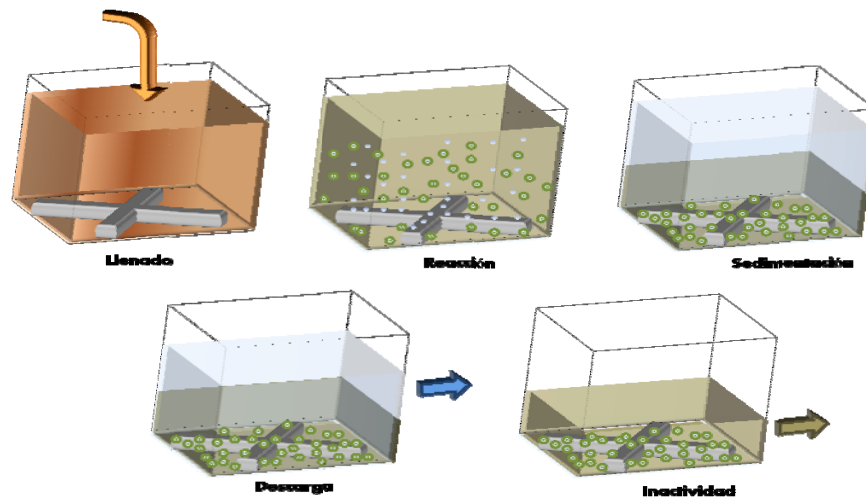


Figura 3. Etapas del proceso de un SBR típico
Fuente: Lippo y Lorenzo, 2008.

El paso de inactividad tiene lugar entre los pasos de descarga y llenado, durante los cuales se hace la remoción del efluente tratado y se adiciona el afluente de agua residual. La duración del paso de inactividad varía dependiendo del caudal del afluente y la estrategia de operación. La homogenización de caudales puede hacerse durante este paso si se utilizan tiempos variables de inactividad. La mezcla para acondicionar la biomasa y la purga del lodo también pueden ser llevados a cabo durante el paso de inactividad dependiendo de la estrategia operacional.

El agua afluente se añade al reactor durante el paso de llenado. Las siguientes modalidades son utilizadas en el paso de llenado y cualquiera de ellas puede ser usada dependiendo de la estrategia operacional: llenado estático, llenado con mezclado y llenado con aireación. En el caso de esta investigación la estrategia operacional que se utiliza, es el llenado con aireación, el cual tiene lugar cuando se suministra aire al contenido del reactor para iniciar reacciones aerobias que se completan en el paso de Reacción. El llenado con aireación reduce el tiempo requerido para el paso de Reacción.

Las reacciones biológicas se completan en el paso de reacción, en el cual se presentan las modalidades de reacción con mezcla y reacción con aireación. Durante las reacciones con aireación, que es la modalidad empleada en éste estudio, se completan las reacciones metabólicas por las cuales la biomasa consume la materia orgánica en presencia de oxígeno.

El paso de sedimentación ocurre normalmente durante condiciones de reposo en el reactor SBR. En algunos casos una agitación moderada durante las fases iniciales de

la sedimentación puede producir un efluente mejor clarificado y lodo sedimentado de mayor concentración. En un reactor SBR no existen corrientes de afluente o efluente que interfieran con el proceso de sedimentación, como sí es el caso de los sistemas convencionales de lodos activados.

El paso de descarga usa un decantador para remover el efluente tratado. Se produce luego de un tiempo suficiente para obtener una buena separación entre el lodo sedimentado y el agua sobrenadante (Bretti, 2002).

Cada etapa de operación de un sistema SBR se realiza en un tiempo determinado. Para el caso del sistema SBR a evaluar en esta investigación se tiene: 15 minutos de llenado, dado que el caudal de entrada es de 2 l/min., 1 hora de sedimentación por las condiciones del lodo y 30 minutos de descarga para no producir agitación que desestabilice el sistema sedimentado. El tiempo de reacción es de 4 horas y 15 minutos, dando como resultado un ciclo de operación de 6 horas (Azuaje y Muñoz, 2006).

EFFECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS SBR Y EFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE SU RENDIMIENTO

Los sistemas SBR han demostrado una eficacia mayor de remoción de $\text{DBO}_{5,20}$ carbonosa que otros sistemas, debido a la optimización de la actividad microbiana, mejor eliminación de nutrientes y la utilización de oxígeno del aire inyectado al sistema. Los rangos típicos de $\text{DBO}_{5,20}$ son de 5 a 15 mg/l y la eficacia de remoción de DBO es generalmente 85 a 95% (Bretti, 2002). Sin embargo, estudios previos han demostrado que el contenido salino en las aguas residuales influye en la eficiencia

de los tratamientos biológicos debido al efecto adverso de la sal en los microorganismos, dando como resultados una disminución en la remoción de la materia orgánica biodegradable.

Uygur en su publicación del 2006 explica que el tratamiento biológico de aguas residuales salinas generalmente resulta en una baja remoción de DBO y DQO, debido a los efectos de la sal sobre la flora microbiana. Varios investigadores han estudiado dichos efectos en la bioactividad de los microorganismos y encontraron que los altos niveles de salinidad provocaban efectos adversos en el tratamiento. (Uygur, 2006). No obstante, el tratamiento de aguas residuales salinas e hipersalinas podría representar hasta un 5% del requisito de tratamiento de aguas residuales en todo el mundo (Lefebvre et al., 2007). Es por ello que se amerita y es relevante la investigación.

La presencia de altas concentraciones de sal en las aguas residuales provoca estrés a las especies microbianas, resultando en la inhibición de las enzimas, disminuye la actividad de las células y, finalmente, conduce a la plasmólisis (Uygur, 2006). Otros efectos son la turgencia e inhibición celular. Dichos efectos son causados principalmente debido a la presencia de cationes, según Lefebvre y demás investigadores, quienes además informaron que una concentración de sodio superior a 10 g/l inhibe fuertemente la producción de metano.

La turgencia determina el grado de rigidez de una célula, en este fenómeno las células intentan absorber agua alcanzando mayores proporciones e incrementando la tensión de la membrana celular por la presencia del contenido salino.

La inhibición celular es la pérdida de la estructura y parte de la desnaturalización de las enzimas, lo cual trae como consecuencia la pérdida de actividad celular.

Además Uygur, en el 2006, expresa en su publicación que Matsuo y Hosobora estudiaron el efecto de la salinidad en la eliminación de fósforo e informó que concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) limitan la absorción de fósforo lo cual trae como resultado altos contenidos del mismo en el efluente. Sin embargo, se determinó que el sistema fue capaz de reanudar su funcionamiento después de una aclimatación adecuada. Uygur en su estudio realizado en el año 2006 menciona que a una “Alta concentración de sal ($> 1\%$ de sal) causa plasmólisis y la pérdida de actividad de las células”. La semipermeabilidad de la membrana citoplasmática y la permeabilidad de la pared celular en los microorganismos originan, entre otros, el fenómeno de plasmólisis, lo cual significa que el agua que hay dentro de la membrana celular sale al medio hipertónico por ósmosis y la célula se deshidrata ya que pierde el agua que la llenaba, como se puede observar en la Figura 4.

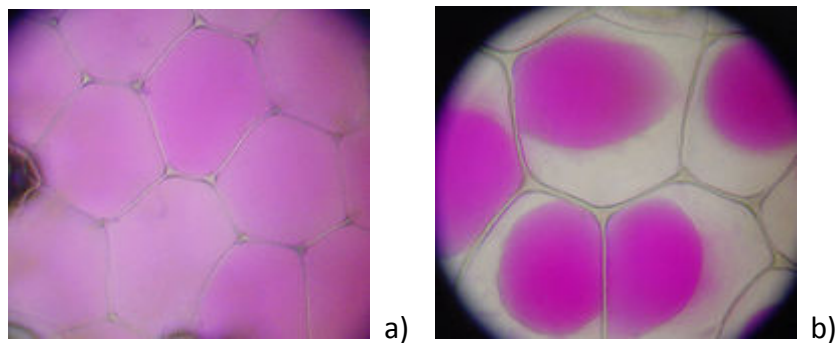


Figura 4. Fenómeno plasmólisis. El antes (a) y después (b) de la plasmólisis celular
Fuente: Bioquímica Médica

Los efectos de la salinidad sobre las características de los flóculos, que influyen en la separación sólido líquido, han sido poco estudiados. Las características de los flóculos, que se ven afectados por los niveles de salinidad, podría ser un punto crítico en el proceso de separación sólidos y líquidos (sedimentación) de los tratamientos biológicos de aguas residuales (Moon, Seo, Lee, Kim y Yoon, 2003).

El flóculo es la unidad ecológica y estructural del lodo activo formada por una agrupación de bacterias y otros microorganismos que permiten la oxidación de la materia orgánica. El estudio del flóculo (estructura, compactación y tonicidad) genera información sobre su desarrollo y sobre la población de bacterias, lo que permite diagnosticar y prever el estado y rendimiento del proceso. (Lippo y Lorenzo, 2008).

La estrecha observación del sistema mostró que el incremento de la concentración de sal en la alimentación al reactor, afecta la eficiencia en remoción de materia orgánica biodegradable expresada como DBO y/o DQO. Este hecho implica que la abrupta elevación de la concentración de la sal en la alimentación afecta primero la actividad de oxidación orgánica de los microorganismos y luego la estructura de los flóculos. Después de un cierto período de recuperación para la actividad de oxidación orgánica, el tamaño y la dimensión del flóculo empieza a incrementarse. Comparado los tiempos totales de recuperación, se tiene que el tiempo total de recuperación para la DQO es menor que el del tamaño y dimensión. La actividad de oxidación orgánica en términos de eficiencia de remoción de DQO es más sensible a las concentraciones de sal, sin embargo se llegó a la conclusión de que se adaptan rápidamente (Lippo y Lorenzo, 2008).

La tasa y el alcance de la remoción de DQO, nitratos ($\text{NH}_4\text{-N}$) y fosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) disminuyen mientras las concentraciones de los nutrientes del efluente y el índice de lodos (IVL) aumentan con el incremento del contenido de sal. La baja concentración de biomasa a altos contenidos de sal causa una baja en el volumen de lodos sedimentados y los altos valores de IVL (Uygur y Kargi, 2004). Este índice da una idea de las características de decantación del lodo.

Se estudio si el porcentaje de la remoción de nutrientes (DQO, Nitratos y Fosfatos) disminuye con el aumento en las concentraciones del contenido salino debido a la plasmólisis y la pérdida de las actividades de los organismos. El efecto de la inhibición de la sal fue más pronunciado para la eliminación de Fosforo en comparación con la DQO y la remoción de nitrógeno. Las características de sedimentación de los lodos también se ven afectadas por los contenidos de sal resultando en altos valores del Índice Volumétrico de Lodos (IVL). El valor de IVL aumentó de 50 ml/g en el 0,5% de sal a cerca de 97 ml/g a 6% de sal. Otros efectos son las bajas concentraciones de biomasa en el licor mezclado. (Uygur y Kargi, 2004).

Los microorganismos luchan en primer lugar para resistir la presión osmótica para lograr la retención de agua en sus células y en segundo lugar para degradar el substrato (Moon et al., 2002). El consumo de oxígeno es utilizado para sobrevivir más que para la degradación y la sal acumulada en las células reduce la eficiencia en la utilización del oxígeno (Panswad y Anan, 1999).

Uygur en la publicación del 2006 agregó que Panswad y Anan observaron una mejora en la eliminación de carbono y de nitrógeno de las aguas residuales con

contenido salino elevado cuando la flora microbiana fue aclimatada a la sal. A su vez Rene, Kim y Park concluyeron de su estudio en el 2007 que la inhibición que produce la sal puede ser reducida significativamente después de la aclimatación de la biomasa.

A pesar de los obstáculos creados por la alta salinidad, un cierto número de procesos se han utilizado con éxito para el tratamiento anaerobio de aguas residuales salinas. Algunos de ellos utilizaron un inoculo de halófilas, mientras que otras requerían la adaptación de un inóculo sin halófilas a las concentraciones de sal. Desde el punto de vista de la ecología microbiana, la adaptación de lodos a una solución de alta salinidad implica la aclimatación de los microorganismos halotolerantes de alto contenido de sal. Algunos estudios sugieren que esta aclimatación es posible, dependiendo de la naturaleza y la de la adaptación progresiva de los lodos a alta salinidad, sin embargo, poco se sabe acerca de la dinámica y la diversidad de un ecosistema microbiano para tratamiento de aguas residuales de elevada salinidad, aunque ya se ha demostrado que los tratamientos industriales de aguas residuales hipersalinas podrían ser similares a los tratamientos de aguas residuales comunes (Lefebvre et al. 2007).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

METODOLOGÍA

En el siguiente capítulo se procede a explicar la estrategia que fue aplicada a fin de obtener tanto el conocimiento necesario como la serie de pasos para lograr todos y cada uno de los objetivos planteados en la realización del trabajo especial de grado:

Revisión bibliográfica

Se realizó un estudio minucioso de la bibliografía lo cual permitió recabar y profundizar en todo lo referente al tratamiento de aguas residuales mediante sistemas SBR. Se llevó a cabo una revisión de la descripción de todo el sistema operativo para un mayor entendimiento del proceso, así como también se estudió la estructura de los equipos, generalidades y principios de lo que sería la operación de un equipo reactor SBR, eficiencia, durabilidad y mantenimiento del mismo.

Se procedió a estudiar todo lo relacionado con el equipo SBR puesto en marcha en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA), ubicada en la Universidad Central de Venezuela, se realizó mantenimiento a las instalaciones de cada uno de los equipos, sistema eléctrico, mantenimiento de bombas, limpieza de tuberías y se tuvo acceso al equipo de laboratorio, bajo una debida inducción dictada por los técnicos de la PETA.

Evaluación del sistema SBR

En la evaluación del sistema están involucradas 3 fases principales, la primera fase es la adaptación del sistema, la segunda es la caracterización de las cargas y por último la optimización de los tiempos de operación. A continuación se explican de forma detallada:

Adaptación del sistema

Se manejó el equipo ya instalado en la Planta Experimental de Tratamiento de Aguas (PETA) y se puso en marcha con la alimentación del efluente que proviene del Colector Marginal Izquierdo del Río Valle, a fin de lograr la presencia de biomasa. El desarrollo de la biomasa, como se observa en la Figura 5, se llevó a cabo dentro del reactor SBR por continua alimentación de agua residual, esto se realizó con ciclos de 12 horas, que involucran el llenado, la reacción, la sedimentación, la descarga y la inactividad. Los ciclos se llevaron a cabo 2 veces al día, mateniéndolo un volumen determinado en el sistema, en el que se evidenció biomasa luego de varias semanas.

Simultáneamente se estudió en el laboratorio, la influencia de la melaza en el crecimiento de los microorganismos, mediante el análisis de la $DBO_{5,20}$ y de la DQO, con la finalidad de conocer su contribución al sistema. Posteriormente se añadió melaza como aporte nutricional para la formación de biomasa en el sistema, la cual fue cuantificada a través del análisis de los sólidos sedimentables. La alimentación de agua residual con melaza tuvo como objetivo mejorar las condiciones de operación del sistema para cualquier caso en el que el proceso se viera

comprometido, como una posible dilución causada por condiciones climáticas (lluvias) que producen la variabilidad del afluente.

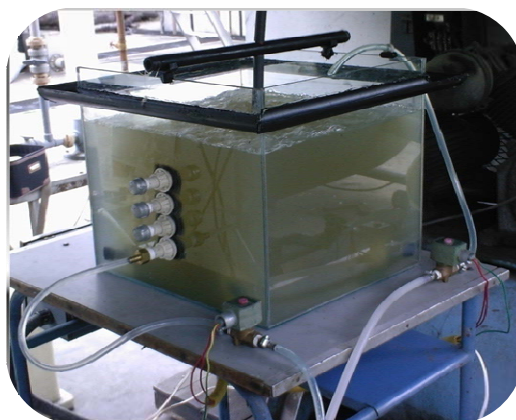


Figura 5. Generación de biomasa en el reactor secuencial por cargas.

Se preparó la mezcla de agua residual con melaza diariamente en el tanque de premezclado, este hecho aseguró una alimentación con una $DBO_{5,20}$ en el orden de 300 mg/l, obteniendo así afluentes similares a aguas residuales de islas e islotes. Finalmente se evaluó la estabilidad del sistema a través de la obtención de un valor constante en la eficiencia de remoción de materia orgánica en términos de la $DBO_{5,20}$, alcanzada la misma se procedió con la siguiente fase.

Cabe destacar que la estabilización del sistema fue necesaria cada vez que se realizó un cambio en el afluente y en alguna condición de operación y en cada caso fue determinada calculando la remoción en función de la $DBO_{5,20}$ hasta obtener un valor constante.

Caracterización de las cargas

Se procedió a la adición gradual de agua de mar a la mezcla afluyente del sistema, simulando de ésta manera las aguas residuales de comunidades pertenecientes a islas, para así evaluar la aclimatación de la biomasa y el efecto de ese porcentaje de salinidad sobre el funcionamiento del proceso, lo cual permitió la obtención de los objetivos planteados.

Para cada valor de concentración de mezcla salina operada con el reactor SBR, se caracterizó el sistema realizando análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos en sus diferentes formas, presencia de Cloruros, Conductividad y Oxígeno Disuelto, según las normas estandarizadas, que se detallan en el Apéndice E. En la Figura 6 se observan algunas de las pruebas realizadas.

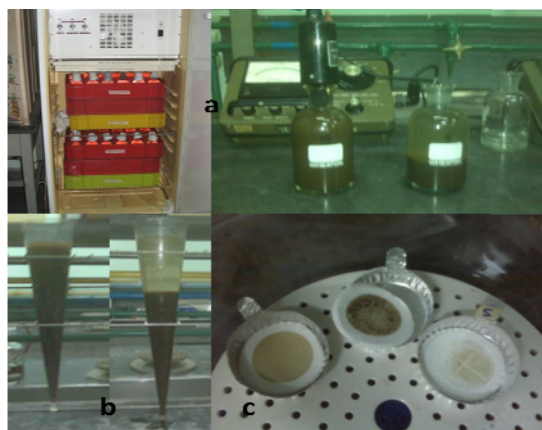


Figura 6. Pruebas de laboratorio para la caracterización de las cargas.
a) DBO_{5,20} b) Sólidos Sedimentables c) Sólidos suspendidos (afluyente, licor de mezcla y efluente).

