



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

FACULTAD REGIONAL TUCUMAN

ESCUELA DE POSGRADO



DEFENSA DE TESIS MAGISTER EN INGENIERIA AMBIENTAL

"TRATAMIENTO AERÓBICO DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS
GENERADOS EN LA INDUSTRIA CITRÍCOLA EN LA PROVINCIA DE
TUCUMÁN"

Maestrando: Ing. Franco Davolio

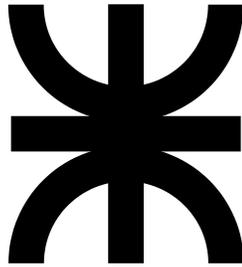
Director: Mg. Oscar Graieb

06 de marzo de 2014 - 19.00 hs

Aula Nº 1 - Esc. de Posgrado



Maestría en Ingeniería Ambiental



Facultad Regional Tucumán
Universidad Tecnológica Nacional

**Tesis: “Tratamiento Aeróbico de los Efluentes
Líquidos generados en la Industria Citrícola en la
Provincia de Tucumán”**

Tesista: Ingeniero Franco Davolio

Director de Tesis: Mag. Ingeniero Oscar Julio Graieb

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería
Ambiental

Tucumán - Argentina

2013

**“Tratamiento Aeróbico de los Efluentes Líquidos
generados en la Industria Citrícola en la
Provincia de Tucumán”**

Tesista: Ingeniero Franco Davolio

Director de Tesis: Magister Ingeniero Oscar Julio Graieb

Dedicado:

A mi esposa, Dory, por su permanente apoyo, por su comprensión y ayuda en los momentos donde alguna dificultad se interponía en la continuidad del trabajo.

Al recuerdo de quien fuera mi Profesor y Maestro, el Doctor Miguel Katz, quien me enseñara y guiara en mis primeros pasos en el campo de la Docencia y de la Investigación en el ámbito de la Universidad y que me impulsó a ser perseverante hasta lograr el objetivo propuesto.

Agradecimientos

Algunos amigos me preguntaron el porqué de continuar estudiando e investigando para obtener un título más en mi carrera, encontrándome al final del ejercicio de mi actividad tanto como docente como de investigador, labores que ejercí durante 47 años ininterrumpidos.

Suelo definir que “Un Proyecto de Investigación es la puesta en marcha de las capacidades personales, impulsadas en el sentido de concretar una idea”.

Por ello la vida se presenta como un permanente desafío, cada año en una determinada fecha festejamos nuestro cumpleaños y comenzamos a recorrer un nuevo período, sin saber si llegaremos al final del mismo o en el proceso se detendrá nuestro reloj y con él se paralizarán la concreción de las ideas.

De lo que estoy convencido es que hay que continuar dicho desafío y hacer cada día algo nuevo, aún cuando no estemos seguros de si lo vamos a poder concluir con éxito y vamos a lograr los resultados finales deseados.

Este trabajo está vinculada con el tema donde he trabajado desde los comienzos de mi carrera profesional: el Ambiente, me apasiona, con toda seguridad es y será el que me motivará y me seguirá impulsando a permanecer en él.

Con esta presentación estoy concluyendo una etapa que oportunamente me impuse, pero como continuidad ya tengo otras ideas y otros proyectos que deseo realizar y donde, en cada uno de ellos, con seguridad voy a encontrar algo nuevo y atractivo.

A los ahora mis nuevos colegas: el Ingeniero Héctor Ariel Viera y la Ingeniera Leda Gabriela Ardiles y a la estudiante avanzada de Ingeniería Química Rosa María Mena Zolórzano, por haber aceptado la idea de trabajar en este tema, por el tiempo invertido y por la dedicación en realizar las operaciones de laboratorio, con las cuales se obtuvieron los datos de la parte experimental del proceso aeróbico a escala piloto.

Al Magister Ingeniero Oscar Julio Graieb, quien aceptó el desafío de ser mi tutor para guiarme, pero además por impulsarme e insistir permanentemente para concluir y presentar esta tesis.

A la Magister Ingeniera María Patricia Albarracín y a la Doctora Ingeniera Norma Barnes por su contribución, dado que, con total desinterés, me brindaron su asesoramiento y sus sugerencias de cómo realizar y ordenar partes de la presentación.

Al Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial de la FACET de la UNT, en el cual, en su momento, me formé y gradué y donde posteriormente me desempeñé como docente e investigador durante todo el período de tiempo indicado y en cuyo ámbito, en el Laboratorio de Química General e Inorgánica, se realizó el montaje del equipo y se efectuaron las corridas experimentales necesarias para obtener los resultados que se vuelcan en la presente.

A la Facultad Regional Tucumán de la UTN, donde, en diferentes períodos, he recibido toda la formación que hace a mis especializaciones de posgrado, institución en la cual también me he desempeñado como docente e investigador y que me ha brindado hoy la oportunidad de exponer este trabajo.

A la estudiante de Ingeniería en Sistemas de Información, Señorita Tania Soledad Silvina Vargas, por su aporte con conocimientos en computación que fueron los que empleó en la preparación de las expresiones matemáticas, de las tablas y de las gráficas que corresponden a los valores obtenidos experimentalmente.

Un especial reconocimiento al Jurado: Dra. Ing. Dora Paz, Dr. Ing. Ricardo Ferrari y Dr. Ing. Rubén Fernández, todos ellos designados para evaluar esta, mi tesis, por los llamados de atención previos y el trabajo constructivo, todo ello realizado para ayudarme a mejorar la presentación de la misma, antes de su exposición final.

A todos aquellos colegas, amigos y a toda otra persona, que de una u otra forma me ayudaron y me apoyaron, para continuar, no desfallecer y completar este importante objetivo.

A Todos: MUCHAS GRACIAS.

INDICE TEMÁTICO

Contenido	Página
Carátula	2
Dedicatoria	4
Agradecimientos	5
Índice Temático	7
Índice de Fotos	8
Índice de Tablas y Gráficas	10
Índice de Figuras	11
Introducción	12
Capítulo I: La Problemática Ambiental	14
1.1 El Ambiente	14
1.2 El interés internacional hacia el Ambiente	15
1.3 El Hombre y la problemática ambiental	16
1.4 La problemática ambiental en la Provincia de Tucumán	17
1.5 El desarrollo agroindustrial en la Provincia de Tucumán	22
1.6 El clima y la producción agroindustrial en la Provincia	24
1.7 La contaminación hídrica	25
1.8 Referencias Bibliográficas del Capítulo	27
Capítulo II: Procesos anaeróbicos y aeróbicos	30
2.1 El consumo de Oxígeno en el metabolismo de los microorganismos	30
2.2 El proceso aeróbico y el consumo de Oxígeno	31
2.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo	38
Capítulo III: Tratamiento de efluentes de cítricos	40
3.1 Objetivo del Trabajo: el tratamiento de los efluentes de una cítrica	40
3.2 Procesos aeróbicos para el tratamiento de efluentes	40
3.3 Metabolismo del sistema microbiológico	45
3.4 Referencias Bibliográficas del Capítulo	47
Capítulo IV: El tratamiento por barros activados	48
4.1 Etapas de un proceso de barros activados	48
4.2 Secuencia operativa de un proceso de tratamiento de los efluentes de una cítrica.	49
4.3 Objetivo: El tratamiento aeróbico de los efluentes de una cítrica	50
4.4 Referencias Bibliográficas del Capítulo	50

Capítulo V: Los efluentes de una citrícola	51
5.1 Caracterización de los efluentes de una citrícola	51
5.2 Secuencia operativa en el tratamiento de efluentes de una citrícola	51
5.3 El reactor aireado	54
5.4 El sedimentador secundario	54
5.5 Materiales y método del diseño del tratamiento a escala piloto	55
5.6 Referencias Bibliográficas del Capítulo	58
Capítulo VI: Funcionamiento del sistema	60
6.1 Condiciones operativas necesarias en el proceso de barros activados	60
6.2 Referencias Bibliográficas del Capítulo	64
Capítulo VII: Los parámetros de diseño	65
7.1 El reactor aeróbico elemento principal del proceso	65
7.2 Obtención experimental de los parámetros de diseño	66
7.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo	72
Capítulo VIII: Cálculo del sistema	74
8.1 Aireadores y Transferencia de Oxígeno	74
8.2 Dimensionado del Sistema	74
8.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo	82
Capítulo IX: El proceso de sedimentación	81
9.1 El sedimentador secundario	81
9.2 Ensayos de sedimentación y cálculos	81
9.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo	88
Capítulo X:	89
10.1 Conclusiones	89
10.2 Recomendación de una posible línea de trabajo	91

Índice de Fotos:

• Foto 1: Producción de biogás y tanque de almacenaje en hormigón.	30
• Foto 2: Producción de biogás y almacenaje sobre terreno con cubierta	31
• Foto 3: Reactor biológico de barros activados con aireador superficial	41
• Foto 4: Burbujeo de aire mediante aireadores de fondo	41
• Foto 5: Sedimentador rectangular con sistema de arrastre de barros	43
• Foto 6: Sedimentador circular con raspadores de fondo y cono inferior	44
• Foto 7: Sedimentador circular en funcionamiento	44
• Foto 8: Playa de secado de barros del fondo del sedimentador secundario	45
• Foto 9: Efluente característico de una citrícola en Tucumán	48
• Foto 10: Canal de conducción de los efluentes de una citrícola para riego	52
• Foto 11: Encalado efluente y cambio de color progresivo por el contacto con cal en la cámara de mezcla y homogenización.	53
• Foto 12: Tamiz rotativo para separación de la materia orgánica de muy lenta biodegradabilidad.	53
• Foto 13: Separación de la materia orgánica	56
• Foto 14: Efluente filtrado en laboratorio	57
• Foto 15: Compresor y sistema de regulación del caudal de aire	58
• Foto 16: Extracción de efluentes cloacales	60
• Foto 17: Mezcla de efluentes de citrícola y de cloacales para aclimatación	61
• Foto 18: Floc de microorganismos y filamentos al microscopio	63
• Foto 19: Vista de reactores piloto aireados con burbujeadores de fondo	65
• Foto 20: Reactores pilotos en prueba de mezclado con trazador	66
• Foto 21: Ensayo en blanco con instalación completa en funcionamiento	67
• Foto 22: Instalación piloto completa en funcionamiento con efluente.	68
• Foto 23: Instalación piloto con control de encalado y cambio color	69
• Foto 24: Control de parámetros en los reactores operando con efluente	70
• Foto 25: Aparato armado para determinación de DQO	71
• Foto 26: Área de oxigenación cubierta por un aireador superficial	81
• Foto 26-27: Ensayo para el control del tiempo de sedimentación	84
• Foto 28-29: Ensayo para el control del tiempo de sedimentación	85
• Foto 30: Sedimentador secundario circular funcionando	87