Se variaron las concentraciones de contenido salino en el afluente de manera sistemática desde 1,4% aumentándola hasta un 75%. La mezcla afluente se preparó en el tanque de mezcla previo al reactor, controlando el contenido salino mediante la conductividad específica. De igual manera para cada cambio de salinidad en la entrada del sistema, se determinó la estabilidad del mismo y seguidamente se procedió a caracterizar o analizar en laboratorio la carga específica.

Finalmente gracias a los resultados obtenidos del proceso y el posterior análisis de los mismos, se logró evaluar el efecto de la salinidad respecto a la tasa de rendimiento del sistema.

Lo vital a lo largo del proceso de adaptación, aclimatación y estabilización del sistema fue asegurar en todo momento la reproducibilidad de los valores obtenidos, lo cual le da la severidad al estudio realizado. Esto se alcanzó con un mínimo de tres muestras por análisis, a fin de asegurar la reproducibilidad estadística.

Optimización de los tiempos de operación y del rango adecuado de DBO

Una vez evaluado el sistema en un 75% de contenido salino se procedió a optimizar el tiempo de reacción, cambiándolo de 10 horas a 4 horas que fue un valor óptimo determinado en el Trabajo Especial de Grado de Azuaje y Muñoz en el 2006. Al igual que en las fases anteriores se procedió a verificar la estabilización del sistema y la aclimatación de la biomasa antes de evaluar el mismo. Posteriormente se realizaron análisis de $DBO_{5,20}$, DQO y sólidos en sus diferentes formas para estudiar la eficiencia del proceso con el nuevo ciclo de operación.

Seguidamente se evaluó el sistema para cargas orgánicas menores, hasta valores de $\text{DBO}_{5,20}$ en el orden de 20 mg/l. Para variar la carga orgánica se fue eliminando progresivamente la cantidad de melaza añadida al agua residual. Alcanzada la estabilidad, se evaluó el sistema para cargas orgánicas alta, media y baja del afluente con el objeto de determinar la evolución del mismo.

Finalmente se tabularon y graficaron los resultados obtenidos para su análisis y discusión.

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos luego de las experiencias realizadas para evaluar la adaptación, caracterización y optimización de un sistema de reactor secuencial por cargas operando con aguas residuales salinas.

Generación de biomasa y adaptación del sistema

La primera fase se inició con la puesta en marcha del sistema de reactor secuencial por cargas para la generación de biomasa dentro del mismo, operando el sistema con un afluente de agua residual procedente del colector marginal izquierdo del Río Valle. Se estableció el sistema con un ciclo de 12 horas, con un tiempo de retención hidráulica de 10 horas, 30 minutos para la etapa de descarga, 15 minutos para el llenado y 1 hora con 15 minutos para la sedimentación. Luego de operar el sistema las primeras 4 semanas se comenzó a evidenciar la formación de la biomasa dentro del reactor, por lo cual se iniciaron los análisis a fin de cuantificarla.

Uno de los análisis utilizados para dicha cuantificación fueron los sólidos sedimentables en el licor mezclado. Se puede observar en la Figura 7 el incremento de la cantidad de sólidos sedimentables por litro de licor mezclado a lo largo de las semanas de adaptación del sistema.

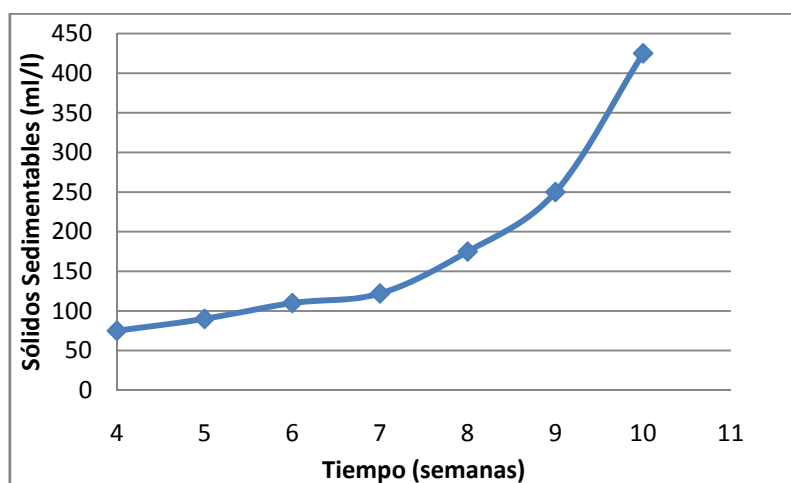


Figura 7. Representación del crecimiento de la biomasa en la etapa de adaptación.

La Figura 7 muestra como la biomasa aumentó de 75 ml/l de sólidos sedimentables en la semana número 4 hasta alcanzar un valor de 425 ml/l en la semana 10; valor en el cual se estabilizó el sistema. Durante el período de generación de biomasa se estudió la contribución al sistema de un aporte de nutrientes para obtener una alta carga orgánica, a partir de la cual se podría evaluar el sistema con agua residual salina, para ello se planteó el uso de melaza, a la cual se le realizó la demanda bioquímica de oxígeno obteniéndose como resultado un valor de 160 mg/l. De esta manera se determinó cual sería la cantidad necesaria de melaza que se debía añadir al agua residual para alcanzar un afluente con una demanda bioquímica de oxígeno en un rango de 300 a 400 mg/l.

La melaza fue añadida en el tanque de mezcla previa al reactor SBR, donde el afluente era preparado para que cubriera tres días de proceso hasta que se

evidenció que el mismo perdía las características deseadas al pasar de los días, por lo tanto se estudió la demanda bioquímica de oxígeno diaria de una mezcla de agua residual con melaza y se obtuvo la curva de DBO mostrada en la Figura 8, donde se puede observar como la demanda bioquímica de oxígeno aumenta día a día, lo cual indica que se estaba llevando a cabo la degradación de materia orgánica en el tanque de mezclado antes de ser alimentado al SBR; además al tercer día el olor del afluente preparado con melaza y agua residual tornaba a ser mal oliente y de color negruzco, debido al exponencial agotamiento del oxígeno y por ende descomposición del agua; en función a esto se determinó que la mezcla debía ser preparada diariamente si se quería un afluente con una DBO en el orden de 300 mg/l.

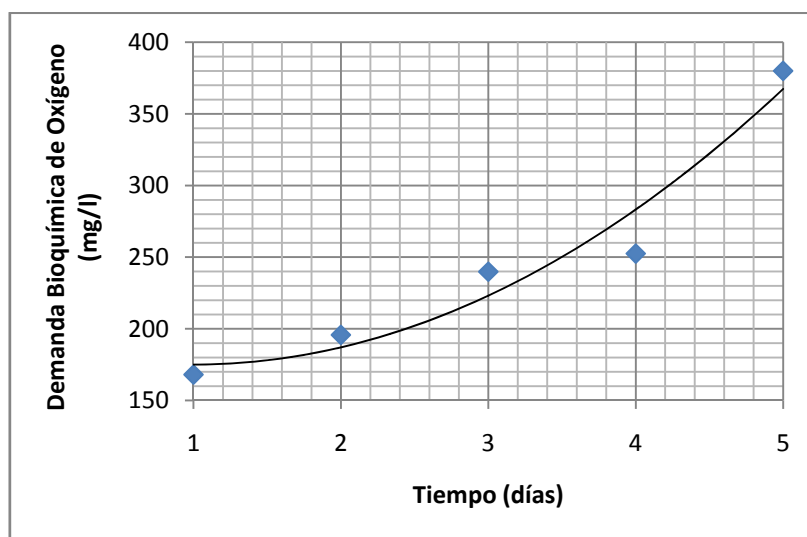


Figura 8. DBO diaria de una mezcla de agua residual con melaza.

El aporte de nutrientes que implica el añadido de melaza al sistema contribuyó con el incremento exponencial de la carga orgánica en el afluente y en el licor mezclado, lo cual se vió reflejado en los análisis de sólidos sedimentables, en la demanda bioquímica de oxígeno, en el índice volumétrico de lodos y en los sólidos suspendidos volátiles, lográndose una biomasa representativa para continuar con la siguiente fase y un agua a tratar con las características propias de un agua de uso doméstico con alta carga orgánica.

En primer lugar se refleja en la Figura 9 el incremento de los sólidos sedimentables debido al crecimiento exponencial de los microorganismos, hasta alcanzar los 400 ml/l de sólidos sedimentables en el período final de generación de biomasa y adaptación del sistema.

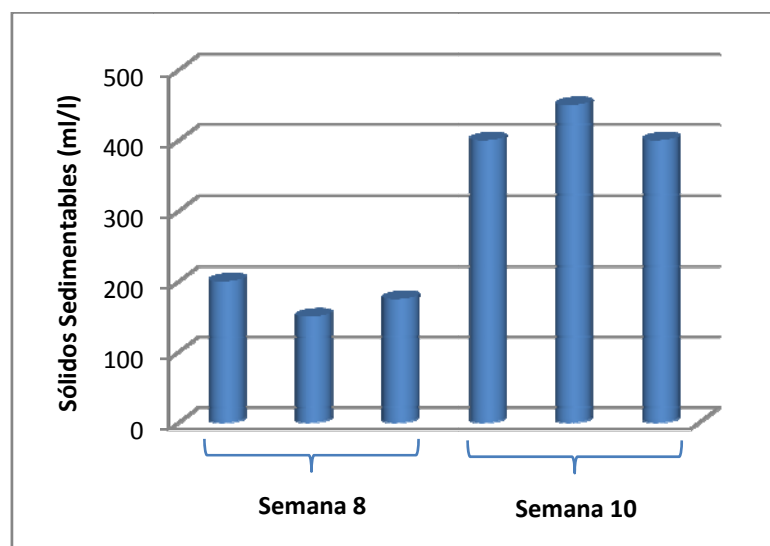


Figura 9. Sólidos Sedimentables en el período de generación de biomasa.

La estabilización del sistema se consiguió entre la novena y décima semana de operación, durante las cuales se llevó a cabo un programa de análisis de tres muestreos validando así su reproducibilidad en el tiempo. Se realizaron análisis del Índice Volumétrico de Lodos (IVL) comúnmente utilizado como un parámetro de control de la sedimentación del licor mezclado. Un valor de 100 ml/g para el IVL es propio de una buena sedimentación de lodos para la mayoría de los licores mezclados de tratamientos de agua residuales, mientras que valores por encima de 150 ml/l están asociados al crecimiento de organismos filamentosos que provocan déficit en la sedimentación.

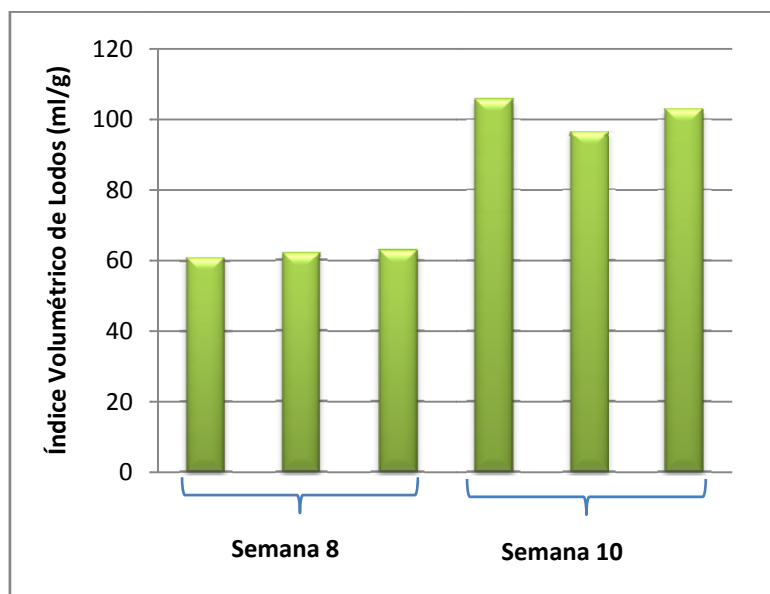


Figura 10. Índice Volumetrico de Lodos en el período de generación de biomasa.

Considerando esto, se pueden comparar los resultados obtenidos del IVL para la etapa de generación de biomasa con los recomendados en la bibliografía. Se puede observar en la Figura 10 que para la semana 8 se tenía un IVL de 62 ml/g en promedio de las tres muestras, mientras que para la semana 10 luego de añadir al sistema el aporte extra de nutrientes se alcanzó un IVL de 98 ml/g en promedio, lo cual era indicativo de una buena sedimentación y remoción de materia orgánica.

Conjuntamente se realizaron análisis de $\text{DBO}_{5,20}$ para cuantificar la carga orgánica que estaba recibiendo el sistema SBR y el nivel de remoción alcanzado hasta ese momento. Los resultados de dicha evaluación, pueden apreciarse en la Figura 11 y Figura 12.

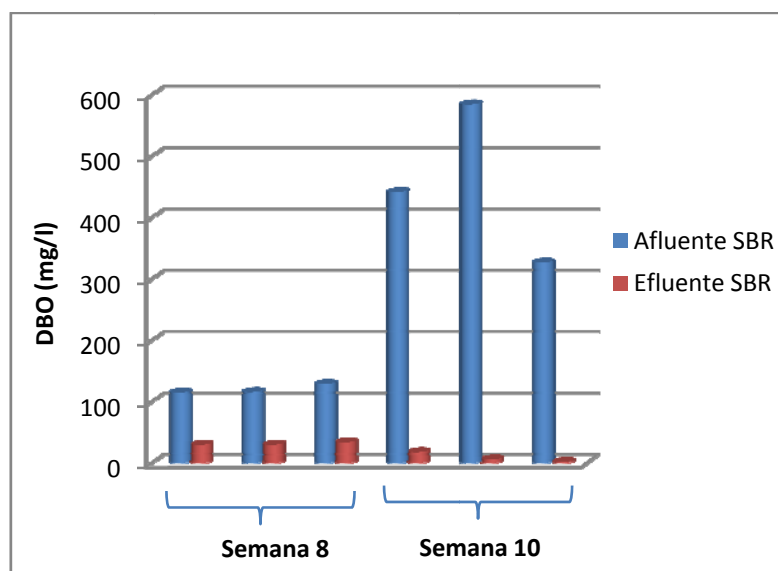


Figura 11. Valores de DBO en los afluentes y efluentes en el período de generación de biomasa.

En la Figura 11 se observa cómo se incrementó de forma exponencial la carga orgánica en el afluente en la semana 10 luego de haberse alimentado al agua residual una cierta cantidad de melaza, logrando un afluente deseado con una alta carga orgánica cuya demanda bioquímica de oxígeno oscilaba entre 300 y 600 mg/l.

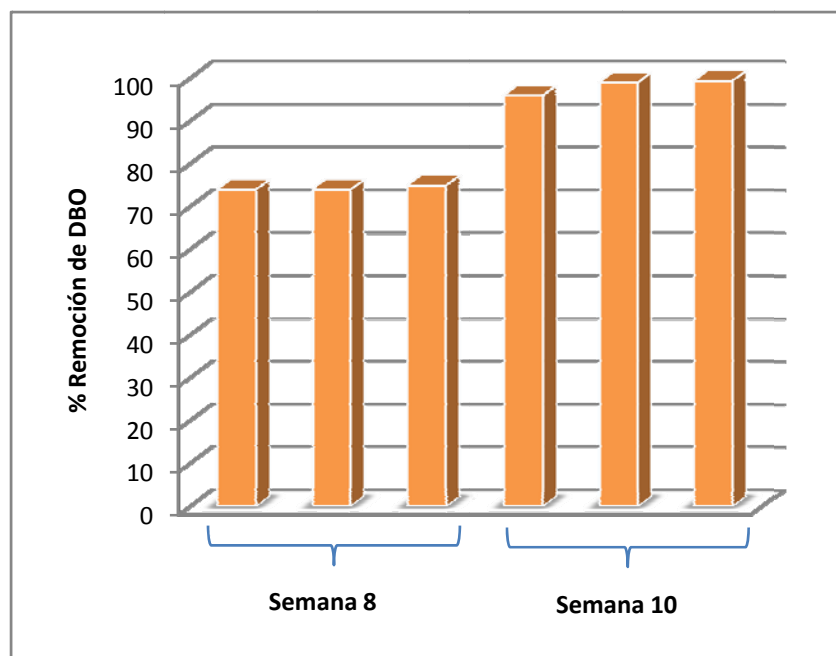


Figura 12. Porcentaje de remoción en términos de DBO para el período final de generación de biomasa.

El factor de remoción en términos de DBO presentó la misma tendencia al aumento progresivo que presentaron los sólidos sedimentables, como se observa en la Figura 12 el porcentaje de remoción del sistema fue aumentando gradualmente durante cada semana, hasta alcanzar valores mayores al 90%, estabilizándose el sistema en un 99% de remoción en función a la demanda bioquímica de oxígeno en la etapa final de adaptación.

De la misma forma, se realizaron los análisis de DQO para tres muestreos realizados durante la octava y décima semana respectivamente. Los resultados de los muestreos en términos de factor de remoción de DQO se muestran en la Figura 13.

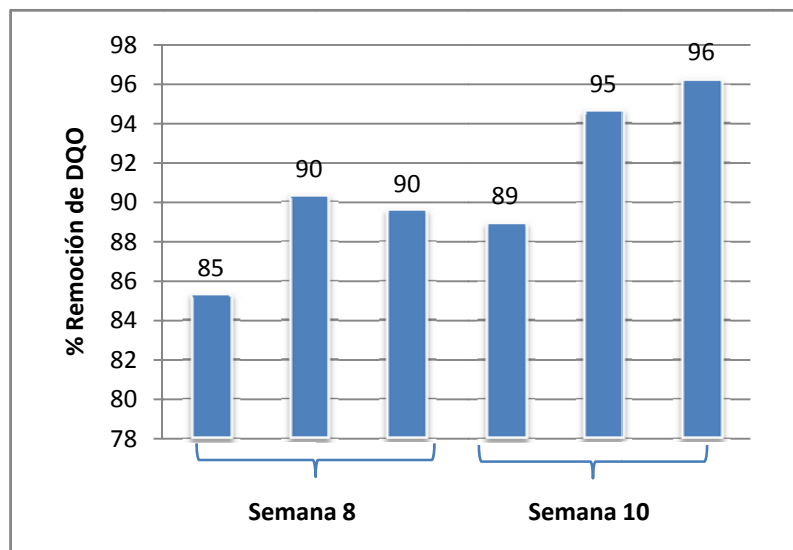


Figura 13. Porcentajes de remoción en términos de DQO para el período final de generación de biomasa.