Índice de Tablas y Gráficas:

• Tabla 1: Tipificación de los efluentes de una citrícola	50
• Tabla 2: Frecuencia en la medición de parámetros	70
• Tabla 3: Valores medios de las corridas con reactores en paralelo	71
• Tabla 4: Variación de la concentración en función del tiempo	76
• Tabla 5: Logaritmos	76
• Gráfica 1: $C_e = f(t)$	77
• Gráfica 2: $\Delta C = f(t)$	77
• Gráfica 3: $\ln C_e / C_0 = f(t)$	78
• Tabla 6: Aireadores AS Coutex	79
• Tabla 7: Sedimentación $h = f(t)$	86
• Gráfica 4: Experimental. h columna de sedimentación en cm en $f(t)$ en minutos	86

Índice de Figuras:

• Mapa Hidrológico de la Provincia de Tucumán	18
• Mapa hidrológico de la Provincia de Tucumán: ríos principales	19
• Evolución de la producción tucumana de limón fresco	22
• Sectores de alta contaminación del Río Salí	25
• Curva de abatimiento de la DBO	33
• Curva de variación de la DBO = f(T)	36
• Secuencia operativa del proceso de tratamiento por barros activados	48
• Esquema de proceso de barros activados a escala piloto	54
• Sistema para aclimatación de microorganismos	69

Resumen.

El tratamiento de los efluentes industriales suele representar para los técnicos y especialistas un importante desafío tecnológico, por cuanto la diversidad de los mismos requiere de un estudio de caracterización y del diseño de un sistema particular en cada caso.

Se ha estudiado el tratamiento aeróbico sobre muestras reales de efluentes crudos extraídos en diferentes cítricos dedicadas a la exportación de limones frescos, como así también a la industrialización de este cítrus.

Posteriormente a la caracterización de los mismos, se determinaron las pautas de trabajo: posibles métodos de tratamiento aeróbico, sistemas con aireación continua, separación previa de las partículas gruesas de difícil biodegradación en suspensión, recirculación parcial de barros desde el sedimentador secundario manteniendo una concentración constante en el bioreactor.

Debe destacarse que no se han encontrado referencias con respecto a la metodología propuesta: o sea el empleo de un proceso aeróbico para efluentes de un cítrico, por ello la relevancia de los resultados obtenidos.

Los resultados logrados a escala piloto son satisfactorios, del estudio de la DBO del afluente y del efluente del reactor aeróbico, se ha observado una reducción de la carga orgánica superior al 95%, en un proceso que se produce sin desprendimiento de olores, previa clarificación del líquido tratado por sedimentación, en un tiempo razonablemente corto.

Capítulo I: Introducción a la Problemática Ambiental

1.1 El Ambiente.

Podemos definir: “El ambiente es el entorno vital constituido por el conjunto de los elementos físicos, biológicos, económicos, sociales, estéticos y culturales que interactúan entre sí, con el individuo y con la comunidad en que vive, determinando caracteres particulares que determinan la forma de supervivencia del hombre”. Davolio (1997).

El ambiente está constituido por un conjunto de variables o factores ambientales que caracterizan un determinado entorno, donde están incluidos:

- el hombre
- la fauna y la flora autóctona
- el suelo, el agua y el aire
- el clima y el paisaje
- los bienes materiales naturales y los antropológicos
- el patrimonio genético y cultural
- todas las interacciones que puedan considerarse entre los factores citados.

Considerando a las variables y factores que interactúan y que hemos indicado, queda en claro que el ambiente es entonces la base, en función de la cual el hombre obtiene:

- sus recursos naturales
- realiza todas las actividades naturales o artificiales antropológicas y
- descarga todos los desechos y residuos resultantes. Davolio (1997).

A pesar de la importancia que tiene el ambiente para la supervivencia del hombre, es justamente este que, en forma consciente o inconsciente, se transforma en su principal agresor, explota a los recursos naturales renovables por encima de su capacidad de reposición, emplea el territorio descargando en el productos no naturales por encima de la capacidad de asimilación de este. Davolio (1997).

O sea el hombre en lugar de realizar un uso racional y equilibrado de los recursos que la naturaleza ofrece, lo que sería un “desarrollo sustentable”, sobrexige y agota el sistema con procesos que en muchos casos se tornan irreversibles y también incontrolables en sus consecuencias negativas. Henry & Heinke (1999).

1.2 El interés internacional hacia el Ambiente.

Las naciones tecnológicamente avanzadas han sido las primeras en sufrir en carne propia los efectos emergentes de su falta de responsabilidad en su trato con el ambiente y es justamente por ello que, habiendo conocido los efectos negativos de su accionar han debido preocuparse y en muchos casos priorizar todo lo relativo al tema ambiental en pos de su propia salud económica y social. Davolio y otro (1991).

Los temas ambientales en general y en particular todo lo referente al agua, al aire y al suelo, son en la actualidad temas tratados en profundidad, con mucha preocupación y son objeto de foros a nivel internacional para tratar y revertir en lo posible problemas ya generados.

La formación de recursos humanos especializados y el desarrollo de tecnologías específicas incluye ahora no solamente las localizaciones poblacionales e industriales, sino también todo lo referido al ambiente en general: agua, aire, suelo, flora, fauna, etcétera, tratándose en todos los casos de respetar un ordenamiento territorial compatible con lograr de la mejor forma posible un equilibrio entre el hombre y sus actividades y la naturaleza que constituye su propio entorno y hábitat. Henry & Heinke (1999).

La calidad de vida de los seres humanos está directamente vinculada con el ambiente natural que constituye su entorno próximo, si este se altera negativamente es inevitable que se deteriore la calidad de vida del hombre mismo.

Muchas Empresas han tomado conciencia de los problemas serios que acarrea el no respeto del ambiente y han perfeccionado sus técnicas productivas, mejorado la forma de tratar sus desperdicios, ya sean: sólidos, líquidos o gaseosos, para lograr producir el menor impacto negativo posible en sus alrededores. Henry & Heinke (1999).

Más aún, muchas de ellas, tienen incorporadas exigencias de cumplimiento obligatorio en sus propias normas y en muchos casos estas, son ampliadas hacia los proveedores, en el sentido de que son considerados como tales solamente aquellos que tienen una actitud similar y también dan cumplimiento a las reglamentaciones ambientales.

Conceptualmente el término “Impacto Ambiental” indica la alteración que se introduce en un determinado ambiente por la ejecución de alguna acción, antropológica o natural,

por ello, al anular o por lo menos minimizar dichos efectos, el resultado implicará una mejora del bienestar humano, en forma directa o indirecta. Canter (1998).

En pos de un mayor equilibrio y de un ordenamiento territorial más adecuado, los países más desarrollados impulsan el uso de ingentes recursos económicos, que son derivados hacia áreas específicas de la educación y la investigación, muy especialmente hacia los niveles superiores de estas, para que se estudien soluciones a los diferentes problemas relacionados con el ambiente. Henry & Heinke (1999)

1.3 El Hombre y la Problemática Ambiental.

La naturaleza ha logrado siempre mantener un equilibrio en todas las interacciones imaginables, naturales o antropológicas, que a lo largo de millones de años se han producido.

El hombre desde su aparición sobre la tierra, debido a sus insatisfacciones, ambiciones e intolerancias, ha sido el encargado de introducir factores desequilibrantes que han producido alteraciones, en algunos casos muy profundos, en muchos ámbitos de la naturaleza. Miller (2002).

Se puede decir entonces que la cuestión ambiental es antropocéntrica y por lo tanto al ser el hombre el responsable primario de la mayor parte de los desequilibrios ambientales, es por ello que también es el hombre el que debe buscar las soluciones para revertir a los mismos.

El problema ambiental no se circunscribe entonces a una sola disciplina, sino que interactúan en el mismo, ciencias tan diferentes como las económicas, las naturales, las ingenieriles, las sociales e inclusive concurren factores tan apartados de los anteriores como ser los religiosos.

Muchas realizaciones tecnológicas que aportan la solución a un determinado problema humano son a su vez el principio de otros problemas ambientales a veces muchos más serios y de más difícil solución, que el que se quiso resolver en origen. Miller (2002)

La construcción de una presa de grandes dimensiones: para regulación de crecientes, generación de energía eléctrica y fuente de provisión de agua, puede a su vez puede ser origen de otros graves problemas tales como: ascenso de los niveles freáticos en el entorno, interferencia en todos los aspectos de la vida acuática y silvestre, grandes

cambios climáticos, salinización de las tierras, desaparición de selvas y paisajes, etcétera, o sea que aspectos positivos vinculados con la actividad humana se ven muchas veces neutralizados o, peor aún, superados por los aspectos negativos. Murgel Branco (1978).

Es por eso que a nivel mundial se ha despertado y avanza lentamente una nueva conciencia, se estudian entonces las intervenciones tecnológicas pero dentro de un marco mucho más amplio y multi-interdisciplinario, que trata de prevenir las posibles repercusiones y minimizar los efectos secundarios. Miller (2002).

La actividad humana tiene entonces aspectos positivos y negativos, son estos últimos factores los que han producido una generalizada preocupación y que han impulsado el nacimiento de una nueva conciencia social sobre el tema en muchos países que se pueden resumir como:

- Concientización de lo importante que es mantener un equilibrio entre los desarrollos tecnológicos y el ambiente, dados los limitados y frágiles que son los sistemas y los recursos naturales de este Planeta.
- La calidad de vida del hombre se vincula justamente con el lograr este equilibrio.
- Cuando la naturaleza se ve agredida en forma irreversible y ante determinados impactos, no existe una capacidad natural de lograr nuevamente un equilibrio.
- Gran cantidad de la población se ve afectada seriamente por los problemas ambientales. Margalef (1986).

Esa misma conciencia social ha sido la generadora e impulsora de la formación de grupos ecologistas, que actúan en todos los niveles y que en muchos casos son los impulsores sociales de nuevas actitudes que implican el respeto del hombre hacia el medio ambiente. Margalef (1986).

1.4 La problemática ambiental en la Provincia de Tucumán.

La Provincia de Tucumán se destaca entre todas las Provincias de Argentina y del NOA en particular por ser la más pequeña, con una superficie de apenas 22.524 Km², posee una población de 1.448.200 habitantes, según el censo de año 2010. DEyCT (2010)

Es la Provincia más densamente poblada de la República Argentina con 64 habitantes por Km², solamente superada en densidad de habitantes por el valor que le corresponde a la Capital Federal. DEyCT (2010)

Tucumán es una Provincia con clima subtropical con estación seca, a consecuencia de ello por las elevadas precipitaciones se genera una muy abundante riqueza hídrica, conformada por los ríos, arroyos, vertientes, etcétera, que descienden de la parte montañosa del Oeste.

Los múltiples escurrimientos de agua, bajan desde las serranías hacia la llanura central, desde allí se desplazan todas las aguas hacia el Este y finalmente terminan conformando en la parte central de la Provincia un único cauce principal: el Río Salí. Giraut y otros (1982).

La parte Este del territorio provincial, se caracteriza por tener una menor cantidad de precipitaciones anuales con lo cual existe una inferior cantidad de afluentes hacia el cauce principal, por lo tanto su aporte al Río Salí, es de mucha menor importancia que los caudales provenientes del Oeste. DEyCT (2010)

Como se ha expresado, todos los volúmenes de agua, grandes y pequeños, terminan siendo afluentes directos o indirectos, del único cauce colector de todas las aguas provenientes del Este y Oeste de la Provincia, que es el Río Salí.

Este importante Río se convierte en lo que podríamos llamar la columna vertebral del sistema hídrico de la Provincia, sus aguas escurren de Norte a Sur por el centro del territorio provincial, pero luego, en el Sur de la Provincia, se inclina hacia el Este y finaliza su recorrido descargándose como afluente en el gran lago del Dique de Termas de Río Hondo. DEyCT (2010).

El lago está conformado por las aguas embalsadas por el dique, cuyo origen son en primer término las del Río Salí y luego las provenientes de los tres importantes ríos sureños: Gastona, Medinas y Marapa, que son ex afluentes del Río Salí, por cuanto al llenarse el vaso del lago dejaron de aportar al mismo y actualmente desembocan en forma directa. Caponetto y otro (1983).

En su nacimiento en el Norte de la Provincia de Tucumán, en el límite con la Provincia de Salta, el Río Salí recibe el aporte estacional de algunos afluentes: Río Zárate, Río Alurralde, Río Vipos y Río Tapia, estos ríos son de caudal prácticamente nulo en toda la época de estiaje, desde Abril a Setiembre, pero tienen caudales importantes de agua y arrastran grandes cantidades de materiales de arrastre en la estación lluviosa. DEyCT(2011).

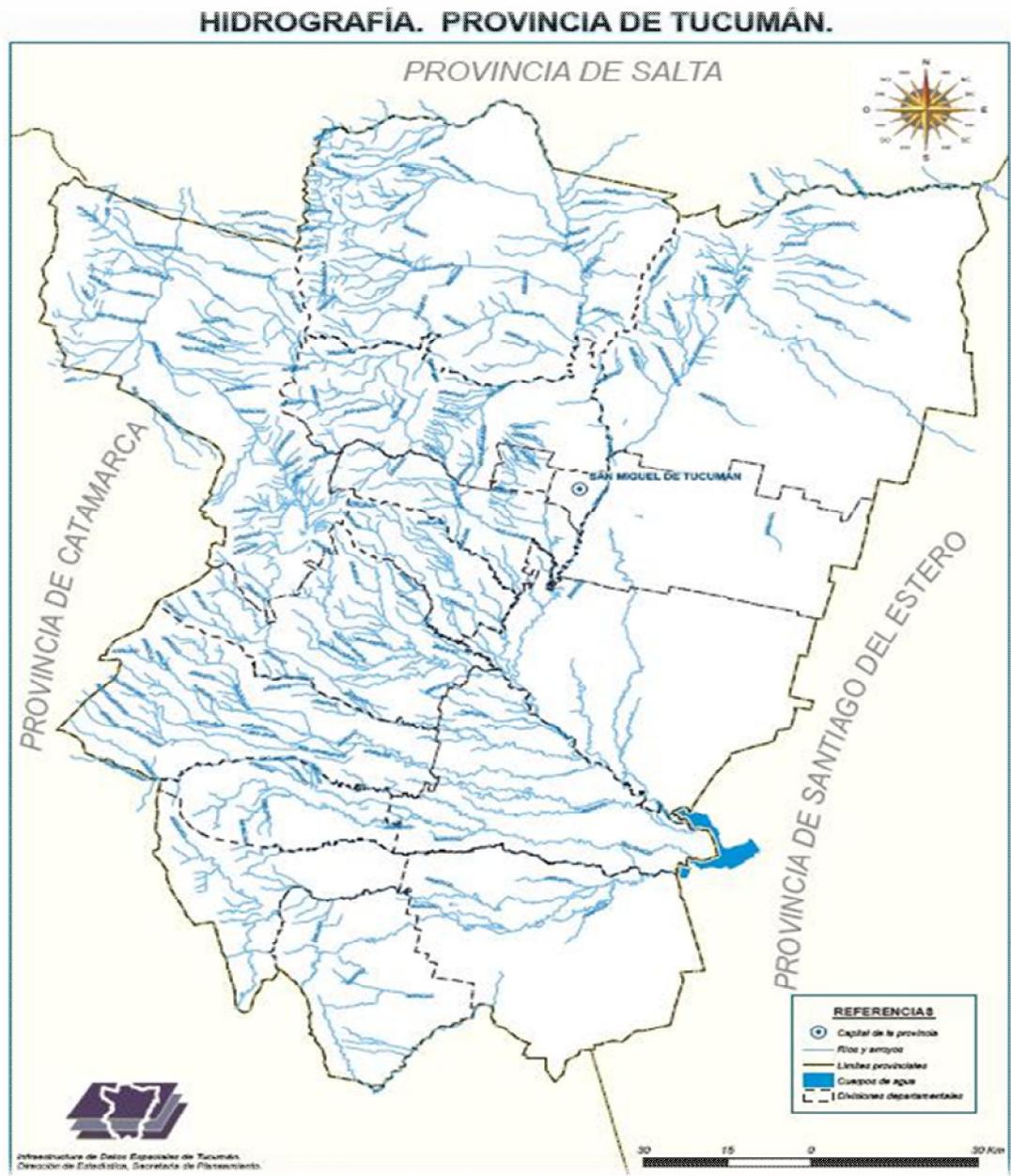


Figura 1: Mapa hidrológico completo de la Provincia de Tucumán. Escala 1:250.000

Las aguas que escurren desde los ríos del Norte terminan su recorrido formando el lago del dique Celestino Gelsi, pero al mismo tiempo introducen en el mismo una gran cantidad de material en suspensión y de arrastre que termina conformando una capa creciente de sedimentos en el fondo, con lo cual disminuye anualmente la capacidad de embalse de este reservorio. Davolio y otro (1996).

El agua que sale de sus compuertas se aprovecha inicialmente para generación de energía hidroeléctrica y se deriva la mayor parte de esta a la planta de tratamiento construida en el lugar para potabilizarla y destinarla para el consumo de los habitantes de San Miguel de Tucumán, mientras el excedente se distribuye una parte para uso de algunas industrias y otra para riego mediante canales, que se dirigen especialmente hacia el Este de la Provincia, siendo esta la superficie más árida y con menores recursos hídricos escurriendo sobre la misma. Adler (2006).

Encontrándose el dique Celestino Gelsi en obras, se inició sobre el mismo río Salí, la construcción de otro gran embalse en el límite con la vecina provincia de Santiago del Estero, el dique de Termas de Río Hondo, ubicado en el Sureste de la provincia de Tucumán y Noroeste de la lindante.

Las aguas embalsadas en el vaso de este dique, de tipo nivelador o regulador de crecientes, inundan gran parte del límite entre ambas provincias, quedando estos totalmente indefinidos en toda la zona del lago.

Con la construcción y el llenado de ambos diques la longitud del Río Salí quedó totalmente acotada, en la práctica se le asigna tal nombre al segmento comprendido entre la salida del lago del dique Celestino Gelsi hasta su ingreso a la cola del embalse de Termas de Río Hondo. Caponetto y otro (1983).

Aun cuando en línea recta la distancia entre ambos puntos es sensiblemente inferior, debido a que el Río Salí, por ser río de llanura en su recorrido va describiendo una gran cantidad de meandros, giros y cambios de dirección en el territorio tucumano, resultado de lo cual la longitud total de este segmento acotado es de 107,6 Kilómetros. Caponetto y otro (1983).

El clima subtropical con estación seca que caracteriza a la climatología de la región y muy en particular de la provincia de Tucumán, hace que sean muy importantes las variaciones que se registran en las precipitaciones que se producen anualmente, caracterizadas por el invierno o estación seca y el verano estación de lluvias frecuentes y de gran intensidad. Rabsium (1960).

Los ríos afluentes de montaña disminuyen sensiblemente su aporte líquido entre una época y otra, por eso las variaciones de caudal en los diferentes cauces y en el principal

son importantes, en el verano el río escurre con un volumen que supera en por lo menos 20 o 25 veces al que corresponde a la época invernal. Rabsium (1960).

El control del caudal que se eroga diariamente se efectúa con precisión en las compuertas de salida del dique Celestino Gelsi, donde se encuentra ubicada la usina generadora de energía eléctrica. ORSEP (2006).

Aguas abajo de ese punto existe un gran cambio en el caudal por los aportes de los afluentes, que evidentemente, como ríos de montaña, tienen una importante variabilidad estacional y el volumen aportado depende principalmente de las precipitaciones en la zona serrana. Caponetto y otro (1983).

1.5 El desarrollo agroindustrial en la Provincia de Tucumán.

Una característica distintiva de la provincia de Tucumán es tener suelos de gran calidad y aptos para muchos tipos de cultivos, lo cual ha significado que a partir de las cosechas agrícolas de algunos de ellos, hayan surgido industrias directamente vinculadas a los mismos: agroindustrias. INTA (2005).