En la Figura 13, se aprecia que los factores de remoción en términos de DQO se mantuvieron en un rango entre 85 y 96 %, los cuales son indicativos de un adecuado funcionamiento del proceso, sin embargo no son estables debido a la variabilidad del agua residual que se capta del Colector y a la melaza cuya composición puede también ser variable.

Finalmente, para esta etapa se realizaron análisis de sólidos suspendidos en el afluente, efluente y en el licor de mezcla, para los tres muestreos correspondientes a la semana 8 y a la semana 10, los resultados se muestran en la Figura 14.

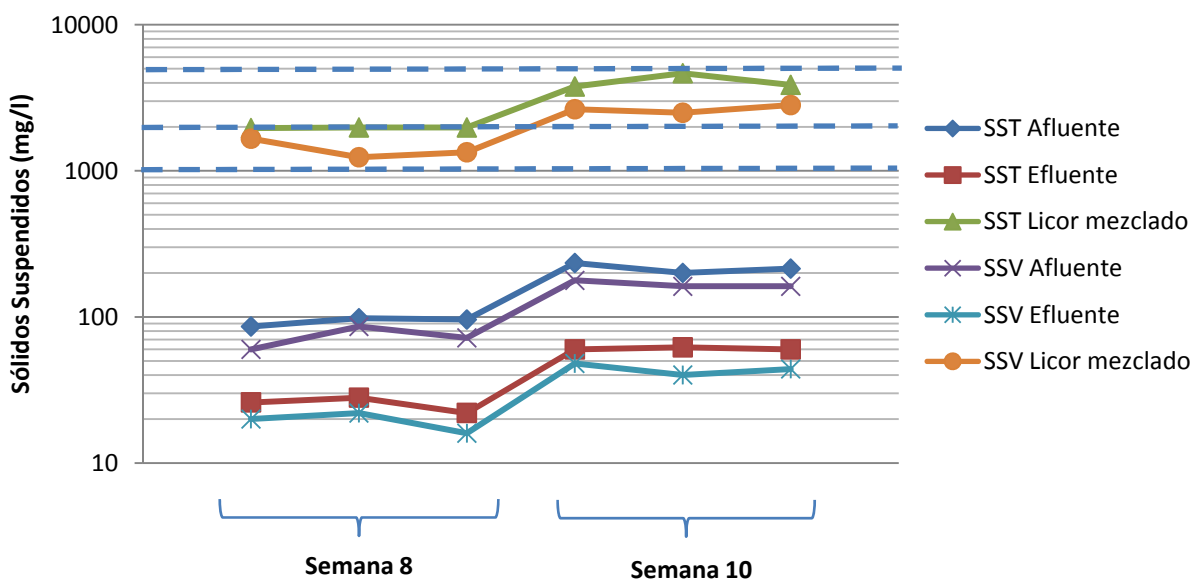


Figura 14. Variación de los Sólidos Suspendidos en el afluente, efluente y en el licor mezclado para el período final de generación de biomasa.

Se puede observar que los valores de Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor de mezcla para la semana 8 se encontraban entre 1000 y 2000 mg/l mientras que para la semana 10, luego de haberse formado una cantidad mayor de biomasa los SSV en el licor de mezcla se encuentran dentro del rango de 2000 a 5000 mg/l, rango recomendado por la bibliografía para los sistemas de reactor biológico secuencial por cargas (Metcalf y Eddy, 2003). En cuanto al afluente y el efluente para la semana 8 se logra corroborar en la Figura 14 que existe una remoción de sólidos suspendidos (en el afluente los sólidos suspendidos volátiles oscilan alrededor de 70 mg/l mientras que en el efluente varían alrededor de 15 mg/l), para la semana 10 los sólidos suspendidos aumentan en la entrada y salida al sistema SBR por el efecto de la melaza sobre el crecimiento de los microorganismos, estabilizándose en dichos valores. Los resultados indican que el sistema estaba adaptado a las condiciones, es decir, el sistema se estabilizó y se pudo continuar con la siguiente etapa.

Además de estos análisis, se puede agregar por apreciación visual, que el sistema en algunos días en el período de formación de biomasa presentó un desarrollo de espuma en la superficie del licor mezclado, la cual puede generarse por muchas causas, entre ellas puede asociarse a un déficit de nutrientes y al suministrársele melaza al agua residual, dejó de presentar dicha espuma.

Luego de corroborar la formación de una biomasa adecuada y la estabilidad del sistema por la reproducibilidad de un porcentaje de remoción de $\text{DBO}_{5,20}$ constante, se procedió con la evaluación del reactor secuencial por cargas bajo condiciones de salinidad, cuyos resultados permitieron concluir sobre el efecto del contenido salino en la efectividad del proceso. Cabe destacar que la adaptación del sistema es una

etapa repetitiva que se verificó ante cualquier cambio en las condiciones de operación.

Caracterización de las aguas residuales con contenido salino y evaluación del sistema

La etapa de caracterización de las cargas consistió de dos fases simultáneas, una referida a la simulación del agua residual con determinado contenido salino y la fase de caracterización del afluente, efluente y licor de mezcla ante esa determinada condición. A continuación se reportan los resultados obtenidos en ambas fases.

Simulación de las aguas residuales con contenido salino

La simulación del agua residual propia de comunidades pertenecientes a islas se consiguió gracias a la combinación de agua residual procedente del colector marginal izquierdo del río Valle con agua de mar del litoral central, la cual se preparaba diariamente en el tanque de mezclado previo al reactor.

Tal y como se estableció en la metodología se simularon las aguas residuales preparando cierto volumen diario de agua residual con contenido salino, partiendo de 1,4% de agua de mar hasta un 75%. El agua residual con los diferentes porcentajes de contenido salino, se alimentó al sistema para proceder a caracterizarlo y evaluarlo.

A medida que se simularon las aguas residuales con los diferentes contenidos salinos se medía la salinidad, el pH y la conductividad de la mezcla preparada que se

alimentaría al sistema. Como se observa en la Figura 15 la salinidad fue incrementándose gradualmente en el afluente al sistema, hasta operarlo con una mezcla que contenía un 75% de agua de mar y 25% de agua residual, cuya salinidad era de 27,9 partes por trillón (ppt), mientras que la del agua de mar del litoral central es de 37,5 ppt.

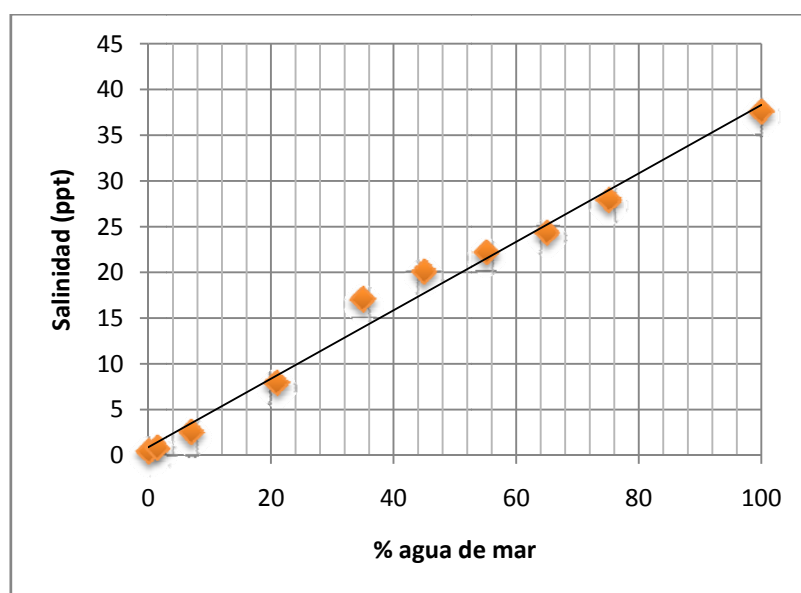


Figura 15. Salinidad del agua residual para los diferentes porcentajes de contenido salino.

La conductividad es una medida de la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica. La conductividad está relacionada por un parámetro llamado fuerza iónica que viene determinado por la concentración y la carga de cada ión presente en el agua. Por lo tanto, a medida que aumenta la concentración de iones en la solución aumenta la conductividad del agua de una forma completamente

proporcional o lineal como se observa en la Figura 16, por tal motivo la conductividad fue una forma de verificar el porcentaje de contenido salino que se simuló.

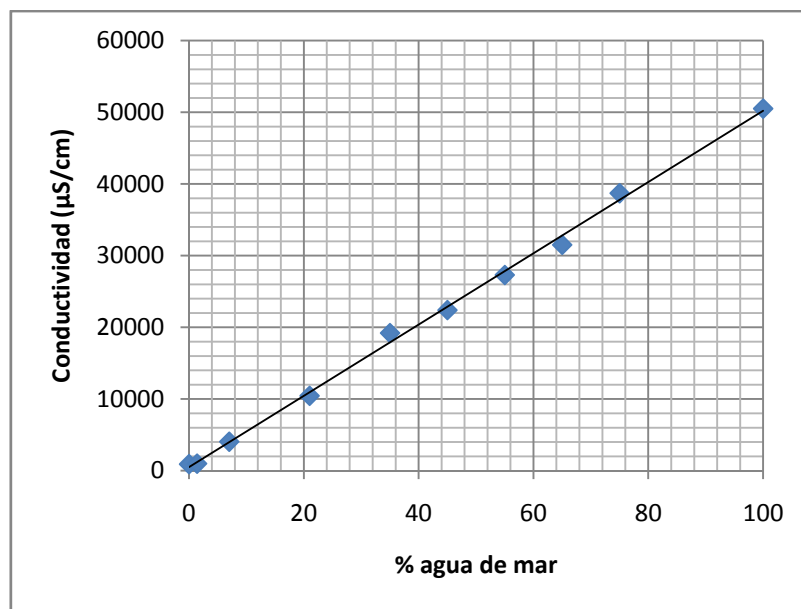


Figura 16. Conductividad del agua residual con diferentes porcentajes de contenido salino

Otro análisis que se realizó al agua residual combinada con el agua de mar fue la presencia de cloruros, puesto que la cantidad de cloruros es una limitación para determinar la demanda química de oxígeno bajo métodos estandarizados; de acuerdo a la bibliografía, 2.000 mg/l es el valor límite de presencia de cloruros en una muestra para poder realizar análisis de DQO sin que ocurra interferencia. La Figura 17 ilustra el aumento de los iones cloruros en el agua residual simulada a

medida que se incrementa el porcentaje de agua de mar y se logra percibir que para valores superiores al 10% de contenido salino, ya el agua residual supera el límite de cloruros permisibles para realizar análisis de DQO sin interferencia; es por ello que los resultados de las demanda químicas de oxígeno en el afluente y efluente al proceso están sujetos a errores y no serán considerados fundamentales en el estudio de la efectividad del sistema ante tales condiciones.

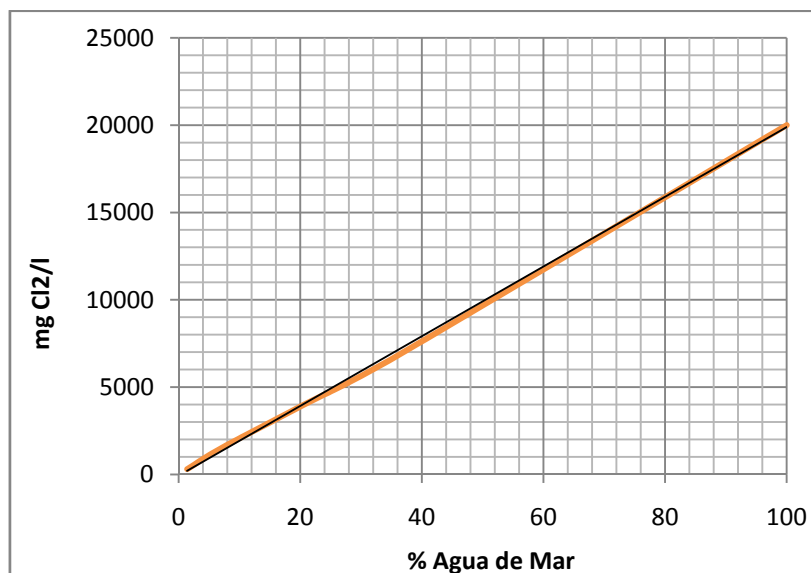


Figura 17. Presencia de Cloruros en el agua residual para los diferentes porcentajes de contenido salino

El pH es determinante en la evolución y desarrollo de los microorganismos contenidos en el sistema SBR, debido a que el medio debe ser propicio para la supervivencia de los mismos. El intervalo de concentración para la existencia de la mayoría de la vida biológica es estrecho y crítico, entre 7 y 9 mg/l. Para cada

volumen de agua residual simulada se determinó el pH de una muestra a modo de verificar que estuviese bajo parámetro, obteniéndose de este modo los resultados presentados en la Figura 18.

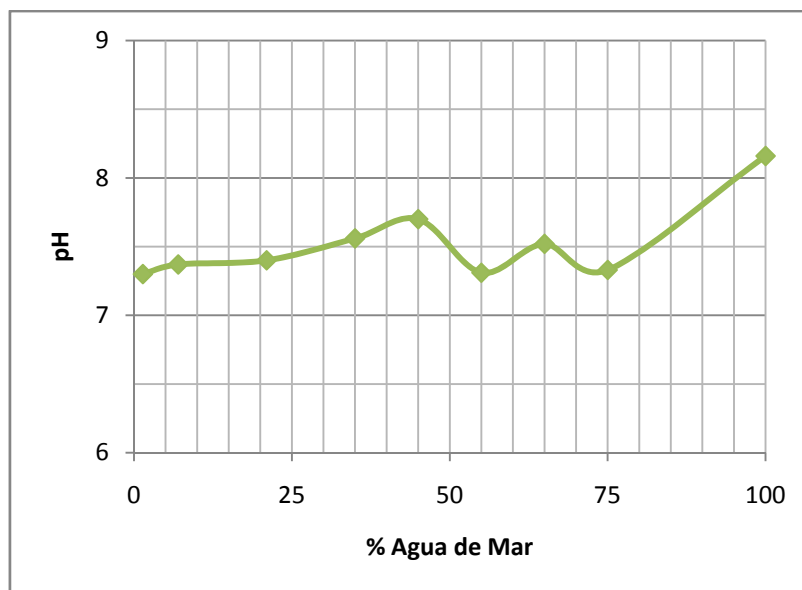


Figura 18. Valores de pH del agua residual para los diferentes porcentajes de contenido salino

Caracterización de las cargas

En la Figura 19 se muestra la variación de los sólidos sedimentables en el licor de mezclado para el sistema operando con 1,4% y 7% de contenido de agua de mar. Se observa una disminución de la concentración de la biomasa cuantificada mediante la determinación de sólidos sedimentables, los cuales varían desde 300 ml/l para 1,4% de agua de mar en el agua residual a 275 ml/l al operar con 7%.

Así mismo, al compararlo con el sistema funcionando sólo con agua residual con melaza se observa una disminución de sólidos sedimentables del orden del 30%.

La disminución de la concentración de microorganismos se debe a la pérdida de aquellos que no toleran el medio hipertónico salino, ocasionándose los fenómenos conocidos como plasmólisis y turgencia y en consecuencia la inhibición celular y mortandad de los mismos.

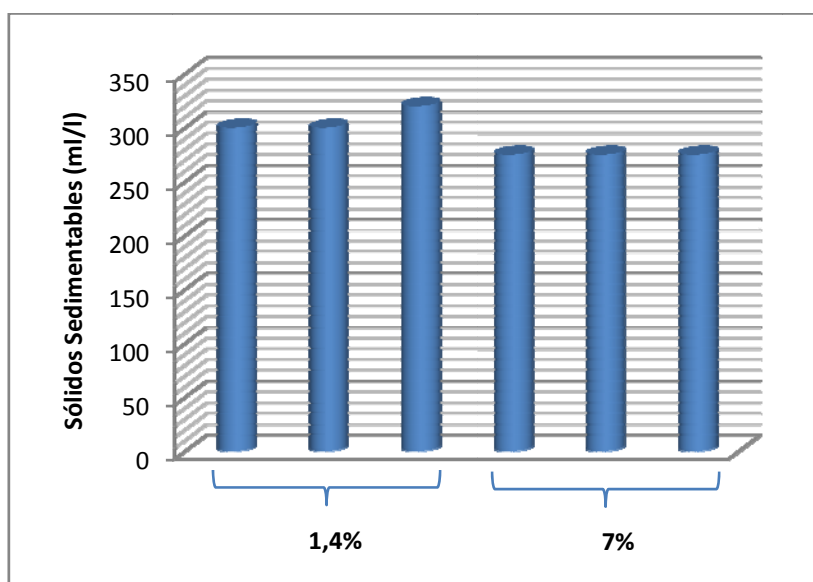


Figura 19. Sólidos Sedimentables en el licor mezclado para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.

Los análisis de la demanda bioquímica de oxígeno en el afluente y el efluente permitieron determinar el porcentaje de remoción de materia orgánica

biodegradable en función a la $DBO_{5,20}$ para 1,4% y 7% de contenido salino, obteniéndose un 99% de eficiencia del proceso, como muestra la Figura 20, lo cual indica que a pesar del efecto adverso de la sal sobre los microorganismos, el sistema continuó operando de manera exitosa y mantuvo la eficiencia del proceso, esto se debe en parte a que los porcentajes de agua de mar con los que se inició la aclimatación fueron bajos y existió un tiempo prudencial de una semana para que el sistema se estabilizara en cada nivel.