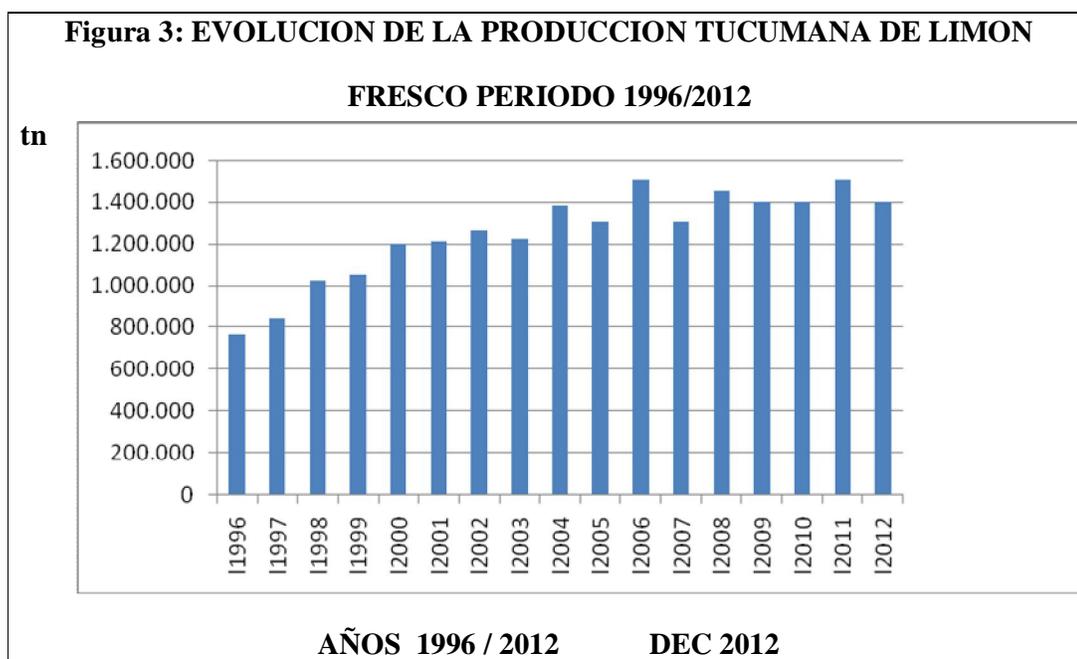
Se ha destacado por su importancia desde hace más de 190 años el cultivo de la caña de azúcar, este cultivo conocido desde el siglo XVII fue reintroducido en la Provincia el año 1821 por el Obispo Eusebio Colombres, inicialmente fue vinculado solamente con la producción de azúcar en escala reducida, hasta llegar a la actualidad donde en cada cosecha se elaboran más de 1.300.000 Toneladas del producto. Ríos y otros (2012).

No obstante ser el azúcar el producto principal de esta elaboración la base de su expansión, se ha ampliado el aprovechamiento de la caña de azúcar y en la actualidad es también la materia prima para la producción de alcohol y con los residuos fibrosos de la molienda se genera también otros materiales: el bagazo, que se emplea desde hace varios años para la producción de papel y generación de energía por su combustión en calderas.

Otro emprendimiento empresarial pero de origen mucho más reciente y que se está destacando cada vez más, es el que ha nacido de la producción de citrus, especialmente el limón. ATC. (1996).

La producción de este cítrico se ha incrementado notablemente en los últimos 20 años y ha generado en la Provincia una nueva agroindustria que se encuentra en plena producción y expansión. EEAOC. (2013).

Ambas industrias son de régimen estacional, pero por otra parte la cosecha de la caña de azúcar como la de la zafra del limón se superponen en el tiempo, las dos se realizan entre Mayo y Octubre de cada año, época que es coincidente con la estación seca invernal, o sea de mínimas precipitaciones en la Provincia.



Por los volúmenes de producción, prima la industrialización de la caña de azúcar, con lo cual se obtiene: azúcar, alcohol, como industria derivada la producción de papel y también algo de generación de energía.

En segundo término se destaca la industria citrícola, donde gran parte de la cosecha, la de primera calidad, luego de ser adecuadamente seleccionada, preparada y embalada, se exporta como fruta fresca y la de segunda calidad se industrializa, con lo cual se obtienen como productos derivados de este proceso: jugos, cáscara seca, aceites esenciales, etcétera. DEyCT. Año (2006).

La producción de azúcar en los ingenios ha sido durante muchos años el mayor generador de ingresos y recursos económicos de la Provincia y por ello esta industria, que ha nacido hace casi doscientos años, ha crecido bajo el lema único de producción,

sin tomar en cuenta ningún otro factor, como ser uno de los que actualmente se considera como prioritario: el ambiente.

Lamentablemente la industria citrícola, mucho más joven, se inició tomando el mal ejemplo de la azucarera y adoptó una postura similar, situación que por la falta de interés de los sucesivos gobiernos provinciales, incluyéndose muy especialmente el actual, condujeron a una situación ambiental sumamente complicada, con serios problemas de convivencia con las provincias vecinas y que desembocaron en fuertes desencuentros que por su magnitud, requirieron la intervención del Gobierno Nacional y de la Justicia Federal.

Debe reconocerse que solamente unas pocas Empresas Citricolas han tomado recientemente la iniciativa de impulsar acciones tendientes a solucionar los inconvenientes ambientales relacionados con su propia producción, muy especialmente aquellos que se vinculan con la contaminación del agua y del suelo.

En el tratamiento de los efluentes se pueden citar las experiencias de tratamiento tradicional anaeróbico a cielo abierto que en la mayoría de los casos no han resultado satisfactorios, las experiencias de tratamiento anaeróbico en sistemas cerrados con producción y almacenamiento de biogás de buenos resultados pero inversiones importantes, y en el tratamiento de desechos sólidos produciendo compost. Davolio y otros (2010).

1.6 El clima y la producción agroindustrial de la Provincia.

El clima de la Provincia de Tucumán es subtropical con estación seca, le corresponde un proceso cíclico con lluvias muy escasas desde Mayo a Octubre y grandes tormenta y ríos crecidos con máximo caudal en los otros seis meses. Rabsium (1960)

Durante la época seca, se produce la maduración de los principales cultivos de la región y por lo tanto su cosecha: caña de azúcar y citrus, particularmente el limón y sobre el final de la misma la maduración de la frutilla y de otros cultivos denominados de primicia, pero de volúmenes mucho menores.

Los volúmenes importantes de las descargas de efluentes industriales y de alta contaminación se producen estacionalmente durante la época de zafra del limón y de la

caña de azúcar, todo esto para desmedro de las condiciones ambientales se realizan en la época de estiaje y de caudales mínimos en todos los diferentes ríos provinciales.

1.7 La contaminación hídrica.

El Río Salí es el cauce receptor final, directo o indirecto, de todas las descargas contaminantes producidas por las industrias de la Provincia, pero a ellas hay que añadir el importante volumen de efluentes crudos provenientes de los conglomerados urbanos.

La ciudad Capital, como todas las ciudades y aglomeraciones urbanas de importancia de la Provincia, que poseen un sistema cloacal, producen el vuelco de sus efluentes cloacales crudos o en el mejor de los casos con tratamiento primario solamente.

Si tomamos en cuenta que, de acuerdo a los valores dados a conocer por las estadísticas oficiales del censo 2010, el 45 % de la población urbana tiene servicio de cloacas, con ello podemos inferir que el total de población que cuenta con este servicio en la Provincia se encuentra en el orden de los 550.000 habitantes. DEyCT (2001).

A diferencia de los efluentes industriales que son estacionales los aportes cloacales son continuos y mas allá de una variabilidad horaria del caudal en el día y que se corresponde con los requerimientos de la población, este volumen de efluentes es constante a lo largo de todo el año.

Considerando un término medio de aportes líquidos de 200 litros por habitante y por día, el volumen de cloacales que se descargan sin tratamiento al Río Salí en forma directa o indirecta a través de sus efluentes estaría en el orden de los 110.000 metros cúbicos por día o sea un valor promedio de unos 1.300 litros por segundo. Davolio y otro (2006)

De igual forma se puede calcular que el aporte de carga orgánica contaminante, estimándose un valor de referencia para este parámetro de 60 gramos de DBO por habitante y por día, se obtiene un vuelco total de unos 33.000 Kilogramos de materia biodegradable o DBO por día, proveniente solamente del vuelco sin tratamiento de los efluentes cloacales. Davolio (1996).

Los efluentes de las fábricas cuyo funcionamiento es continuo y sus descargas de efluentes son permanentes a lo largo de todo el año: mataderos, papeleras, fábricas de golosinas, etcétera, se suman a las descargas estacionales de las fábricas azucareras,

de las destilerías de alcohol y de las citrícolas, y a los efluentes cloacales provenientes de los núcleos poblacionales.

Es el período de estiaje es cuando las condiciones de las aguas que escurren por el Río Salí y la de los afluentes que fluyen hacia él se vuelven críticas, por la elevada carga contaminante que cada uno recibe y el caudal propio de agua que se encuentra reducido a una mínima expresión. Caponetto y otro (1983).

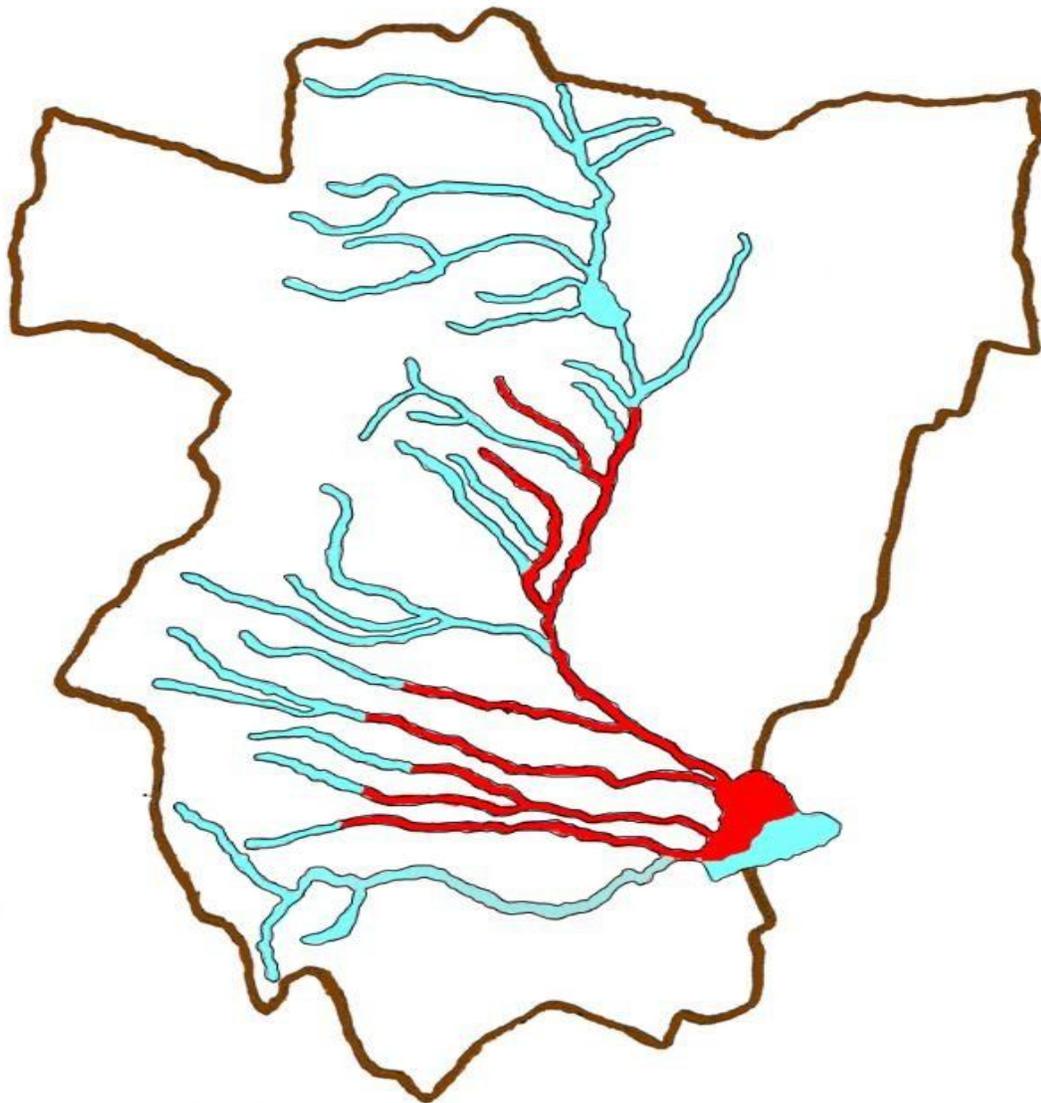


Figura 4: Sectores con alta contaminación de la cuenca del Río Salí, con proyección al lago del dique de Termas de Río Hondo. Escala 1:250.000.

En el escurrimiento de todo río, a través de su superficie de contacto aire líquido o sea la de interfase, se realiza un proceso permanente de incorporación de aire por

solubilización del gas, o sea parte del gas Oxígeno, presente en dicha mezcla, se incorpora lentamente al agua disolviéndose en la misma en muy pequeñas cantidades, este proceso lento denominado reoxigenación es continuo y depende de varios factores:

- Mayor superficie de interfase o sea de contacto entre el aire y el agua
- Forma de escurrimiento superficial de las aguas
- Temperatura y salinidad del agua.
- Contenido de Oxígeno Disuelto en el agua
- Contenido de materia orgánica biodegradable
- Microorganismos presentes en el sistema y
- Velocidad del proceso de degradación biológica de la materia orgánica presente.

1-8 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) ATC. Asociación Tucumana del Citrus. “Tucumán es el líder en producción de limones”. Editorial Reverté SA. Tucumán. Año 1996.
- (2) Adler Franklin J. “Los Embalses y los Recursos Hídricos Superficiales”. Revista CET ISSN 1668-9178. FACET UNT. San Miguel de Tucumán. Argentina. Año 2006.
- (3) Canter Larry W. “Manual de Evaluación del Impacto Ambiental”. Editorial Mc Graw Hill. ISBN 84-481-1251-2. Madrid. España. Año 1998.
- (4) Caponetto Silvia y Davolio Franco “Ensayo de un modelo matemático aplicado al cauce del Río Salí”. Anales del VIº Congreso Argentino de Saneamiento. Salta - Setiembre 1983.
- (5) Davolio Franco y Viapiano José Santiago. “El Proceso de la Pérdida y la Ganancia de Oxígeno en el Río Salí” Libro y CD del “III Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida” y “4to Congreso de Ambiente y Salud”, UNCa. Catamarca. 25 al 29 de Setiembre 2006. Revista: “Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente”, Año VII, Número VII, páginas 62 a 71 Año 2008. ISSN 1667 – 457X, de la FRT de UTN. Tucumán. Año 2006.

- (6) Davolio Franco y José Santiago Viapiano. “Turbiedad y Manganeso en Aguas para Consumo Humano”. “XVI Congreso Nacional del Agua” – San Martín de los Andes – Neuquén. Noviembre 1996.
- (7) Davolio Franco, Rey Campero Pedro Pablo, Viera Héctor Ariel. “Aprovechamiento de desechos de la Industria Citrícola”. “V CIAVCI Congreso Iberoamericano de Ambiente y Calidad de Vida”. “6° Congreso de Ambiente y Calidad de Vida”. ISBN 978-950-746-187-3. UNCa. Catamarca. Octubre 2010.
- (8) Davolio Franco. “Políticas Ambientales y Medio Ambiente”. “VI Congreso El NOA y su Medio Ambiente” – San Miguel de Tucumán. Argentina. Agosto 1997.
- (9) Davolio Franco, Viapiano José Santiago. “Acciones, Hombre, Medio Ambiente”. “Congreso Regional del NOA y su Medio Ambiente”. San Miguel de Tucumán. Argentina. Junio 1991.
- (10) DEyCT. Dirección de Estadística y Censos de la Provincia de Tucumán. Sección Cartografía. Tucumán. Año 2011.
- (11) DEyCT. Dirección de Estadística y Censos de la Provincia de Tucumán. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Tucumán. Año 2010.
- (12) DEyCT. Dirección de Estadística y Censos. Ministerio de Economía. Gobierno de Tucumán. “Censo citrícola provincial.” Tucumán. Año 2010.
- (13) EEAOC. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. “Los citrus del noroeste argentino. Su cadena productiva”. Tucumán. Año 2006.
- (14) EEAOC. Estación Experimental Agrícola Obispo Colombres. Sección Economía y Estadísticas. economia@eeaoc.org.ar. Tucumán. Año 2010.
- (15) EEAOC Estación Experimental Agrícola Obispo Colombres. “Reporte Agroindustrial”. EEAOC ISSN 2346-9102. Tucumán. Año 2013.
- (16) Giraut Miguel A, Valladares Andrea I, Ruíz Aníbal, Rey Carmen A, Dente Vittoria, Ludueña Sebastián. “Cartografía Hídrica Superficial de la Provincia de Tucumán”. Atlas Físico de la República Argentina, Vol. 2. Centro Editor de América Latina. Buenos Aires. Argentina. Año 1982.

- (17) Henry J. Glynn, Heinke Gary W. "Ingeniería Ambiental". Editorial Prentice Hall. ISBN 0-13-120650-8. Naucalpan de Juárez. México. Año 1999.
- (18) INTA. Instituto Nacional de Tecnología Agrícola. "Suelos y Ambientes de Tucumán". Tucumán. Año 2005.
- (19) INTA Instituto Nacional de tecnología agropecuaria. "Análisis Económico de la campaña citrícola en Tucumán y dinámica del Mercado". Tucumán. Año 2012."
- (20) Margalef Ramón. "Ecología". Editorial Omega. ISBN 84-282-0405- 5. Barcelona. España. Año 1986.
- (21) Miller G. Tyler. "Introducción a la Ciencia Ambiental. Desarrollo Sostenible de la Tierra". Editorial Thomson. ISBN 84-9732-053-0. Madrid. España. Año 2002.
- (22) Municipalidad de Las Termas de Río Hondo. "Sitio Oficial de las Termas de Río Hondo". Santiago del Estero. Año 2011.
- (23) Murgel Branco Samuel. "Ecología". CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamiento Ambiental. Sao Paulo. Brasil. Año 1978.
- (24) ORSEP, Organismo Regulador de Seguridad de Presas. Franklin D. Roosevelt 2318, CP C1428BOJ, CABA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Año 2006.
- (25) Rabsium, Simón. (1960). "Introducción a la Hidrología de Tucumán". FACET de UNT. Tucumán. Argentina. Año 1960.
- (26) Ríos Liliana, Pérez Gonzalo, Sopena Roberto, Logarzo José. "Análisis Económico de la zafra azucarera en Tucumán y Dinámica del Mercado". INTA. Área Economía. EEA. Famaillá. Tucumán. Año 2012.

Capítulo II: Procesos anaeróbicos y aeróbicos

2.1 El tratamiento anaeróbico de los efluentes.

En la bibliografía específica relacionada con la industria citrícola y en particular en lo referente a tratamiento de sus efluentes, existe mucha información referente al tratamiento anaeróbico, en particular mediante la construcción de lagunas de estabilización anaeróbicas. Valdez y otros (1994).



**Foto 1: Planta de producción de biogás y tanque de almacenaje.
La reacción es anaeróbica.**

Está comprobado que el sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización anaeróbicas para estos efluentes, aun cuando se operen varias en serie, no es un tratamiento de gran eficacia y se presentan múltiples inconvenientes operativos y ambientales Romero Rojas (1999).

- Bajo rendimiento en la reducción de la carga orgánica, DBO
- Desprendimiento de olores desagradables
- Proceso sin posibilidad de control externo
- Desprendimiento de gases de efecto invernadero de alto impacto: CH_4 , H_2S , etc.

- Importante superficie de terreno afectada
- Limpieza periódica de las lagunas muy compleja
- Requerimiento adicional de terreno para disponer los sólidos sedimentados.



Foto 2: Producción de biogás y tanque de almacenaje sobre terreno.

Existen antecedentes importantes de aprovechamiento de los gases que se desprenden en la biodigestión anaeróbica, proceso de producción de biogás, situación esta que presenta ventajas sobre el tratamiento simple de las lagunas anaeróbicas, pero que requiere una inversión en infraestructura muy importante con costos elevados, a los cuales hay que agregar los que corresponden a los requerimientos propios del control y del mantenimiento. Montanaro (2006).

2.2 El proceso aeróbico y el consumo de Oxígeno por los microorganismos.

El término contaminación nos indica la presencia de componentes extraños en un determinado medio, o sea la presencia de algo que no es naturalmente integrante de ese sistema o que su cantidad en el mismo está por encima de los valores que pueden considerarse normales. Albarracín (2010).