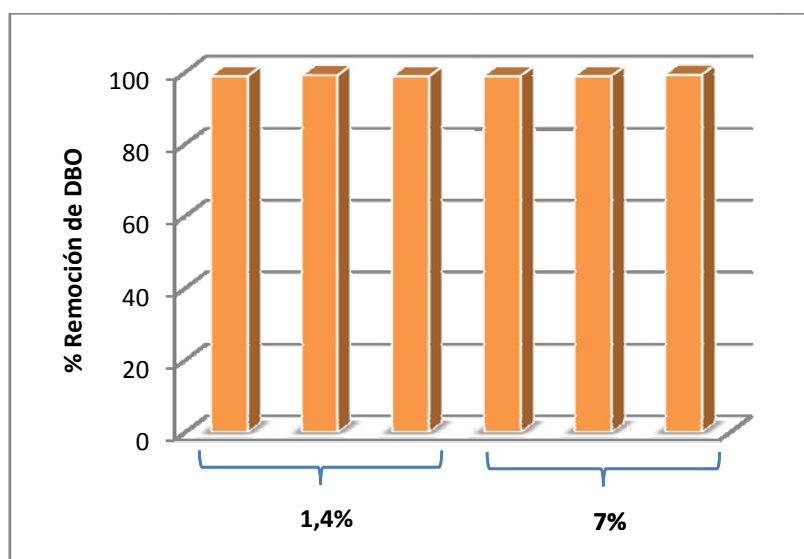


Figura 20. Porcentaje de remoción en términos de DBO para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.

La remoción de materia orgánica en términos de demanda química de oxígeno muestra eficiencias favorables para el proceso, manteniendo valores similares a los

de la eficiencia en términos de DBO, cuyos valores son superiores al 90% como se ilustra en la Figura 21. Para el agua residual con contenido salino inferiores al 10% de agua de mar la cantidad de cloruros en las muestras no supera los 2.000 mg/l (ver Figura 17) valor límite que permite determinar la demanda química de oxígeno sin interferencia en el análisis y por ende la obtención de resultados confiables.

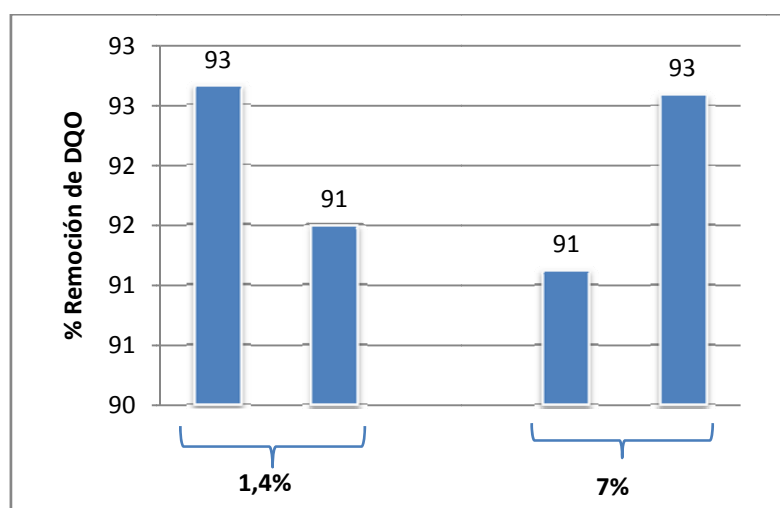


Figura 21. Porcentajes de remoción en términos de DQO para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.

No obstante, cuando se supera la concentración de 2.000 mg/l de cloruros en el líquido residual a tratar, se adoptó otra metodología que consistió en hacer diluciones de las muestras para determinar la demanda química de oxígeno. Sin embargo, no se lograron obtener resultados reproducibles ni lógicos.

Conjuntamente se realizaron análisis de sólidos suspendidos para dichos niveles de salinidad los cuales reflejan un ligero aumento en la cantidad de sólidos suspendidos totales y volátiles en el licor de mezcla, esto debido al peso que suman las partículas de sal disueltas en el agua de mar que por gravedad quedan suspendidos en el licor mezclado; sin embargo, la Figura 22 muestra que el porcentaje de contenido salino no es suficiente para evidenciar un cambio notable en los sólidos suspendidos en el afluente y efluente al sistema.

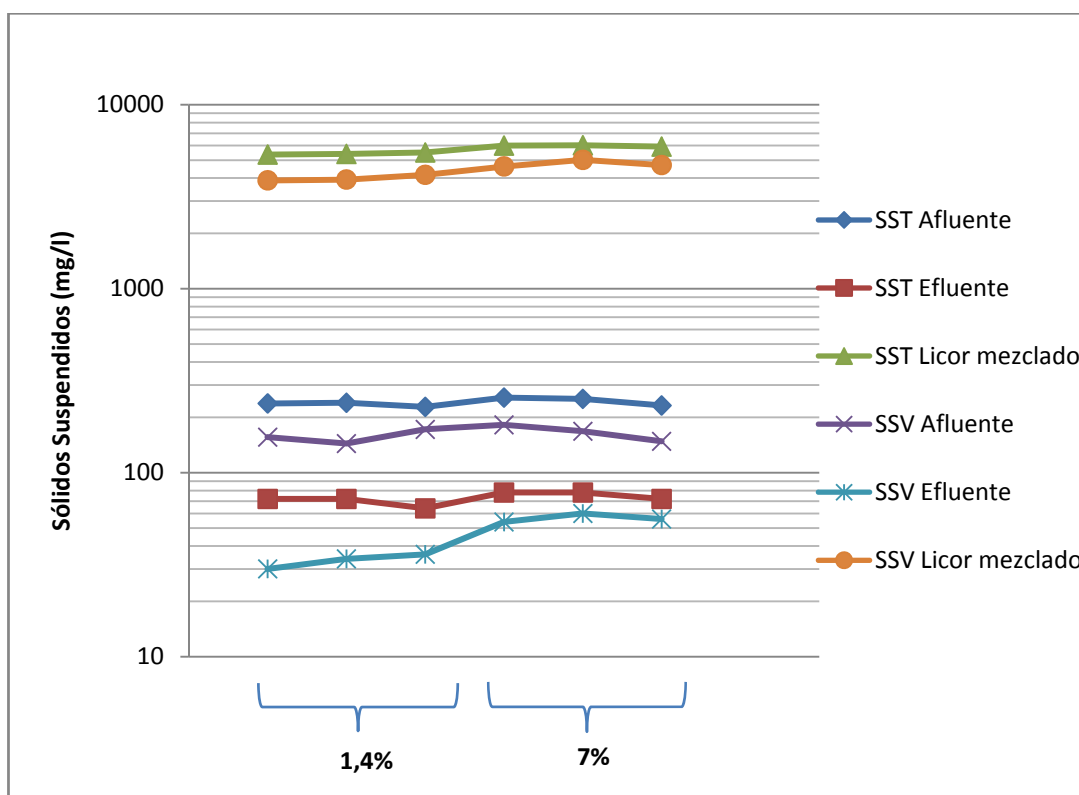


Figura 22. Variación de los sólidos suspendidos en la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.

Determinados los sólidos suspendidos totales en el licor mezclado y conocidos los sólidos sedimentables se determinaron los valores de los índices volumétricos de lodos para dichos niveles de salinidad, si se observa la Figura 23 es evidente una disminución en el IVL al aumentar el porcentaje de salinidad, para la condición de 1,4% se tiene un IVL cuyo valor en promedio fue 57 ml/g, mientras que para un 7% decayó a 46 ml/g. La variación es brusca si se comparan dichos valores con el IVL en la etapa final de adaptación, cuando aún no se operaba el sistema con agua residual salina, cuyo valor oscilaba entre los 100 ml/g (ver Figura 10). Éste parámetro es una forma de evaluar la sedimentación del licor mezclado en la etapa de reposo del SBR.

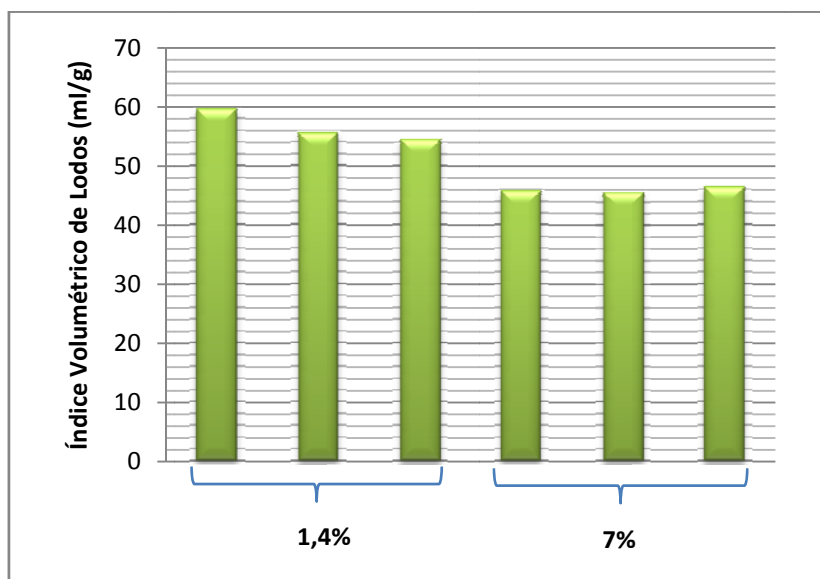


Figura 23. Variación del Índice Volumétrico de Lodos para la etapa inicial de aclimatación con contenido salino.

La disminución del IVL se debe a la interferencia de las sales en la determinación de los sólidos suspendidos totales; sin embargo, en la Figura 22 se observa que los sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla, que están asociados con la cantidad de microorganismos presentes, se mantienen en un rango constante y no tienen la tendencia a disminuir que presenta el índice volumétrico de lodos.

Al comprobarse la estabilidad del sistema para estos niveles de salinidad, debido a que se mantuvo la eficiencia del proceso en términos de $DBO_{5,20}$, se procedió a simular y a alimentar el sistema SBR con la próxima condición de salinidad que fue un afluente de agua residual con un 21% de agua de mar. A fines de poder mostrar los cambios, se presentan en conjunto los resultados del 21% con los del 35% de agua de mar.

Inicialmente se operó el sistema con la mezcla simulada de agua residual con un 21% de contenido salino y se alimentó al reactor secuencial por cargas durante una semana para garantizar la estabilidad del sistema, la cual se corroboró con la determinación de la eficiencia del proceso en función a la demanda bioquímica de oxígeno. Se realizaron los análisis pertinentes y se procedió a aumentar el nivel de salinidad a un 35%. En la Figura 24 se observan los resultados de las demandas bioquímicas de oxígeno de los afluentes, que por poseer alta carga orgánica muestran valores superiores a los 300 mg/l de oxígeno requerido, punto favorable puesto que el objetivo de ésta tesis es operar el sistema bajo esa condición para que sea visible el efecto de la salinidad en el proceso.

La tendencia en los resultados en cuanto a la eficiencia del proceso para las condiciones de salinidad en discusión se mantuvo, superó el 98% tanto para un 21% de contenido salino como para el 35%, como se muestra en la Figura 25, demostrándose que el sistema es capaz de tolerar aguas residuales salinas siempre y cuando se aclimate la biomasa de forma paulatina.

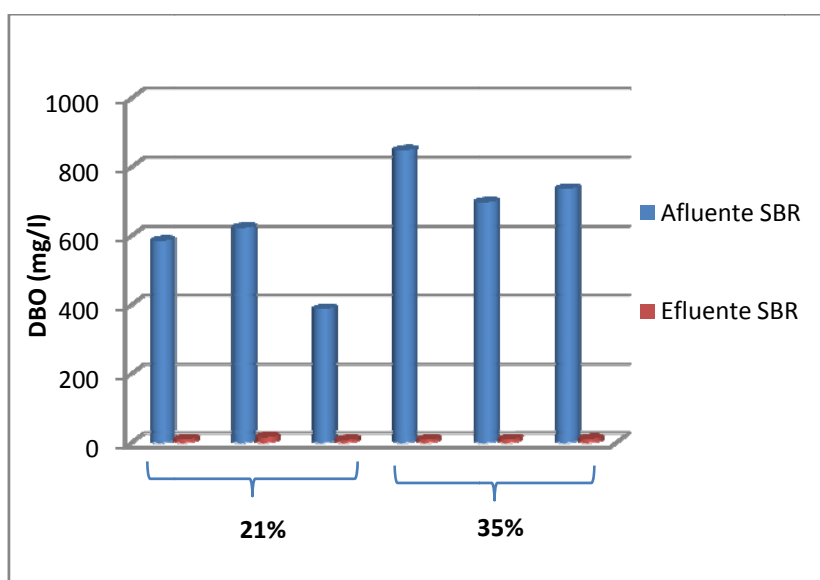


Figura 24. Valores de las $DBO_{5,20}$ en los afluentes y efluentes para el 21% y el 35% de contenido salino.

Fundamentándose en los resultados obtenidos de los afluentes y efluentes del sistema, se determinó el porcentaje de remoción en términos de $DBO_{5,20}$, para el 21% y el 35% de contenido salino, los cuales se pueden observar en la Figura 25.

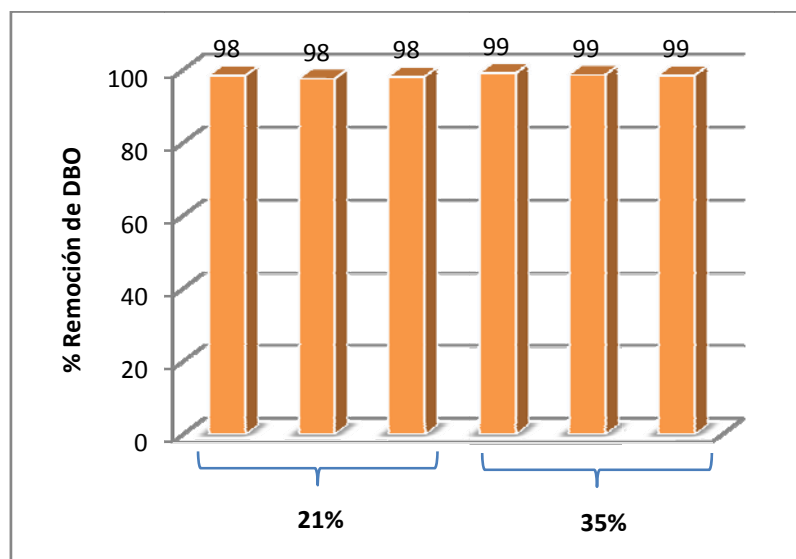


Figura 25. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para el 21% y el 35% de contenido salino.

Para el 21% y el 35% de contenido salino, se efectuaron análisis correspondientes a $DBO_{5,20}$ y sólidos en sus diferentes formas. Se realizaron tres muestreos por nivel, necesarios para la caracterización y para validar la reproducibilidad de los resultados.

El comportamiento de los sólidos sedimentables mantuvo la misma tendencia, una disminución gradual a medida que se aumentó el nivel de salinidad en el agua residual, lo cual implica la no tolerancia de los microorganismos al medio hipertónico y la pérdida de parte de la biomasa, conjuntamente con la inhibición celular que impide el desarrollo de los mismos. En la Figura 26 se evidencia una disminución de los sólidos sedimentables de un valor promedio de 300 ml/l para el

21% a un valor promedio de 250 ml/l para el 35% de contenido salino en el agua residual.

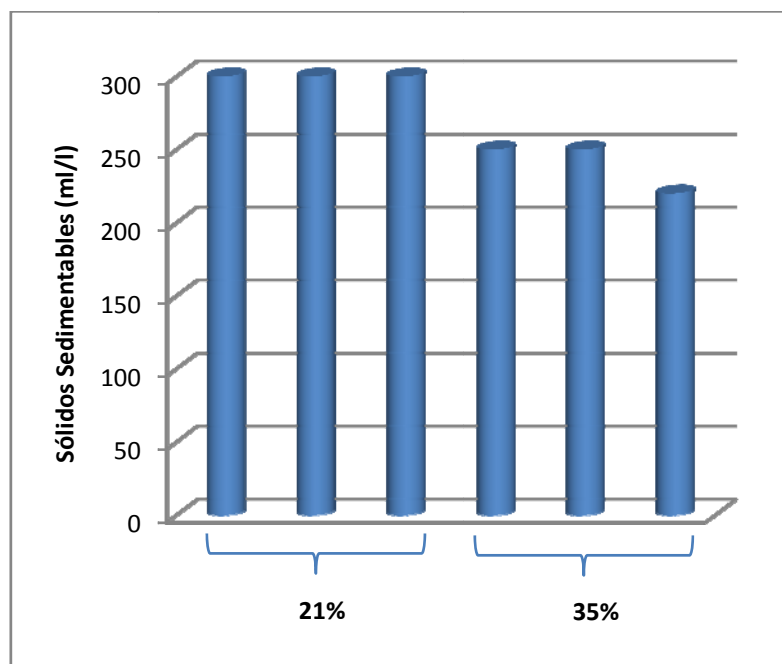


Figura 26. Variación de los Sólidos Sedimentables para el 21% y el 35% de contenido salino.

Los resultados obtenidos de los sólidos suspendidos que se ilustran en la Figura 27 para el 21% y el 35%, permiten analizar como aumentaban los sólidos suspendidos totales debido a la interferencia causada por la mayor cantidad de cloruros en las muestras.