En las aguas residuales industriales o en las aguas negras de origen cloacal, existe siempre la presencia de muchos residuos tanto de origen inorgánico como orgánico, en

concentraciones más o menos importantes y para eliminarlos se requiere de un tratamiento que puede ser más o menos complejo según el tipo de contaminante. Davolio (2008).

El denominado proceso de biodegradación o degradación por medio de los microorganismos se refiere específicamente a la eliminación de la materia orgánica, siendo que los principales elementos constituyentes de los diferentes tipos de compuestos orgánicos son el C y el H y en menor proporción el N, el P, el S y otros. Davolio (2008).

La materia orgánica, presente en las aguas contaminadas, proviene de los residuos industriales, de los desechos de los alimentos, de las excretas y de toda otra actividad humana que involucre uso de agua y que luego de emplearla se desecha.

Dicha materia es desintegrada y metabolizada por microorganismos: bacterias, hongos y microorganismos mayores que la descomponen y la utilizan para sus ciclos vitales, aprovechando la energía proveniente del proceso de descomposición y devolviendo, como productos de esa reacción química, sustancias muchos más simples comparadas con su fórmula molecular original. Davolio (2008).

Todos los procesos de descomposición aeróbica de moléculas orgánicas complejas en otras moléculas de sustancias con fórmulas más sencillas involucran siempre el empleo de grandes cantidades de Oxígeno. Davolio (2008).

Desde un punto de vista meramente químico este proceso se denomina oxidación, debe realizarse con la presencia de Oxígeno en cantidades suficientes y con exceso de este gas, para que el proceso de biodegradación sea lo más completo posible, pero al mismo tiempo desde el punto de vista de la termodinámica química, lo podemos considerar como una combustión muy lenta y por lo tanto al producirse la reacción correspondiente hay una importante generación de energía, que es justamente la que emplean los microorganismos en sus ciclos vitales. Davolio (2008).

Los microorganismos aerobios necesitan una cierta cantidad de oxígeno para metabolizar la materia orgánica, si esta se encuentra depositada sobre la tierra no hay mayores limitaciones en cuanto a conseguir todo el gas que sea necesario, dado que en ese caso lo toman directamente del aire donde es abundante.

El problema se plantea cuando la materia orgánica se encuentra en suspensión en un medio acuoso, donde la cantidad de Oxígeno disuelto es una cantidad muy limitada y que además depende de otros factores tales como: la salinidad del medio, la temperatura y otros. Davolio (2008).

O sea la cantidad de Oxígeno en estado gaseoso en el medio líquido, es muy pequeña, se trata solamente de unos miligramos por litro, mg / l, por lo tanto ante un requerimiento importante, el elemento disuelto se agota rápidamente.

Las diferentes especies de microorganismos presentes en el medio acuoso, compiten entonces para lograr metabolizar el alimento necesario que les permita la supervivencia de su especie y su reproducción.

Pero el agotamiento del Oxígeno en el medio acuoso, causado por el proceso vital de los microorganismos que degradan la materia orgánica, produce un tremendo desequilibrio en las especies superiores: algas, plantas acuáticas y peces, que también necesitan de este elemento esencial para su supervivencia, como cualquier ser vivo, por ello, cuando la presencia del gas se reduce a valores que están por debajo de ciertos límites, se produce siempre primeramente la muerte por asfixia de los seres superiores presentes en el sistema. Davolio (1996).

En la primera etapa los microorganismos, utilizando el Oxígeno disuelto en el agua, degradan las moléculas complejas de la materia orgánica carbonácea con la producción de CO₂, de H₂O y de energía. Davolio (2002).

Este proceso que se realiza en presencia del vital elemento, se denomina “Aerobiosis” y provee a través de la reacción química correspondiente, el máximo de energía al sistema bacteriano presente en el medio. Davolio (2002).



O sea: 648.000 cal /mol o 648 Kcal / mol

Evidentemente si se trata de una molécula de una sustancia orgánica más compleja donde también existen átomos de: N, S, P y otros elementos, la reacción va a producirse con formación de un mayor número de productos y en ese caso también será mayor la cantidad de energía que se desprende, por ejemplo en el caso de una proteína tenemos:

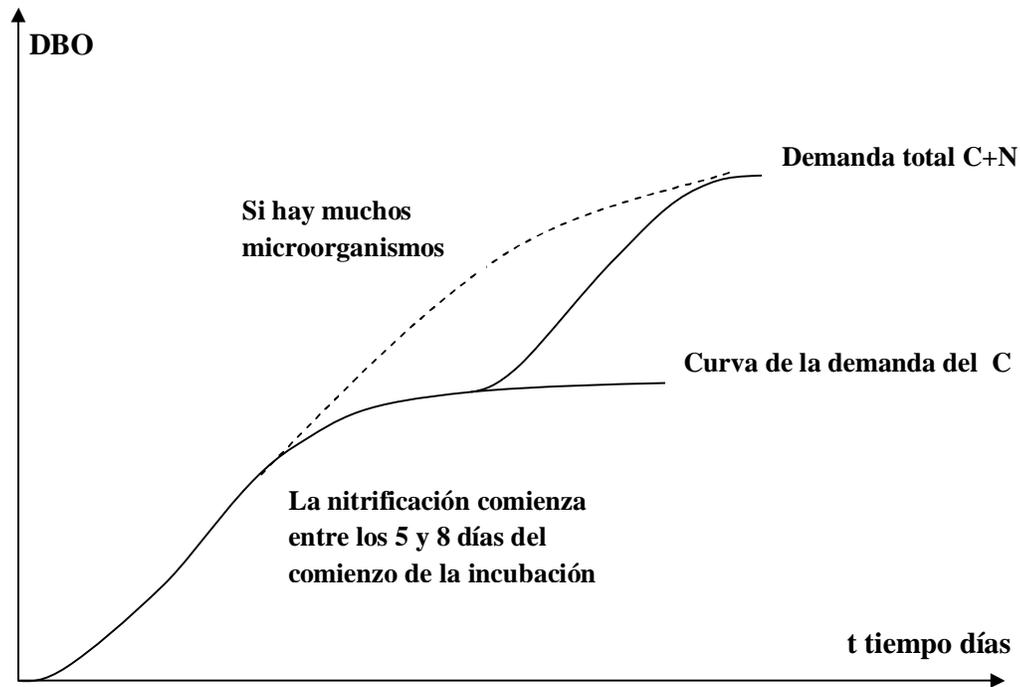
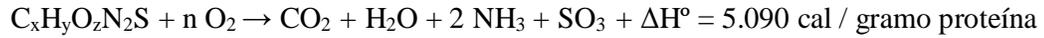
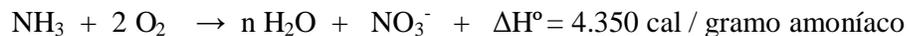


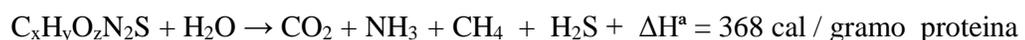
Figura 5: Curva de consumo de OD.

Luego de eliminado la mayor parte del C de la materia orgánica el proceso continúa, se produce entonces la oxidación de los compuestos nitrogenados, que no se han oxidados en las reacciones de la primera etapa, este segundo paso se denomina “Nitrificación” y en ella también se produce una cantidad importante adicional de energía:



De acuerdo a estas reacciones la desaparición del Oxígeno implicaría supuestamente la finalización del proceso microbiológico, pero en realidad el mismo continúa en la nueva situación con nuevas especies de microorganismos, que operan con nula presencia de dicho elemento, esta etapa se denomina: “Anaerobiosis”. Davolio (2002).

Se desarrollan y multiplican entonces estas nuevas especies de microorganismos, capaces de degradar la materia orgánica sin la presencia de Oxígeno, estos van a continuar en un proceso que produce una cantidad mucho menor de energía, con productos finales totalmente diferentes y que, en general, se caracterizan por poseer olores desagradables.



El proceso, si solo corresponde a la degradación de materia orgánica carbonácea, se denomina: “Fermentación”, pero si la misma contiene además N, S y otros, se desprenden olores muy agresivos al olfato y en ese caso el proceso recibe el nombre de: “Putrefacción”. Davolio (2002).

El proceso de putrefacción permite la obtención de CH_4 y de otros compuestos hidrogenados, en estas reacciones se obtiene una cantidad de energía mucho menor que la obtenida en las reacciones de oxidación, presentadas anteriormente y que son de tipo aeróbico, a pesar de esta menor cantidad de energía que se obtiene, esta es aún suficiente para ser aprovechada para determinadas variedades de microorganismos.

En condiciones de anaerobiosis, el ambiente se vuelve apestoso por la presencia de grandes cantidades de gases pútridos mezclados en el aire: H_2S y mercaptanos, se desprende además el CH_4 que es inodoro, pero insoluble en el H_2O , forma sobre la superficie del líquido grandes burbujas que a posteriori se desprenden.

En las condiciones del sistema anaeróbico es imposible que pueda subsistir cualquier ser viviente, a no ser que pertenezca a alguna de las variedades de microorganismos que normalmente operan en este medio.

La materia orgánica total puede servir entonces como uno de los indicadores del nivel de contaminación de un determinado residual líquido, los microorganismos compiten para utilizar la que sea “biodegradable” como nutriente en su proceso vital. Davolio (2002).

Toda la materia orgánica biodegradable no puede degradarse con la misma velocidad, por ejemplo: los azúcares en general pueden ser atacados rápidamente por los microorganismos, en cambio los aceites minerales no pueden ser descomponerse con la misma rapidez y por lo tanto aún cuando puedan tener una estructura química equivalente no tienen igual valor nutritivo, por cuanto a pesar de que la cantidad final de energía que se libera es la misma, el proceso de desprendimiento se hace en un tiempo mucho mayor.

Por otra parte no toda la materia orgánica es biodegradable, existen muchos productos sintéticos industriales que también forman cadenas complejas de C, pero que no funcionan como sustancias nutritivas y por lo tanto no son incorporables al conjunto de productos que son alimentos para los microorganismos. Davolio (2002).

La dificultad reside entonces en como evaluar la cantidad de estos materiales que son: “biodegradables y cuales “no biodegradables” de todos los que están presentes en un determinado medio.

El método más difundido y aceptado para evaluar la carga contaminante orgánica de un determinado medio, consiste en determinar la cantidad total de Oxígeno consumido por los microorganismos para la oxidación de los compuestos orgánicos biodegradables, presentes en un determinado tiempo. APHA y otras (1992).

Esta determinación se conoce como: DBO, Demanda Bioquímica de Oxígeno, que en definitiva mide la velocidad de desaparición del Oxígeno del agua en función de la actividad biológica de todo el sistema microbiano presente a una determinada temperatura. APHA y otras (1992).

La DBO mide entonces: la cantidad de Oxígeno que requieren los microorganismos para transformar la materia orgánica biodegradable en productos más simples y estables, esta experiencia se realiza a 20 °C durante 5 días y los resultados se expresan en miligramos por litro.

Para saber si el proceso se va a desarrollar en aerobiosis es importante medir el: Oxígeno Disuelto, OD, inicial y realizar varias diluciones del efluente con agua destilada, para que cada una de ellas, contenga una diferente concentración de muestra del residuo y evitar de que el ensayo sea fallido por haberse agotado el OD. APHA y otras (1992).

Estas mediciones es conveniente realizarlas también acompañadas con un “ensayo en blanco” o sea someter al mismo proceso de incubación el agua destilada empleada para las diluciones. APHA y otras (1992).

La segunda etapa, que implica la degradación de la materia orgánica nitrogenada, comienza generalmente entre los 5 y los 8 días de comenzada la primera fase y se puede prolongar inclusive un poco más allá de los 20 días, no obstante este es el límite aceptado como de DBO final o total en cualquier muestra.

Cuando se opera a una temperatura inferior a los 20 °C, el proceso de degradación biológica se hace más lento y de igual forma si la temperatura es mayor el proceso es

más rápido dentro de los límites de tolerancia de los microorganismos, situación que podemos observar en la figura 6.

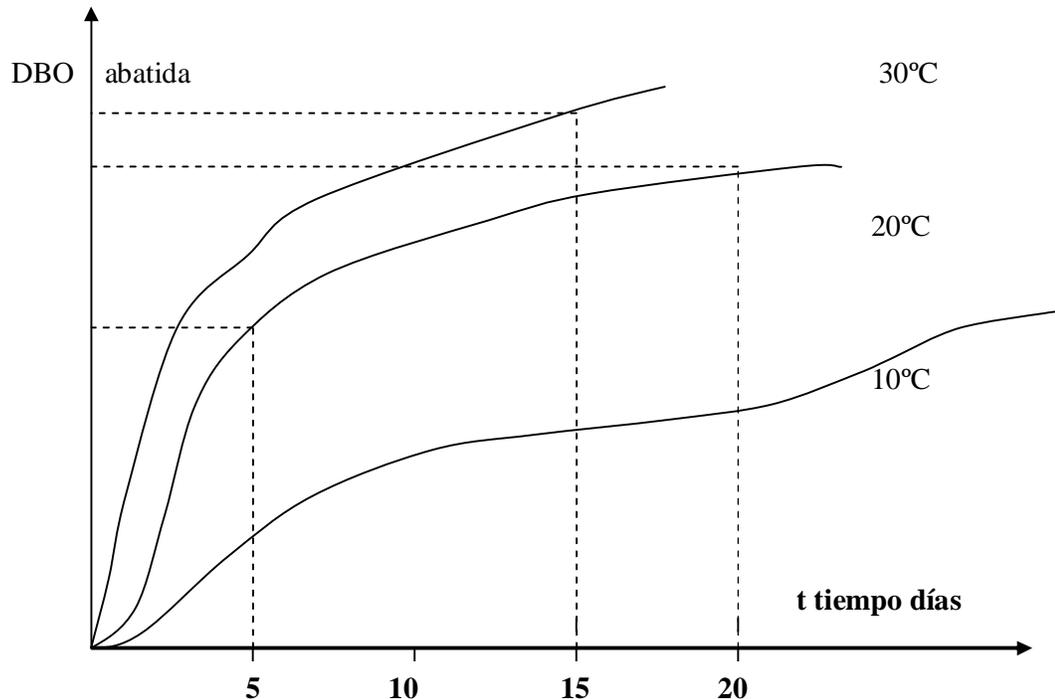


Figura 6: Curva de variación diaria de la DBO según la Temperatura.

Cuando se opera a una temperatura inferior a los 20 °C, el proceso de degradación biológica se hace más lento y de igual forma si la temperatura es mayor el proceso es más rápido dentro de los límites de tolerancia de los microorganismos, situación que podemos observar en la figura 6.

En todo el proceso de medición de la DBO, empleando el método tradicional de Winkler, es de fundamental importancia la presencia de Oxígeno, si este elemento vital se agota en el agua, el proceso se modifica sustancialmente a nuevas condiciones o sea en anaerobiosis y los tiempos indicados anteriormente dejan de tener validez y por ello todos los resultados de las mediciones varían. APHA y otras (1992).

La DBO es una determinación ampliamente aceptada, difundida y generalizada, no obstante no es una medida exacta y su determinación tiene una serie de inconvenientes que constituyen limitaciones operativas importantes, en lo que es referente a los resultados obtenidos, por cuanto:

- varía de acuerdo a la temperatura, la temperatura de 20 °C es la referencial

- los valores de OD inferiores a 2 mg / l hacen dudoso el resultado
- las bacterias y los microorganismos que van a actuar en la muestra deben previamente aclimatarse en ese medio
- si en el medio se encuentran presentes sustancias que pueden actuar como inhibidores bacterianos el desarrollo de estos puede muy pobre o directamente nulo
- sus resultados no son reproducibles con seguridad, ni siquiera mantienen con exactitud la correlación entre diluciones sucesivas
- sólo se mide la descomposición de los productos orgánicos biodegradables en un determinado período de tiempo o sea en función de cierta rapidez de asimilación
- la DBO₅ es una medida temporalmente arbitraria que surgió de las experiencias realizadas en los ríos ingleses
- si se agota el OD en la muestra el resultado de la medición no es válido
- no se conocen todos los constituyentes orgánicos de la muestra, pueden existir algunos que no sean valorables por no ser asimilables por los microorganismos
- los resultados no responden a relaciones estequiométricas que impliquen un cálculo seguro del valor de la DBO. Davolio (1973).

Una situación interesante que se plantea en la medición de la DBO es que se verifica que a intervalos regulares de tiempo la fracción que se descompone es fija, o sea que el porcentaje que se degrada en un mismo período de tiempo es siempre el mismo, pero referido a la fracción remanente de DBO del período anterior para un sustrato dado. APHA y otras (1992).

2-3 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) APHA, American Public Health Association, AWWA, American Water Works Association, WPCF, Water Pollution Control Federation. “Métodos Normalizados, para el análisis de aguas potables y residuales”. Editorial Diaz De Santos. Traducción de la 17^a Edición. Año 1992.
- (2) Davolio Franco. Conferencia "La Contaminación de la Cuenca del Río Salí ~ Dulce. Su importancia” en las Terceras Sesiones Científicas de la Universidad Tecnológica Nacional. Mendoza. Abril 1973.
- (3) Davolio Franco. Conferencista Invitado. “Taller de Contaminación por Efluentes y Desechos”. Subprograma Nacional Prioritario de Contaminación Ambiental.

Centro Cultural Universitario Eugenio Virla. San Miguel de Tucumán. Argentina.
Octubre 1996.

- (4) Davolio Franco. “Contaminación de Aguas. Tratamiento de Aguas Residuales”. Clases para calcular y diseñar plantas de tratamiento Curso dictado en el Congreso de la CONEIQ. FACET UNT. San Miguel de Tucumán. Noviembre 2002.
- (5) Davolio Franco, Viapiano José Santiago. “Enseñanza Práctica de Diseño de Plantas de Tratamiento de Residuales Líquidos”. Publicado en CD del “II Congreso de Educación en Ciencia y Tecnología”. UNCa. Catamarca. Junio 2007.
- (6) Davolio Franco. “Tratamiento Secundario y Terciario. Procesos Aeróbicos y Anaeróbicos”. Cuadernillo de Clases para los Alumnos de Ingeniería Química u otras Ingenierías que cursan las Asignaturas: "Aguas Residuales. Generación y Tratamiento" e "Ingeniería Ambiental" en la FACET de la UNT. San Miguel de Tucumán. Año 2008.
- (7) APHA, American Public Health Association, AWWA, American Water Works Association, WPCF, Water Pollution Control Federation. “Métodos Normalizados, para el análisis de aguas potables y residuales”. Editorial Diaz De Santos. Traducción de la 17ª Edición. Año 1992.

Capítulo III: Tratamiento de efluentes de una citrícola.

3.1 Objetivo del trabajo: el tratamiento aeróbico de los efluentes de una citrícola.

Como ya se ha expresado en los párrafos anteriores se conocen muchos datos en referencia al tratamiento anaeróbico, pero en contrario a ello no existen muchas publicaciones con datos de interés y relevancia con respecto a tratamiento aeróbico en el caso de los mismos para las citrícolas.

Por ello el objetivo de este trabajo ha sido realizar los ensayos a escala piloto en un todo de acuerdo a la secuencia indicada para el sistema de barros activados o sea con un sistema totalmente aeróbico y basándose el diseño operativo en dos suposiciones fundamentales en este proceso:

- Estado estacionario: la relación entre el volumen de efluentes y la cantidad de microorganismos en el interior del reactor se mantiene constante
- Mezcla completa: el efluente nuevo a tratar con el agregado de una cantidad determinada de barros activados reciclados se ingresa al reactor donde se mezclan con una gran cantidad de aire. Davolio (2008).

3.2 Procesos aeróbicos para el tratamiento de efluentes.

El método de tratamiento aeróbico mediante lodos activados fue desarrollado en Inglaterra a principios del siglo XX y actualmente es uno de los principales métodos estándar de tratamiento aeróbico de aguas residuales en los países desarrollados y a partir del diseño original se han desarrollado algunas variantes con respecto al proceso.

Este proceso, en un medio netamente aeróbico, es el resultado del proceso vital de los microorganismos que actúan sobre la materia orgánica e inorgánica, que sea fácilmente degradables y que se encuentra suspendidas en el medio constituido por el agua residual contaminada. Davolio (2009).

Los microorganismos actúan transformando a dicha materia en alimento para su ciclo vital o sea su reproducción y multiplicación, formándose así grandes colonias que permanecen en suspensión y que luego deben separarse por sedimentación, en el proceso las moléculas complejas se transforman en otras más sencillas. Davolio (2009).