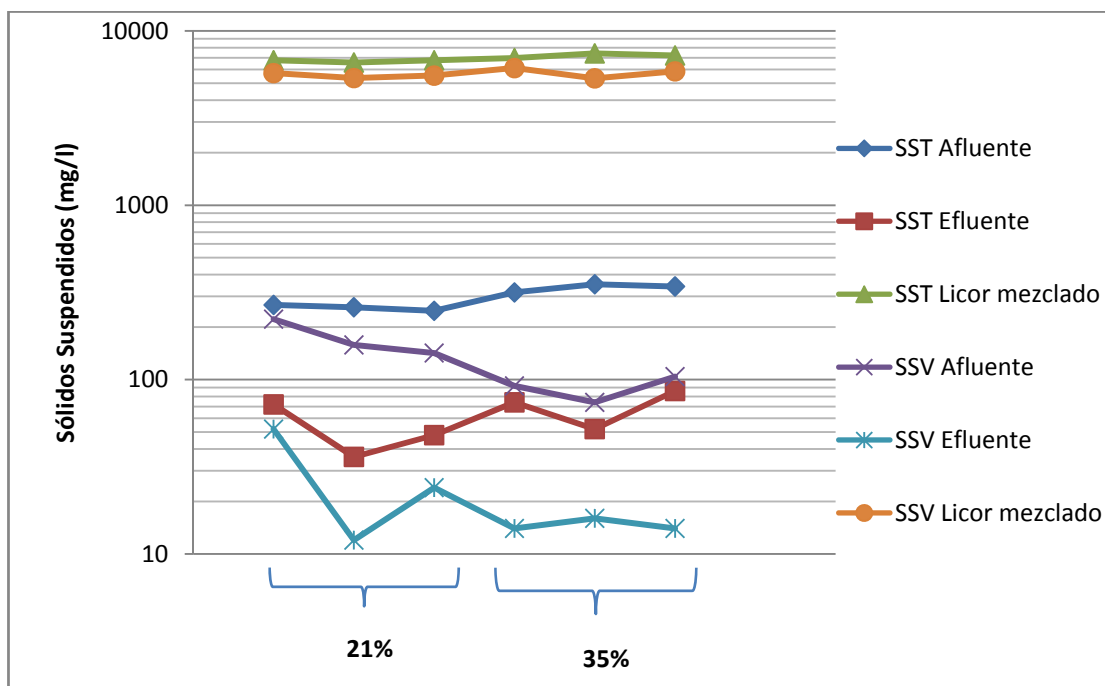


Figura 27. Sólidos suspendidos en los afluentes, efluentes y licores de mezcla para el 21% y 35% de contenido salino.

En la Figura 27, si se comparan los sólidos suspendidos volátiles en el afluente con los del efluente se observa que existe una disminución superior a 50 mg/l de sólidos suspendidos volátiles debido al sistema SBR.

Por último en esta etapa intermedia de aclimatación se obtuvieron resultados del índice volumétrico de lodos en los que se apreció la continua disminución de dicho parámetro de control de sedimentación. En la Figura 28 se observa como el IVL para un 21% oscila entre 40 y 45 ml/g mientras que para el 35% oscila entre 30 y 35 ml/g. A pesar de la disminución progresiva del IVL, análisis indicaron que el proceso

mantenía su efectividad y que se estaba llevando a cabo la remoción de materia orgánica biodegradable, esto ocurre debido a que el IVL depende de los sólidos suspendidos totales, los cuales se ven afectados por la interferencia de las sales. Por lo tanto, éste parámetro no es totalmente concluyente con respecto a lo que ocurre en la sedimentación.

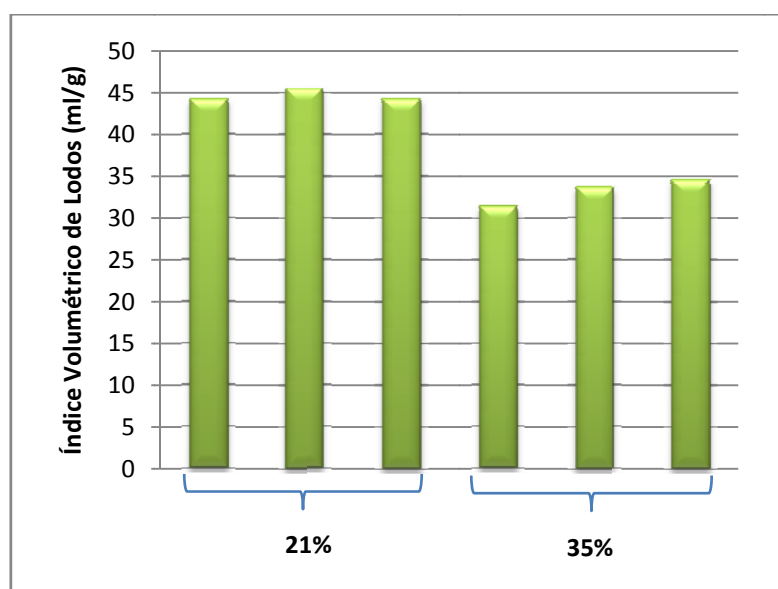


Figura 28. Variación del Índice Volumétrico de Lodos para el 21% y 35% de contenido salino.

Lograda la aclimatación de la biomasa y la estabilización del sistema para los primeros contenidos salinos, se prosigue con 45% y 55% de agua de mar contenida en el agua residual. La demanda bioquímica de oxígeno en los afluentes y efluentes permitió determinar las eficiencias del proceso y se ilustran en la Figura 29.

A pesar del efecto adverso de los cloruros sobre los microorganismos, la biomasa aclimatada continua respondiendo favorablemente, logrando remover materia orgánica biodegradable con una eficiencia superior al 95%.

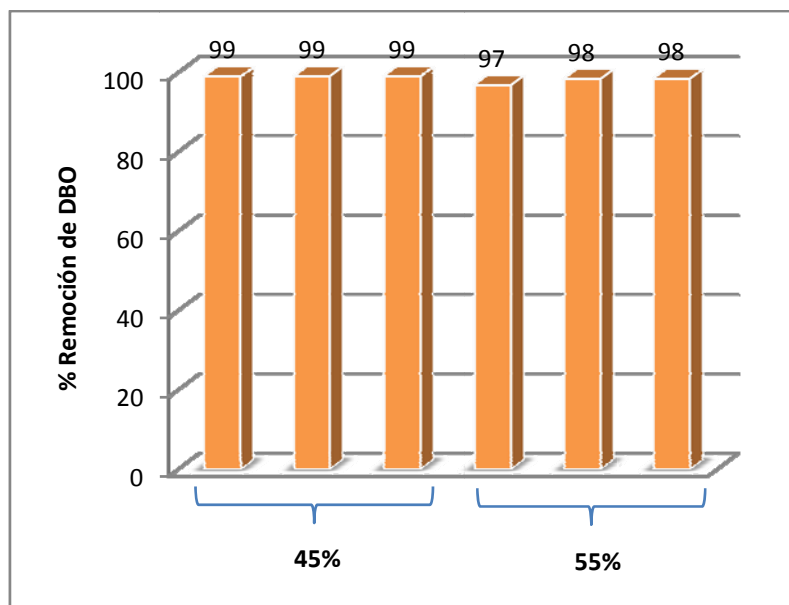


Figura 29. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para el 45% y el 55% de contenido salino.

Luego de llevar 15 semanas el sistema operativo y 6 semanas con aguas residuales salinas, el proceso arrojó resultados que indicaron estabilidad, adaptación y aclimatación de la biomasa ante las condiciones fisicoquímicas a las cuales se operaba el reactor secuencial por cargas.

Los sólidos sedimentables aumentaron ligeramente con respecto al nivel de salinidad anterior, como se observa en la Figura 30, variando de 250 ml/l para un 35% a 275 ml/l para un 45%. El incremento es positivo ya que refleja un crecimiento de la población orgánica en el licor mezclado. Además para cuando se operó el sistema con un afluente simulado con un 55% de agua de mar, los sólidos sedimentables aumentaron ligeramente y se estabilizaron en 300 ml/l.

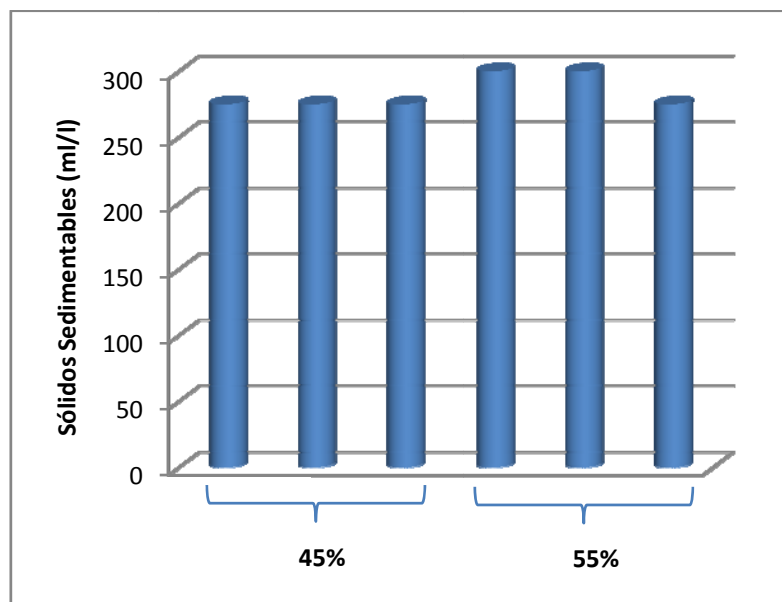


Figura 30. Variación de los Sólidos Sedimentables para el 45 % y el 55% de contenido salino.

El Índice Volumétrico de Lodos mostró el mismo comportamiento de estabilización, fluctuando en un rango de 30 a 40 ml/l para ambos niveles de salinidad, puesto que la variación en los sólidos sedimentables se equiparó con la variación en los sólidos suspendidos totales, sin embargo ambos cambiaron debido a la interferencia de las

sales. Investigaciones han demostrado que una buena sedimentación va asociada a valores del índice de lodos alrededor de 100 ml/l, no obstante, para aguas residuales domésticas con contenido salino no se ha comprobado lo anterior debido a que la continua variación en los sólidos suspendidos totales por la alimentación de sales, no permite que el IVL obtenido sea como el demostrado en otras investigaciones de aguas residuales domésticas comunes.

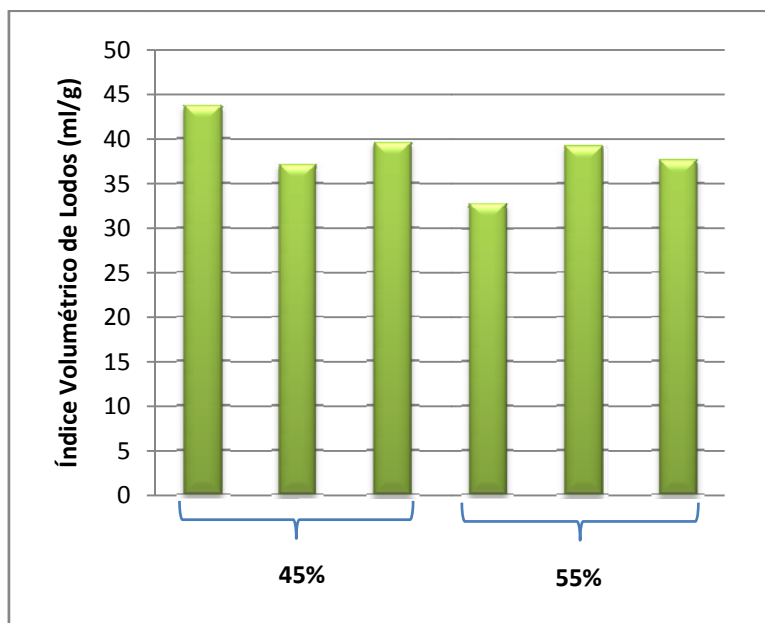


Figura 31. Variación del Índice Volumétrico de Lodos para el 45% y el 55% de contenido salino.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que un IVL que oscila en el rango que se observa en la Figura 31, permite obtener eficiencias en el sistema superiores al 95%, logrando remover la materia orgánica biodegradable presente en el agua

residual salina de forma efectiva, de modo que éste parámetro sirve para controlar la sedimentación más no es comparable con valores obtenidos para aguas residuales domésticas comunes y probablemente no es del todo concluyente sobre lo que verdaderamente ocurre en dicha etapa.

Para las condiciones de salinidad anteriores (45% y 55%) se logró alcanzar una estabilidad y se verificó que el sistema procesaba de forma eficaz el agua residual logrando disminuir la cantidad de materia orgánica biodegradable con eficiencias superiores al 95%, además se apreció una adaptación de la biomasa al contenido salino a través del análisis de los sólidos sedimentables y el cálculo del índice volumétrico de lodos, por lo tanto se continuó con la simulación de aguas residuales con un 65% de agua de mar.

En la Figura 32 se observa como fluctúan las cargas en el afluente cuando se operó el sistema con un agua residual compuesta con un 65% de agua de mar, ante tal condición el sistema se adaptó, se hizo la caracterización y se continuó con el 75%, es por ello que se muestra en la Figura 32 las $DBO_{5,20}$ de las cargas para dicho nivel.

De igual forma se observa en la Figura 32, como cambian continuamente la composición de las aguas residuales procedentes del colector, variaciones que el sistema debe tolerar, no obstante, los SBR tienen la ventaja de operar ante condiciones variables manteniendo su eficiencia, es por ello que a pesar de recibir afluentes con demanda bioquímica de oxígeno distintas, el sistema logra disminuir la carga orgánica en el afluente a valores menores de 20 mg/l siéndo el valor máximo permitido, según la Gaceta Oficial de la República de Venezuela (N° 5021. Decreto

883) para vertidos líquidos a cuerpos de agua, de 60 mg/l. Por lo tanto el SBR permite obtener un efluente que cumple con las normativas para ser descargado en cuerpos de agua, aún cuando procesa aguas con hasta un 75% de contenido salino.

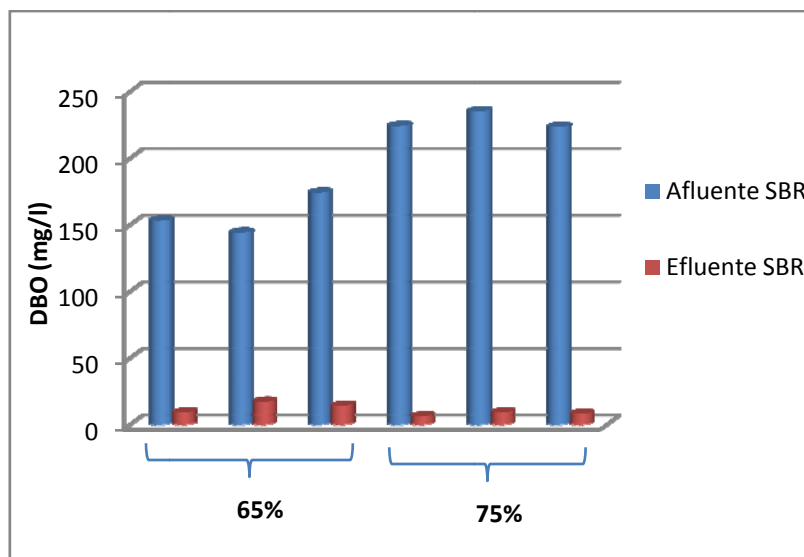


Figura 32. Valores de las $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes para la etapa final de aclimatación con contenido salino.

Con base en estos valores de $DBO_{5,20}$ de los afluentes y efluentes se mantuvo una remoción de materia orgánica biodegradable superior al 94% en el sistema, para el 65% y el 75% de contenido salino, como se ilustra en la Figura 33.

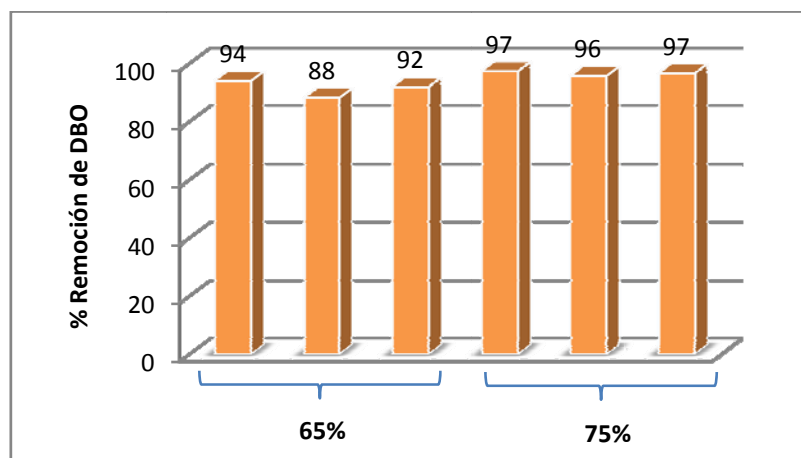


Figura 33. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ en la etapa final de aclimatación con contenido salino.

Una vez alcanzado valores estables y reproducibles en términos de $DBO_{5,20}$, se procedió a evaluar los sólidos en sus diferentes formas. La Figura 34, muestra el resultado de los análisis de sólidos sedimentables para el 65% y el 75%. Los mismos continuaron estables en un rango entre 300 y 350 ml/l, tanto para la etapa en que se introdujo al sistema agua residual con 65% de agua de mar como para un 75%, lo cual significa que la biomasa se adaptó a las condiciones fisicoquímicas del agua residual salina y a pesar del efecto negativo que tienen los cloruros sobre los microorganismos se pudo corroborar que la biomasa puede aclimatarse en el tiempo a dichas condiciones.

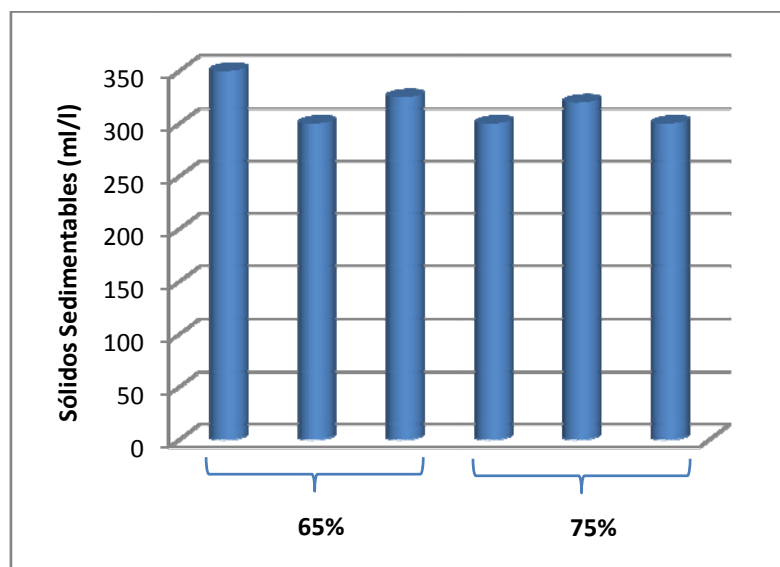


Figura 34. Variación de los Sólidos Sedimentables en la etapa final de aclimatación con contenido salino.

Los valores del índice volumétrico de lodos no mostraron cambios significativos con respecto a los niveles anteriores de salinidad, se mantuvieron en una rango entre 35 y 45 ml/g, de forma estable y reproducible, lo cual significa que los efectos que se apreciaron en la ligera disminución de la eficiencia no fueron apreciables en éste parámetro.

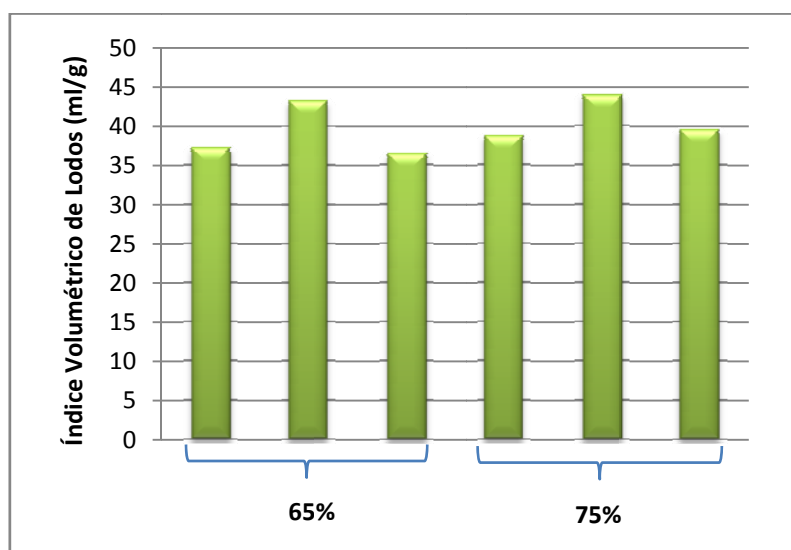


Figura 35. Variación del Índice Volumétrico de Lodos en la etapa final de aclimatación con contenido salino.

Finalmente, se realizaron los análisis de sólidos suspendidos en el afluente, en el efluente y en el licor mezclado, arrojando los resultados que se ilustran en la Figura 36.

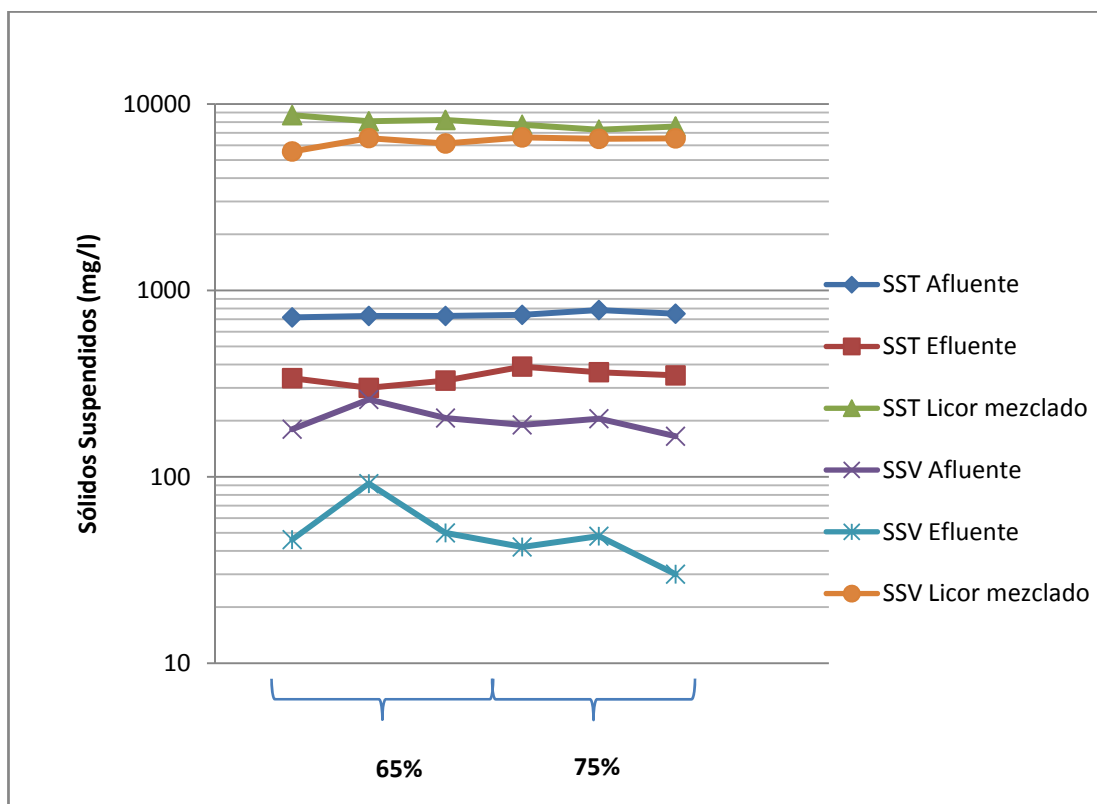


Figura 36. Variación de los Sólidos Suspendidos en la etapa final de aclimatación con contenido salino.

Se puede apreciar como los sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado están en el orden de los 6000 mg/l y operando con un 75% de contenido salino en el agua residual el sistema SBR remueve la materia orgánica biodegradable de forma eficaz superando el 90% de eficiencia.

Optimización de las condiciones de operación del SBR

La optimización del proceso se dividió en dos fases, en la primera se buscaba optimizar los tiempos óptimos de reacción y en la segunda determinar la mínima demanda bioquímica de oxígeno en el afluente capaz de procesar el sistema de manera efectiva.

Para la optimización del tiempo de reacción se establecieron ciclos de 6 horas, variando únicamente el tiempo de la etapa de aireación, es decir, se mantuvieron los 15 minutos de llenado, 30 minutos de vaciado y 1 hora con 15 minutos de sedimentación, cambiando el tiempo de la etapa de aireación de 10 horas a 4 horas. La finalidad era minimizar el tiempo de reacción sin que disminuyera notablemente la eficiencia del proceso. En función a esto Azuaje y Muñoz (2006), lograron comprobar que para el tratamiento de aguas residuales municipales con el sistema SBR, el tiempo óptimo de reacción era de 4 horas, por tal motivo se estableció ese tiempo como prueba.

Se trabajo el SBR durante un período con el nuevo tiempo de reacción para garantizar que se estabilizara, posteriormente se realizaron los análisis de demanda bioquímica de oxígeno en el afluente y en el efluente a fines de calcular la eficiencia del proceso, obteniéndose de esta forma la Figura 37.

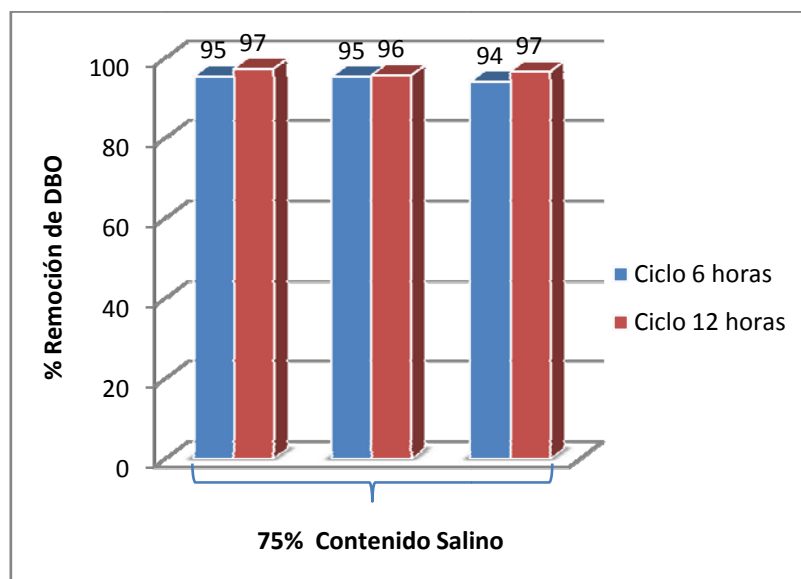


Figura 37. Porcentajes de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para la optimización del tiempo de reacción.

Se observa en la Figura 37 que la eficiencia del proceso se mantenía, permitiendo valores de demanda bioquímica de oxígeno en los efluentes en un rango entre 6 y 9 mg/l, como se puede detallar en la Figura 38.

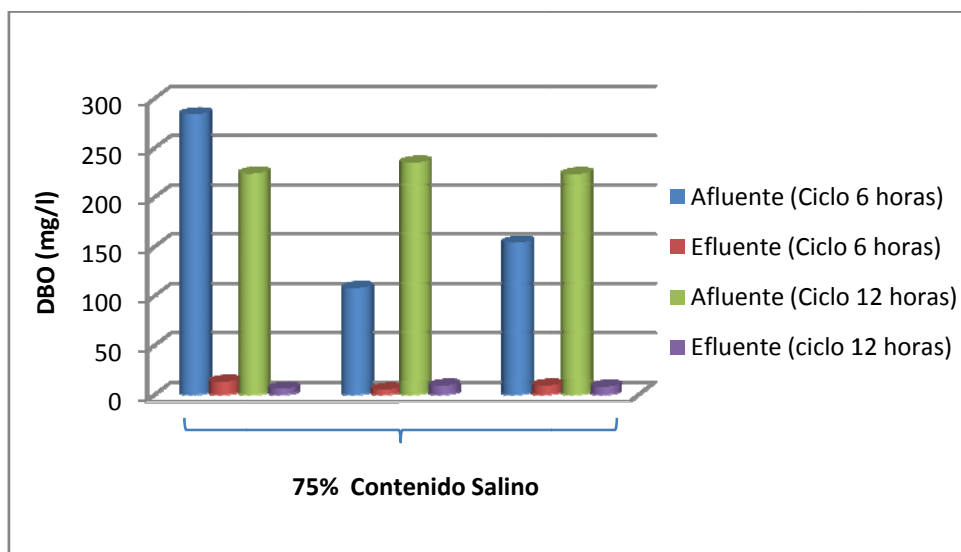


Figura 38. Valores de la $DBO_{5,20}$ para la optimización del tiempo de reacción.

Aunque los cambios en el tiempo de reacción mostraron poca influencia en la eficiencia del proceso, si desmejoraron la calidad de licor de mezcla, obteniéndose una menor cantidad de sólidos sedimentables como se ilustra en la Figura 39. Sin embargo, prevalece el hecho de poder operar el sistema con 4 ciclos al día en vez de 2 ciclos, con una eficiencia por encima del 94% a pesar de que los sólidos sedimentables en el licor mezclado hayan disminuido de 300 ml/l a 238 ml/l en promedio.

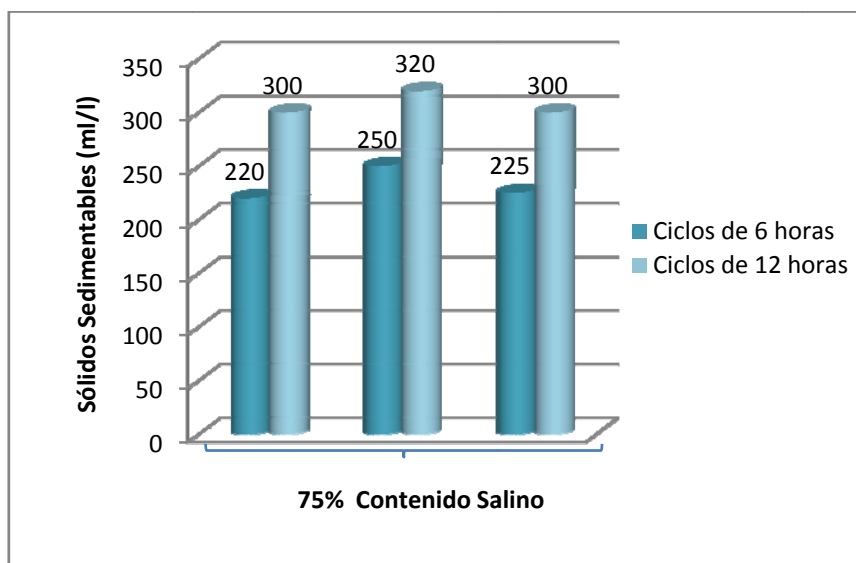


Figura 39. Sólidos Sedimentables en el licor de mezcla para la optimización del tiempo de reacción.

El índice volumétrico de lodos no se vió afectado ante los cambios, manteniéndose en un rango entre 39 y 44 ml/g para ambos tiempos de reacción, como se muestra en la Figura 40. Por lo tanto el IVL no fue concluyente para la optimización de los tiempos pero si se pudo apreciar que el sistema se estabilizó en ese rango operando con agua residual con un 75% de agua de mar y queda demostrado como el sistema SBR se adaptó al medio salino operando con alta carga orgánica. No obstante es un parámetro necesario más no suficiente en la evaluación de este tipo de sistemas, especialmente si se considera la posible interferencia generada por la presencia de las sales en la determinación de los sólidos suspendidos totales.

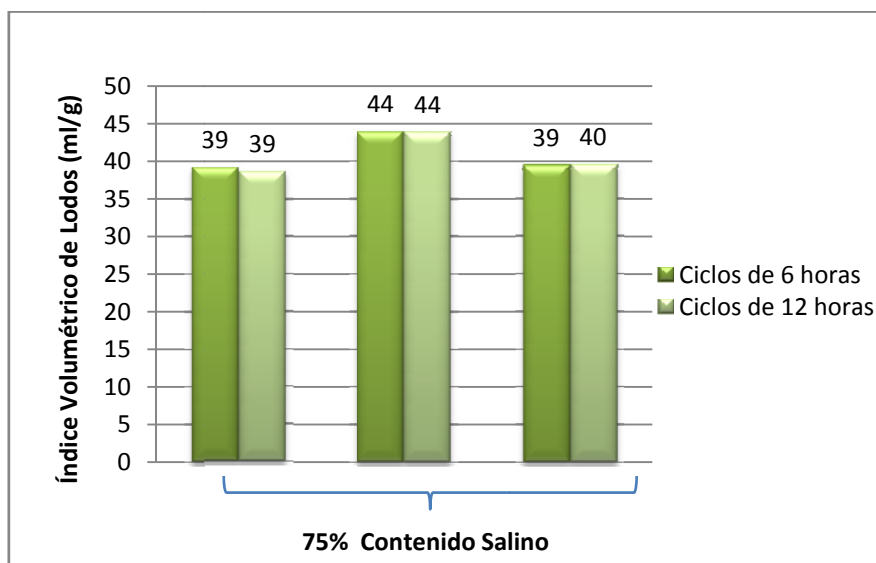


Figura 40. Variación del Índice Volumétrico de Lodos en la optimización del tiempo de reacción.

Posteriormente se operó el sistema variando la carga orgánica en el afluente, lo cual se controló con el aporte de nutrientes que la melaza provee, se simuló aguas residuales con un 75% de agua de mar con alta, media y baja carga orgánica. La finalidad fue determinar la carga orgánica mínima que podía operar el sistema SBR de manera eficiente. Ya que se tenía aclimatada la biomasa para alta carga orgánica se fue disminuyendo la misma gradualmente y caracterizando las cargas a través de análisis de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos sedimentables.

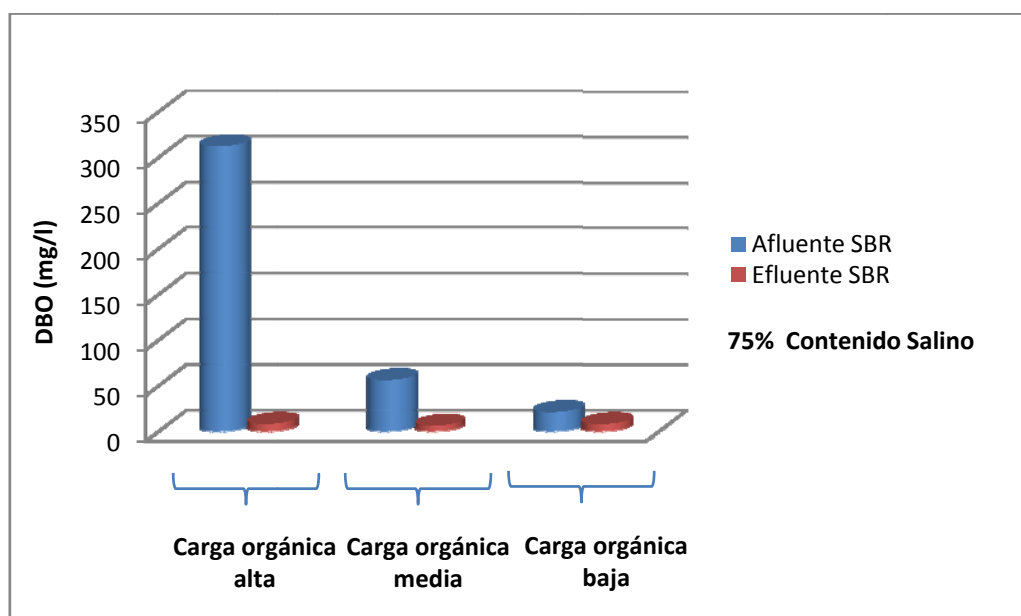


Figura 41. Valores de la $DBO_{5,20}$ para el afluyente y efluente en la optimización de la carga orgánica.

La Figura 41 muestra lo explicado anteriormente, se simularon tres condiciones en los afluentes al sistema SBR a modo de evaluar el comportamiento del mismo. En vista de que Lippo y Lorenzo (2008) no obtuvieron resultados confiables cuando la carga orgánica era muy baja, se quiso delimitar hasta donde el sistema SBR es capaz de tolerar un déficit de materia orgánica en el afluyente operando de manera eficaz.

Con las $DBO_{5,20}$ se determinaron las eficiencias del proceso; los resultados de las eficiencias que se aprecian en la Figura 42, disminuyeron gradualmente y de forma proporcional a la disminución de la carga orgánica, al operarse el sistema con agua residual salina con una carga orgánica alta cuya demanda supera los 300 mg/l, el

resultado de remoción promedio fue 97%, mientras que para un afluente con una carga orgánica media cuya $DBO_{5,20}$ oscilaba alrededor de los 60 mg/l el proceso tuvo una eficiencia del 89% y finalmente se operó con una carga orgánica baja, como las que operaron Lippo y Lorenzo (2008) y el sistema alcanzó una eficiencia del 62%.

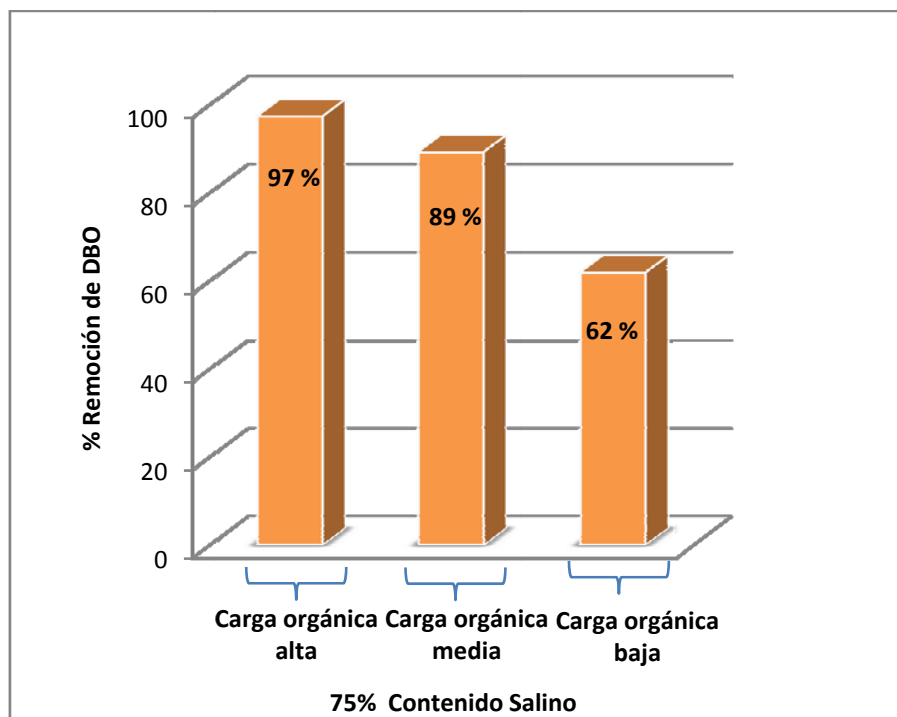


Figura 42. Variación del porcentaje de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ para la optimización de la carga orgánica.

Fue evidente que a medida que el agua residual tuvo menor cantidad de materia orgánica, el sistema desmejoró ante el déficit de nutrientes y en consecuencia disminuyó la eficiencia del proceso. Se demostró que para aguas residuales con una $DBO_{5,20}$ inferiores a los 70 mg/l la eficiencia del proceso se encuentra por debajo del 90%.

Efectividad del sistema de tratamiento SBR para aguas residuales con contenido salino

El sistema de tratamiento de reactor secuencial por cargas (SBR) se puso en marcha y se operó continuamente durante 10 semanas para obtener la generación de biomasa que permitiría la posterior evaluación del sistema. En esta etapa se requirió de un aporte adicional de nutrientes al afluente para obtener una mejor y mayor formación de biomasa. Alcanzada la estabilidad del sistema se procedió a alimentar el mismo con un afluente de agua residual salina con alta carga orgánica simulada en un tanque de mezclado, se fue variando el porcentaje de salinidad en el afluente hasta alcanzar la aclimatación de los microorganismos y se logró operar de forma efectiva el SBR con agua residual con 75% de agua de mar. En ésta etapa de aclimatación se caracterizaron las cargas, obteniéndose los resultados que hicieron posible la evaluación del proceso, entre ellos los de la $DBO_{5,20}$ en función al tiempo, que se muestran en la Figura 43.

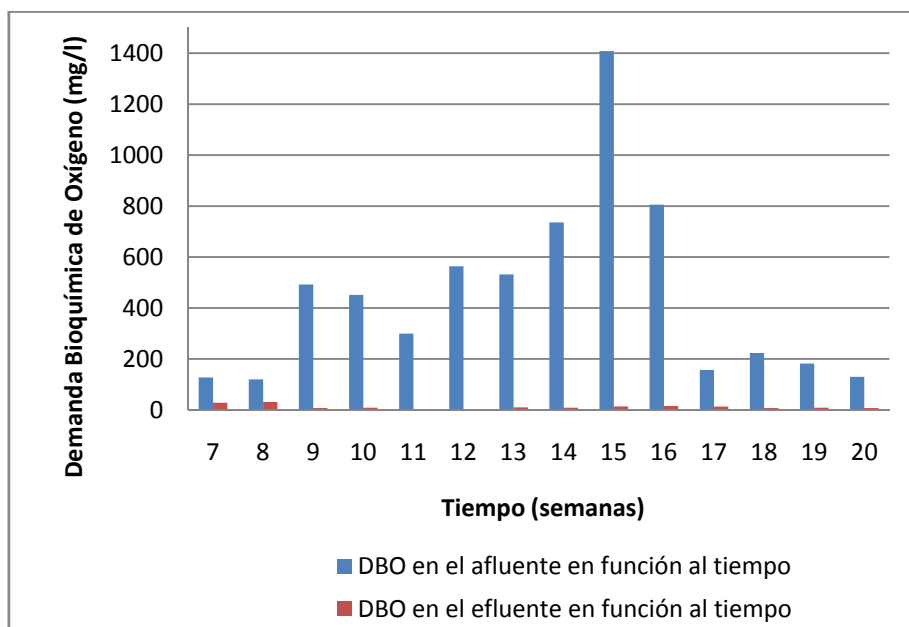


Figura 43. Valores de la DBO_{5,20} en función al tiempo total de operación del sistema.

Los sistemas SBR son capaces de tolerar fluctuaciones de los afluentes como variaciones drásticas en la demanda bioquímica de oxígeno, por ello a pesar de que la DBO_{5,20} fue tan variable en los afluentes y que el incremento del contenido salino provoca efectos adversos, el sistema respondió favorablemente mostrando eficiencias superiores al 90%, como se aprecia en la Figura 44.

El porcentaje de remoción en función a la DBO_{5,20} fue incrementándose en la etapa de generación de biomasa y se estabilizó en un 98% en la semana 10 y a medida que se evaluó el sistema para diferentes porcentajes de salinidad se pudo observar ligeramente afectada la eficiencia. Sin embargo, pese al impacto desfavorable de la

sal en los microorganismos, el sistema logra mantenerse en el rango de eficiencia de remoción de DBO reportado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1999) para los SBR, que generalmente es del 85 al 95 por ciento. Inclusive siempre se mantuvo por encima del 90%, lo cual indica que la biomasa logró una adaptación al medio hipertónico salino.

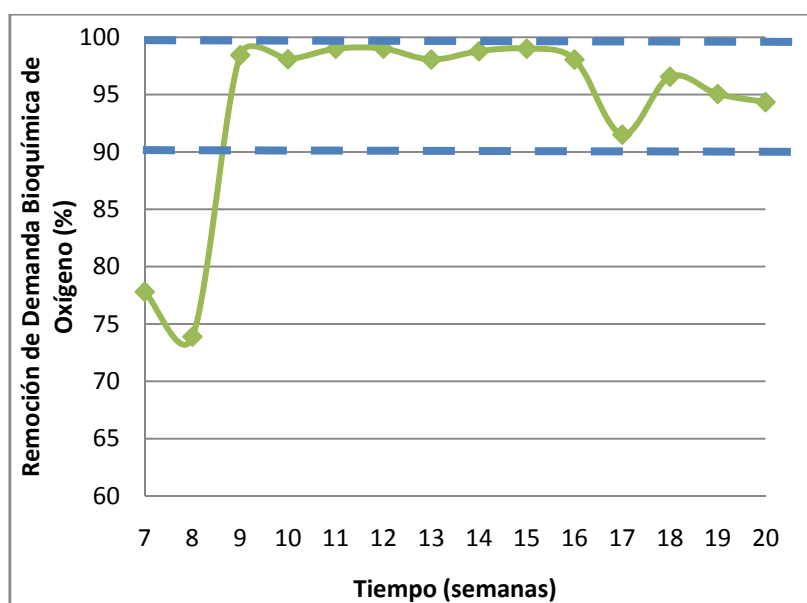


Figura 44. Porcentaje de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ en el tiempo total de operación del sistema.

En la etapa de generación de biomasa y adaptación del sistema se observó el incremento de los sólidos sedimentables en el licor mezclado, hasta alcanzar su valor máximo y estabilizarse en 425 ml/l en la semana 10, posteriormente se aprecia que al iniciar la adición de los contenidos salinos, la concentración de biomasa

disminuyó debido a la pérdida, por fenómenos de turgencia y plasmólisis, de microorganismos que no toleraron la presencia de cloruros, como se observa en la Figura 45.

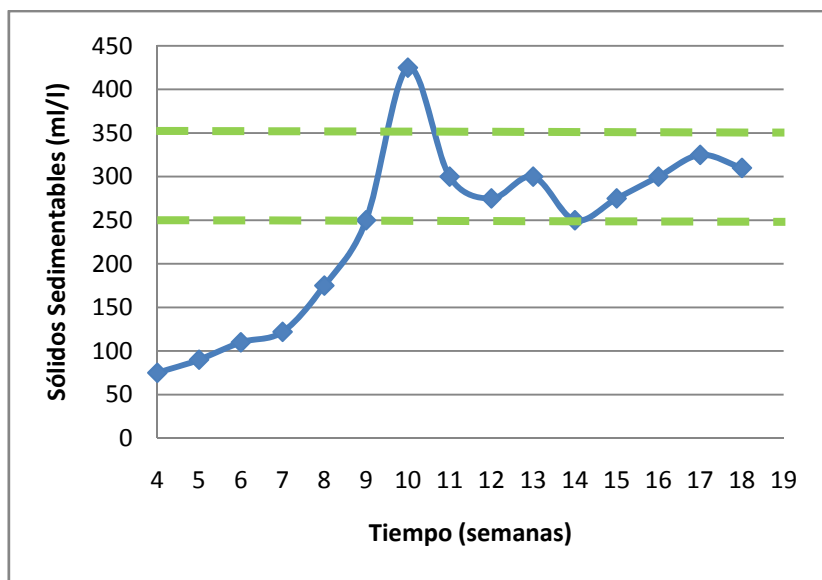


Figura 45. Variación de los sólidos sedimentables en el tiempo total de operación del sistema.

La Figura 46 muestra como los sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla se incrementaban gradualmente a medida que se generaba la biomasa en el sistema SBR hasta alcanzar los 2.600 mg/l cuando se estabilizó el proceso en la etapa final de formación de biomasa. La tendencia se mantuvo al alimentarse los primeros porcentajes de contenido salino lo cual refleja que es posible una adaptación, en vista de que éste análisis es una manera de cuantificar la biomasa dentro del

sistema. Sin embargo, en la etapa final de aclimatación al alimentarse un afluente con un 65% de agua de mar en la semana 17, se evidenció una disminución originada por el grado de salinidad, que perturba el desarrollo celular e inhibe a las células existentes, como consecuencia la biomasa activa encargada de la remoción de materia orgánica decae. No obstante el sistema se adapta a las condiciones y aumentan los sólidos suspendidos volátiles al alimentarse un agua residual con 75% de agua de mar y las fluctuaciones continúan dentro de un rango de 4.000 – 7.000 mg/l, lo cual es producto de la aclimatación al medio salino.

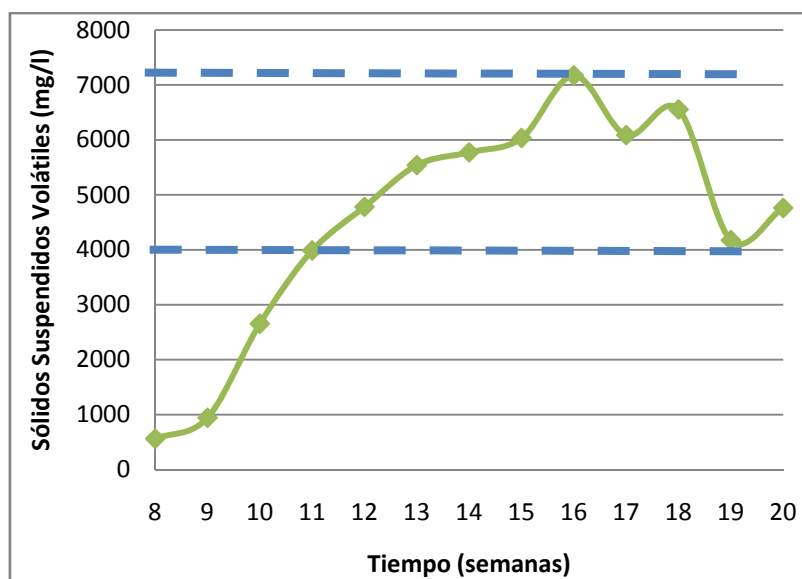


Figura 46. Variación de los Sólidos Suspendidos Volátiles en el licor de mezcla para el tiempo total de operación del sistema.

Finalmente, se analizó la variación del índice volumétrico de lodos a través de la Figura 47.

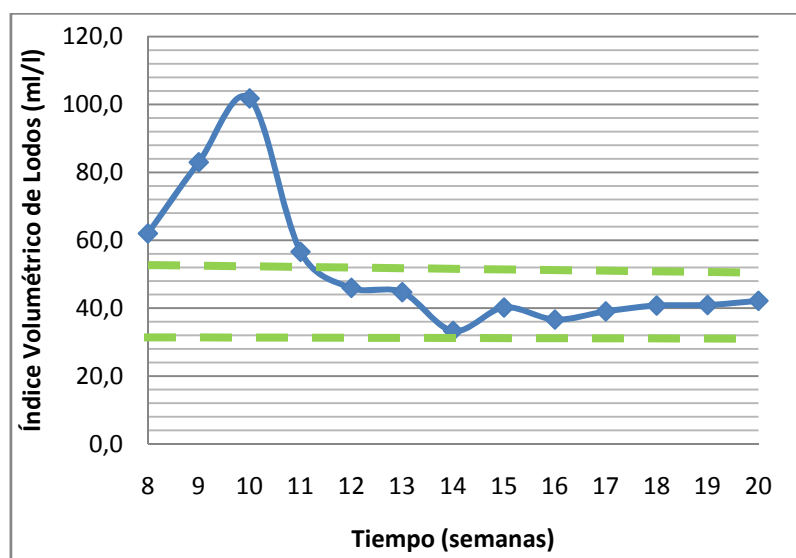


Figura 47. Variación del índice volumétrico de lodos para el tiempo total de operación del sistema.

El índice volumétrico de lodos es una relación entre los sólidos sedimentables y los sólidos suspendidos totales, la cual permite evaluar las características de la sedimentación del lodo activado. Un IVL cuyo valor se encuentre en el orden de 100 ml/l o menor, es indicativo de una buena sedimentación, según lo recomendado por la bibliografía (Metcalf & Eddy, 2003). Como se ilustra en la Figura 47 el índice de lodos para la semana 10, cuando se estabilizó el sistema operando únicamente con agua residual, tenía un valor de 101 mg/l, sin embargo a partir de que se alimentó agua residual salina la tendencia a disminuir fue notable, hasta que se estabilizó el

sistema en un rango de 30 a 45 ml/g. Cabe destacar que éste análisis no es totalmente concluyente con respecto a lo que ocurre en la etapa de sedimentación, debido a la interferencia de las sales en la determinación de los sólidos suspendidos totales.

Sería recomendable promover una evaluación microscópica, mediante microscopía electrónica, de los lodos activados ante la presencia de contenidos salinos a fin de verificar sus características y comportamiento en dichas condiciones.

De esta manera queda demostrado que el sistema de reactor secuencial por cargas es efectivo para el tratamiento de aguas residuales con contenido salino, siempre que las mismas contengan una carga orgánica cuya $DBO_{5,20}$ sea superior a los 70 mg/l y se lleve a cabo un proceso de aclimatación de la biomasa para tolerar el medio salino.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Se logró la generación de alta carga orgánica en el afluente al sistema de reactor biológico secuencial gracias al aporte de nutrientes adicionales proporcionado por la melaza.
- Se generó la biomasa y se estabilizó el sistema operando con agua residual doméstica procedente del Colector Marginal Izquierdo del Río Valle, alcanzando valores de eficiencia hasta del 99% en función de la $DBO_{5,20}$.
- Se logró la adaptación de la biomasa al medio salino, mediante la aclimatación progresiva del sistema, lo cual hizo posible operar el mismo con porcentajes de contenido salino en el agua residual hasta de un 75% en volumen.
- Se demostró la efectividad de los sistemas SBR para tratamientos de aguas residuales domésticas propias de comunidades ubicadas en islas e islotes, obteniendo eficiencias de remoción en términos de $DBO_{5,20}$ de 99%, 98% y 97% para aguas residuales con contenido salino de un 35%, 55% y 75% respectivamente.

- Se optimizó el tiempo de reacción del reactor secuencial por cargas para tratamiento de aguas residuales salinas, en un valor de 4 horas con una duración total del ciclo de 6 horas.
- Se demostró que para aguas residuales con una $DBO_{5,20}$ inferiores a los 70 mg/l la eficiencia del proceso se encuentra por debajo del 90%.
- La evaluación de la remoción de materia orgánica en términos de DQO no fue posible debido a la interferencia de contenidos de cloruros superiores a los 2.000 mg/l en el afluente y efluente.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Realizar una evaluación de las aguas residuales domésticas con contenido salino propias de islas e islotes a modo de compararlas con las aguas residuales simuladas en este estudio.
- Evaluar el sistema SBR para tratamiento de aguas residuales salinas para determinar remoción de fósforo y nitrógeno.
- Realizar análisis de microscopía para evaluar el comportamiento de los lodos bajo efecto de la sal, para verificar si las desmejoras en el proceso se deben a los fenómenos de plasmólisis, turgencia e inhibición celular en los microorganismos.
- Estudiar la influencia de los cloruros en la determinación de la demanda química de oxígeno, cuando superan el límite de 2.000 mg/l, para lograr estudiar el tratamiento de aguas residuales salinas con dicho análisis.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

1. Azuaje E. y Muñoz R. (2006). "Diseño, construcción y evaluación preliminar de un sistema de reactor biológico secuencial a escala". Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

2. Bioquímica Médica. Unidad I, Agua. Consultado el día 23 de junio de 2009 en la World Wide Web:

<http://enceti.blogspot.com/>

3. Biosistemas. Tratamientos de aguas residuales S.A. "Reactores Secuenciales por Cargas (SBR)". Consultado el 15 de agosto de 2009 en la World Wide Web:

<http://www.biosistemas.es/>

4. Bretti J. (2002). "Sistema de tratamiento SBR". Pontificia Universidad Católica Argentina, Argentina.

5. Empresa General Valenciana del Agua S.A. Consultado el día 13 de junio de 2009 en la World Wide Web:

<http://www.egevasa.es/>

6. Crites y Tchobanoglous. (2000). "Sistema de manejos de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados". Mc Graw Hill, Tomo 2, capítulo 7, 397-398.
7. Enviroment Protection Agency. (1999). "Folleto informativo de tecnología de aguas residuales: Reactores secuenciales por tandas". EPA 832-F-99-073 Washington, D.C.
8. Gerardi, Michael H. (2002). "Settleability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process". Wastewater Microbiology Series. Enviromental Protection. Magazine Series.
9. Jaime Miranda. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile Beauchef 850, Casilla 2777. Santiago-Chile. Consultado el día 22 de julio de 2009 en la Worl Wide Web:

<http://cabierta.uchile.cl/revista/6/aguas.htm>
10. Lefebvre O., Quentin S., Torrijos M., Godon J.J, Delgenés J.P. y Moletta R. (2007). "Impact of increasing NaCl concentrations on the performance and community composition of two anaerobic reactors". Enviromental Biotechnology, 75, 61-69.
11. Lorenzo D. and Lippo M. (2008). "Evaluación de un sistema de reactor biológico secuencial a escala piloto para tratamiento de aguas residuales con

contenido salino". Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería UCV. Caracas.

12. Marsilli, A. "Tratamiento de Aguas Residuales". Consultado el día 15 de julio de 2009 en la World Wide Web:

<http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>

13. Metcalf y Eddy. (1977). "Tratamiento y depuración de las aguas residuales." Primera Edición. España: Editorial Labor, S.A.

14. Moon B.H., Seo G.T., Lee T.S., Kim S.S. y Yoon C.H. (2003). "Effects of salt concentration on floc characteristics and pollutants removal efficiencies in treatment of seafood wastewater by SBR". Water Science and Technology, 47, 65-70.

15. Panswad T. y Anan C. (1999). "Impact of high chloride wastewater on an anaerobic/anoxic/aerobic process with and without inoculation of chloride acclimates seeds". Water Science Technology, 33(5), 1165-1172.

16. Rene E.R., Kim S.J. y Park H.S. (2007). "Effect of COD/N ratio and salinity on the performance of sequencing batch reactors". Bioresource Technology, 2007.01.037.

17. Uygun A, Kargi F. (2004). "Salt inhibition on biological nutrient removal from saline wastewater in a sequencing batch reactor". *Enzyme and Microbial Technology*, 34, 313-318.
18. Uygun A. (2006). "Specific nutrient removal rates in saline wastewater treatment using sequencing batch reactor". *Process Biochemistry*, 41, 61-66.

APÉNDICES

APÉNDICE A: Estructura del sistema SBR

A continuación se expone la estructura de sistema SBR operado en el trabajo de grado:

Un reactor de 72 litros de capacidad se encuentra compuesto por vidrios de 6 mm de espesor de pared, dimensiones 40X45X40 cm, lo cual permite la continua visualización del desarrollo de la biomasa.

Seguidamente se tiene todo el equipo de inyección de aire, el cual se encarga de proveer el aire necesario de forma continua para el crecimiento de la biomasa, este se encuentra compuesto por 4 difusores ubicados en el fondo del reactor, cuya disposición es en “X” permitiendo de manera homogénea el esparcir el oxígeno dentro del reactor, dicho sistema de aireación tiene la principal característica de permitir la emisión de aire dentro del equipo mas no la entrada de agua a los difusores, esta es una propiedad conferida por la membrana de celulosa resistente al agua, la que por sí misma es permeable a las burbujas de agua y limita el acceso de agua hacia las tuberías de aire, la cual se encuentra conectada a un compresor de ½ hp y de 110 voltios, lo cual provee el aire a través de la tubería de 3/8”, donde una válvula de paso rápido se encarga de controlar el flujo al sistema.

Para lograr el llenado y vaciado del tanque de reacción, el mismo consta de un grupo de válvulas, específicamente, electroválvulas de 3/8” que ajustan perfectamente a

las tuberías, las mismas son de bronce, con la particularidad que son de tipo on/off, además de poseer la característica de ser de falla cerrada, lo que permite el correcto crecimiento de la biomasa ante irregularidades en el proceso.

Para el traslado de flujos de agua del tanque de mezclado al reactor, así como vaciado del mismo, se utilizaran mangueras transparentes de 3/8", así mismo dichas mangueras también se encuentran conectadas a las electroválvulas, no obstante el sistema se puede ver afectado por la existencia de elementos físicos que disminuyan la eficiencia de proceso, para corregir este problema, se colocaron en las terminales de entrada y salida al reactor, terminales con mallas que de manera eficiente evitan el acceso de sólidos a las electroválvulas y mantiene el correcto funcionamiento de las mismas.

Las electroválvulas se encuentran sujetas a la acción de un temporizador, que gracias al uso de los elementos de control, rigen el correcto vaciado y llenado del reactor, siendo el tiempo esencial para el desarrollo de la biomasa, se tiene que el tiempo para el vaciado del reactor es de 30 minutos, lo que permitirá con seguridad, eliminar una alta porción del sobrenadante y mantener el nivel de la biomasa formada en el reactor.

El sistema eléctrico y el equipo de control están ubicados convenientemente en el frontal del reactor, los cuales rigen paso a paso cada uno de los procesos de vaciado y llenado del mismo, además del proceso de mezclado, todo esto perfectamente coordinado por el temporizador, todo el sistema se encuentra en una caja con

seguridad, cada uno de los controladores son marca CAMSCO, con una continua medición de 15 minutos.

Se desea un constante control del contenido salino, el contenido de melaza y agua del Colector Marginal Izquierdo del Río Valle para ser alimentado al reactor, por tanto, se tiene que realizar un premezclado, el cual ocurrirá en el tanque de mezcla previa al reactor, por tanto, la entrada de cada uno de los compuestos a dicho equipo será controlado por el PLC. Entre tanto una bomba anexa al tanque de mezclado se encargará de mantener la mezcla homogénea, a fin de alimentar en correctas proporciones las concentraciones de los reactivos, manteniéndose así las 24 horas al día.

Tanto el tanque de almacenamiento de agua de mar como el tanque de mezclado, poseen bombas sumergibles que aseguran el flujo oportuno gracias a las tuberías plásticas que proveen amplia durabilidad, resistencia, cómoda manipulación y evitan la corrosión, lo que permitirá el traslado eficaz y eficiente de cada uno de los flujos de corriente de entrada encargándose de permanecer el tiempo necesario para la reacción y salida al reactor.

APÉNDICE B: Cálculos tipo

Parámetros físico-químicos

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_{5,20}):**

$$DBO_{5,20} = \frac{(OD_b - OD_m) \cdot V_{total}}{V_m}$$

Donde:

OD_b: Oxígeno disuelto del blanco finalizado el período de incubación, mg/l.

OD_m: Oxígeno disuelto de la muestra finalizado el período de incubación, mg/l.

V_{total}: Volumen total de la botella de siembra, ml.

V_m: Volumen de la muestra sembrada, ml.

Para el afluente del SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$DBO_{5,20} = \frac{(6,6 - 1,1) \cdot 300}{5} = 330 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos No Filtrables Totales o Suspendidos Totales (T=103°C):**

$$S_{ST} = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} \times 10^6$$

Donde:

S_{ST} : Sólidos disueltos totales de la muestra, mg/l.

m_f : Peso final de la cápsula y residuos de la muestra, g.

m_i : Peso inicial de la cápsula, g.

V_m : Volumen de muestra ml

Para el licor de mezcla con 35% de contenido salino, se tiene:

$$S_{ST} = \frac{(0,1684 - 0,1335)}{5} \times 10^6 = 6.984 \text{ mg / l}$$

• **Sólidos No Filtrables Volátiles o Suspendidos Volátiles:**

$$S_{SV} = \frac{(m_i - m_f)}{V_m} \times 10^6$$

Donde:

S_{SV} : Sólidos disueltos volátiles totales de la muestra, mg/l.

mf: Peso final de la cápsula y residuos de la muestra pasada por la mufla, g.

mi: Peso inicial de la cápsula y residuos de la muestra pasada por la estufa, g.

V_m : Volumen de muestra ml

Para el licor de mezcla con 35% de contenido salino, se tiene:

$$S_{ST} = \frac{(0,1684 - 0,1378)}{5} \times 10^6 = 6.120 \text{ mg / l}$$

Eficiencia del Proceso

- **Eficiencia del Proceso en términos de $DBO_{5,20}$:**

$$\% \text{Remoción } (DBO_{5,20}) = \frac{(DBO_o - DBO_e)}{DBO_o} \times 100$$

Donde:

% Remoción ($DBO_{5,20}$): Porcentaje de Remoción en términos de DBO, %.

DBO_o : $DBO_{5,20}$ de entrada al sistema, mg/l.

DBO_e : $DBO_{5,20}$ de salida al sistema, mg/l.

Para el sistema SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$\% \text{ Remoción}(DBO_{5,20}) = \frac{(327 - 2)}{327} \times 100 = 99\%$$

• **Eficiencia del Proceso en términos de DQO:**

$$\% \text{ Remoción } (DQO) = \frac{(DQO_o - DQO_e)}{DQO_o} \times 100$$

Donde:

% Remoción (DQO): Porcentaje de Remoción en términos de DQO, %.

DQO_o: DQO de entrada al sistema, mg/l.

DQO_e: DQO de salida al sistema, mg/l.

Para el sistema SBR en la etapa de estabilización, se tiene:

$$\% \text{ Remoción}(DQO) = \frac{(345 - 33)}{33} \times 100 = 90\%$$

Índice Volumétrico de Lodos

$$IVL = \frac{V_{ss} * 10^3}{V_{SST}}$$

Donde:

IVL: Índice Volumétrico de Lodos, mL/g.

V_{ss}: Volumen de Sólidos Sedimentables, mL/L.

V_{SST}: Volumen de Sólidos Suspendidos Totales, mg/L.

Para el licor de mezcla con 25% de contenido salino, se tiene:

$$IVL = \frac{400 * 10^3}{3880} = 103 mL / g$$

APÉNDICE C: Etapa de generación de biomasa y estabilización del sistema.

Tabla 2. Análisis para comprobar la estabilidad del sistema en la etapa intermedia de generación de biomasa.

Muestra	16/07/2009		17/07/2009		18/07/2009		Promedio	
	DBO	% REMOCIÓN	DBO	% REMOCIÓN	DBO	% REMOCIÓN	DBO	% Remoción
Entrada	116	76	132	84	135	73	128	78
Salida	28		20		37		28	

Tabla 3. Análisis para evaluar el sistema en la etapa intermedia de generación de biomasa.

Análisis	22/07/2009			23/07/2009			24/07/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	115	30	74	116	30	74	129	34	75
OD (mg/l)	Lodo			Lodo			Lodo		
	6,5			6,9			6,3		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mez	Entrada	Salida	Licor mez	Entrada	Salida	Licor mez
	86	26	1960	98	28	1980	96	22	1980
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mez	Entrada	Salida	Licor mez	Entrada	Salida	Licor mez
	60	20	1660	86	22	1240	72	16	1340
SSF (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mez	Entrada	Salida	Licor mez	Entrada	Salida	Licor mez
	26	6	300	12	6	740	24	6	640
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	200			150			175		
IVL(ml/g)	61			63			62		

Tabla 4. Análisis para comprobar la estabilidad del sistema en la etapa final de generación de biomasa.

Muestra	29/07/2009		30/07/2009		31/07/2009	
	DBO	% Remoción	DBO	% Remoción	DBO	% Remoción
Entrada	520	98	495	99	462	98
Salida	8		7		8	

Tabla 5. Análisis para evaluar el sistema en la etapa final de generación de biomasa.

Análisis	06/08/2009			12/08/2009			13/08/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	442	18	96	585	6	99	327	2	99
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	1			3			4		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	234	60	3780	200	62	4660	214	60	3880
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	178	48	2640	162	40	2500	162	44	2820
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	400			450			400		
IVL (ml/g)	106			97			103		

APÉNDICE D: Etapa de aclimatación del sistema al medio salino

Tabla 6. Análisis para evaluar el sistema para el 1,4% de contenido salino.

Análisis	19/08/2009			20/08/2009			21/08/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	300	3	99	223	2	99	375	4	99
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	1			1			2		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	238	72	5360	240	72	5400	228	64	5500
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	156	30	3880	144	34	3920	172	36	4160
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	320			300			300		
IVL (ml/g)	60			56			55		

Tabla 7. Análisis para evaluar el sistema para el 7% de contenido salino.

Análisis	26/08/2009			27/08/2009			28/08/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	518	2	99	683	3	99	490	3	99
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	1			2			1		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	256	78	6000	252	78	6020	232	72	5920
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	182	54	4620	168	60	5020	148	56	4700
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	275			275			275		
IVL (ml/g)	46			46			46		

Tabla 8. Análisis para evaluar el sistema para el 21% de contenido salino.

Análisis	03/09/2009			04/09/2009			07/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	585	9	98	623	15	98	387	7	98
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	0,5			1			1		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	268	72	6780	260	36	6580	248	48	6780
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	222	52	5720	158	12	5360	142	24	5540
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	300			300			300		
IVL (ml/g)	44			46			44		

Tabla 9. Análisis para evaluar el sistema para el 35% de contenido salino.

Análisis	10/09/2009			11/09/2009			11/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	848	8	99	663	9	99	697	10	99
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	1,8			1,8			2		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	316	74	6980	352	52	7420	342	86	7220
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	92	14	6120	74	16	5340	104	14	5860
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	220			250			250		
IVL (ml/g)	32			34			35		

Tabla 10. Análisis para evaluar el sistema para el 45% de contenido salino.

Análisis	13/09/2009			13/09/2009			14/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	1440	15	99	1395	13	99	1390	14	99
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	1,6			1,6			1,7		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	550	92	6280	420	186	7400	393	140	6940
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	400	64	5420	335	74	6700	325	56	5980
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	275			275			275		
IVL (ml/g)	44			37			40		

Tabla 11. Análisis para evaluar el sistema para el 55% de contenido salino.

Análisis	16/09/2009			18/09/2009			19/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	537	17	97	1120	18	98	760	12	98
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	1,7			1,5			1,9		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	563	212	8360	500	246	7640	510	208	7960
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	113	18	7320	263	96	6940	110	28	7260
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	275			300			300		
IVL (ml/g)	33			39			38		

Tabla 12. Análisis para evaluar el sistema para el 65% de contenido salino.

Análisis	24/09/2009			25/09/2009			25/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	153	9	94	144	17	88	174	14	92
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	2,2			2,4			2		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	717	338	8720	730	300	8080	730	328	8220
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	180	46	5560	260	92	6560	207	50	6140
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	325			350			300		
IVL (ml/g)	37			43			36		

Tabla 13. Análisis para evaluar el sistema para el 75% de contenido salino.

Análisis	26/09/2009			26/09/2009			27/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	224	6	97	211	9	96	235	8	97
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	2,2			1,9			2		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	740	390	7740	785	364	7280	750	350	7580
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	190	42	6620	205	48	6500	165	30	6540
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	300			320			300		
IVL (ml/g)	39			44			40		

APÉNDICE E: Etapa de optimización del sistema

Tabla 14. Análisis para la optimización del tiempo de reacción.

Análisis	30/09/2009			30/09/2009			01/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	284	13	95	108	5	95	154	9	94
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	3,4			2,8			3		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	430	186	5600	440	126	5680	430	190	5700
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	220	38	4140	170	30	4040	215	38	4340
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	220			250			225		
IVL (ml/g)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	39			44			39		

Tabla 15. Análisis para la optimización de la carga orgánica.

Análisis	03/09/2009			06/09/2009			09/09/2009		
DBO (mg/l)	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción	Entrada	Salida	% Remoción
	312	8	97	56	6	89	21	8	62
OD (mg/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
				0,5			0,5		
SST (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	255	176	5360	620	90	5620	900	146	7120
SSV (mg/l)	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado	Entrada	Salida	Licor mezclado
	195	82	4420	160	64	4160	220	70	5700
SS (ml/l)	Licor mezclado			Licor mezclado			Licor mezclado		
	270			250			225		
IVL (ml/g)	50			44			32		

APÉNDICE F: Normas estandarizadas

Las normas estandarizadas utilizadas en el desarrollo experimental del presente Trabajo Especial de Grado se rigen por normativas establecidas por :

- American Public Health Association (APHA)
- American Water Works Association (AWWA)
- Water Pollution Control Federation (WPCF)

Las cuales fueron tomadas del “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”. 17 Edición. 1989. En la Tabla 16 se tabularon los códigos de los análisis realizados a nivel de laboratorio.

Tabla 16. Códigos de las normas estandarizadas empleadas para la realización de análisis del “*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*”

Análisis	Métodos	Códigos
Conductividad	Método de laboratorio	2510 B
Salinidad	Método de conductividad eléctrica	2520 B
pH	Método electrométrico	4500-H ⁺ B
DBO_{5,20}	Incubación en botellas por 5 días	5210 B
DQO	Reflujo Cerrado Método Colorimétrico	5220 D
Sólidos	Diversos	2540 A, B, C, D, E, F y G

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

APHA: American Public Health Association.

AWWA: American Water Works Association.

CEPCI: Chemical Engineering Plant Cost Index.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno, mg/l.

DQO: Demanda Química de Oxígeno, mg/l.

EPA: Agencia de Protección Ambiental.

F/M: relación alimento a microorganismo, d-1.

IVL: índice de lodos, mg/l.

MGD: millones de galones por día.

SSLM: sólidos suspendidos en el licor mezclado, mg/l.

SSVLM: sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado, mg/l.

PETA: Planta Experimental de Tratamiento de Aguas.

SBR: reactor secuencial por cargas.

SST: sólidos suspendidos totales, mg/l.

TRH: tiempo de retención hidráulica, h.

WPCF: Water Pollution Control Federation.