Foto 3: Reactor biológico de un sistema de barros activados funcionando para el tratamiento de efluentes industriales con aireadores de superficie.
Gentileza Grafa SA.

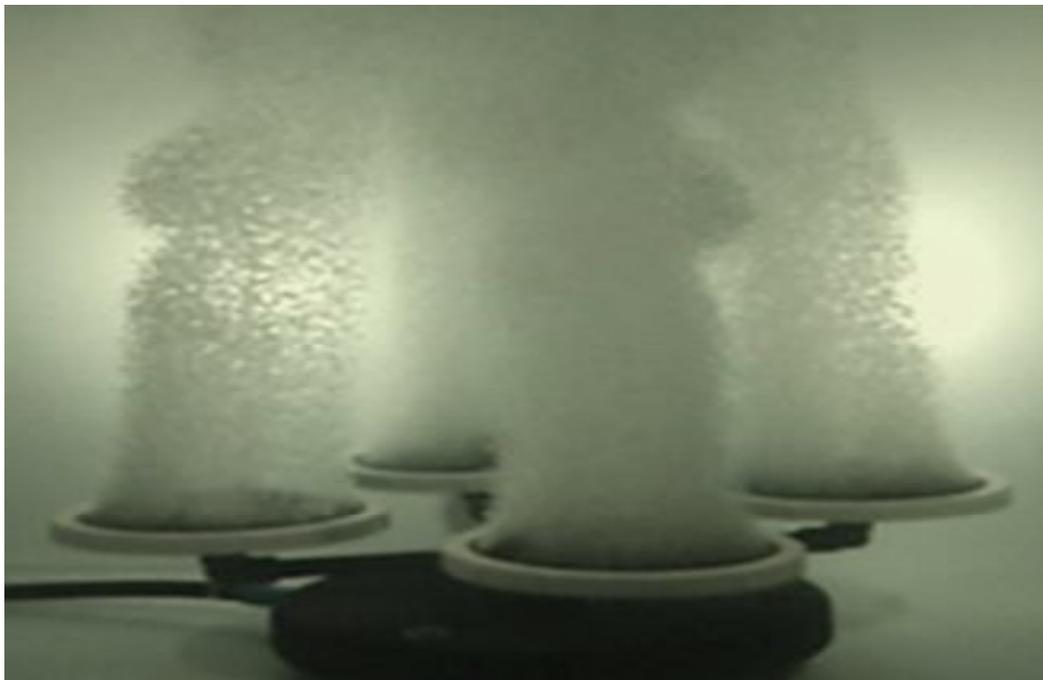


Foto 4: Burbujeo de aire mediante aireadores de fondo.

El efluente a tratar entra al reactor aireado donde previamente se han aclimatados los microorganismos formando aglomeraciones en suspensión, estos en contacto con la materia orgánica nueva contenida en el residual y comienzan un acelerado proceso vital, partiendo de dicha materia orgánica que es metabolizada y pone a su disposición fuentes de Carbono, Hidrógeno y energía, que se convierte en tejido celular, agua y otros productos de oxidación. Davolio (2009).

La masa suspendida en el medio consiste en las colonias de microorganismos, de materia inerte y de materia no biodegradable, los tipos de células vivas que conforman la parte biológica, poseen las características específicas de una cierta masa biológica y varían en función de la composición química del efluente y de las condiciones ambientales. Davolio (2009).

La masa de microorganismos y algunos sólidos suspendidos remanentes son retirados continuamente de las aguas residuales y enviados a la etapa siguiente que se denomina sedimentación secundaria, operación física mediante la cual estos se depositan en el fondo, desde donde son retirados en forma de lodos o barros concentrados.

El nombre de barros activados proviene del hecho que en el medio se forman grandes colonias de microorganismos que permanecen en suspensión, mientras se alimentan y cumplen con su ciclo vital o sea su actividad está relacionada con su propia existencia, empleando como alimento la materia orgánica presente. Davolio (2009).

Este proceso es relativamente rápido cuando la concentración de microorganismos es elevada, por ello se diseña un retorno de una cantidad importante de barros luego de la sedimentación secundaria.

Estos barros estabilizados se disponen en playas de secado y pueden ser utilizados como mejoradores de suelos agrícolas, dado que les aportan a estos algunas propiedades como porosidad y esponjosidad. Paz Castro (2007).

Sin llegar a ser un verdadero abono, el material desecado recibe el nombre de mejorador de suelo, es bastante rico en Fósforo y algunos otros nutrientes, por dichas razones en algunos países americanos, europeos y asiáticos son muy apreciados, ampliamente empleados y depositados sobre la tierra en los campos. Paz Castro (2007).

Las plantas de tratamiento diseñadas en base al proceso de barros activados incorporan Oxígeno continuamente al sistema mediante aireadores de superficie o de fondo, con esta agitación se logra que en el sistema haya una mezcla completa por agitación, del efluente con el aire. Davolio (2009).

Cuando se opera con difusores de fondo el oxígeno se suministra mediante el uso de compresores de alta capacidad y el aire sale a través de difusores de burbuja fina, en el caso de los aireadores mecánicos de superficie el gas es tomado directamente de la atmósfera circundante. Davolio (2009).

La masa de microorganismos activos presentes en el sistema, tiene la capacidad de estabilizar los residuos biodegradables en medio aerobio, transformándolos en compuestos más simples e inocuos.



Foto 5: Sedimentador secundario rectangular con las aspas que se desplazan muy lentamente y arrastran los barros en el fondo. Gentileza Grafa SA.

De las células que se han retirado de las sedimentadas aproximadamente un tercio se recircula para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema y se envía a las playas de secado. Ferrero (1974).

En el reactor de barros activados, con la mezcla de las nuevas células con las antiguas, o sea las que son realimentadas al medio desde el sedimentador secundario, se mantiene una concentración elevada y constante de microorganismos activos en el sistema con lo

cual la actividad biológica no decae y el proceso se realiza siempre con la misma eficacia. Davolio (2009).



Foto 6: Sedimentador circular, los barros se acumulan sobre el fondo. Gentileza Arcor.



Foto 7: Sedimentador circular funcionando. Gentileza Arcor.

Los dos tercios de células que se descartan se considera que son las que se corresponden a la multiplicación y crecimiento del tejido celular en el reactor y por lo tanto es un excedente de microorganismos presentes en el mismo, por ello debe preverse una forma de eliminar el exceso de sólidos biológicos producidos. Ferrero (1974).

El diseño de una planta de tratamiento por barros activados se basa en el tiempo en el cual el barro es mantenido en el sistema: tiempo de retención y en la cantidad de alimento provisto a las bacterias en el reactor aireado:

$$\text{Relación } \frac{A}{M} = \frac{\text{Alimento}}{\text{Microorganismos}}$$

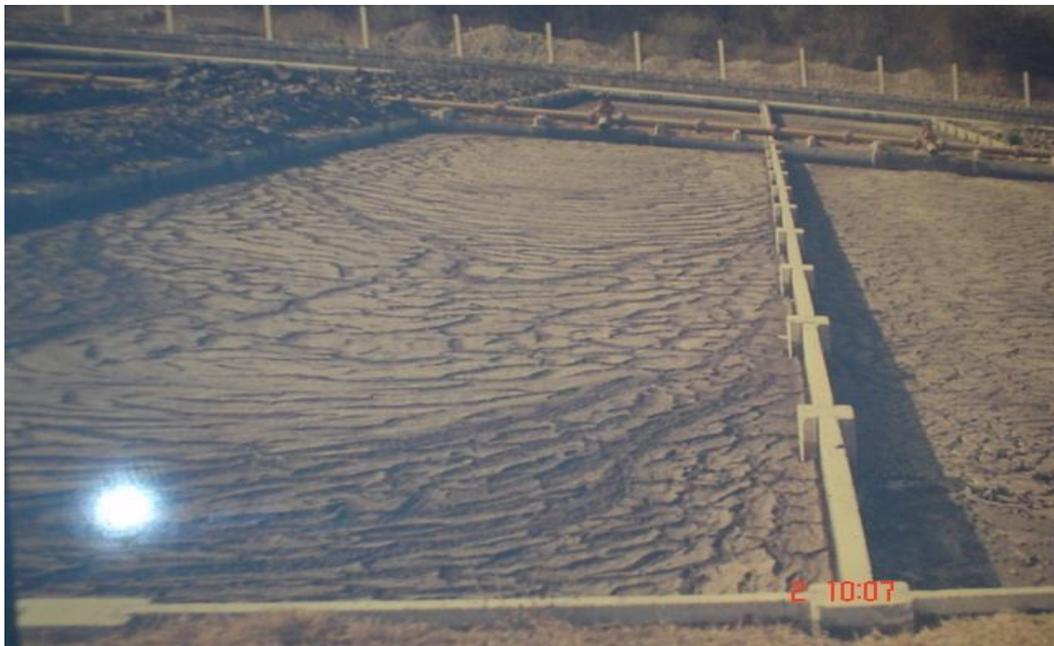


Foto 8: Playa de secado con material seco de barros concentrados provenientes del sedimentador secundario. Gentileza Grafa SA.

3.3 Metabolismo del sistema microbiológico.

La vigorosa aireación, acompañada por la agitación y la recirculación de barros crean un ambiente ideal para el crecimiento de numerosos microorganismos aeróbicos, al mismo tiempo que en el mismo proceso se inhibe el desarrollo de los otros. Albarracín (2012).

También pueden encontrarse presentes en el sistema otras especies: hongos, protozoarios, rotíferos y nematodos, que son comunes en los barros activados, pero no obstante la presencia de los otros microorganismos, las bacterias son consideradas los

mayores operadoras del consumo de materia orgánica del efluente y por lo tanto las verdaderas responsables de la disminución de la DBO, con lo cual los procesos serían:

- Síntesis como aprovechamiento de una porción del efluente como alimento, para la producción de nuevas células
- Respiración como liberación de la energía producida a través de la conversión del alimento a nuevos compuestos más simples y de bajo contenido energético, típicamente: CO₂, H₂O y algunas formas oxidadas del Nitrógeno. Albarracín (2012).

Las especies predominantes dependen de las características del efluente, de las condiciones ambientales, del diseño del proceso y del modo de operación de la planta, si el proceso de aireación es muy intenso y prolongado suelen aparecer cantidades apreciables de los rotíferos y nematodos.

Las bacterias nitrificantes tienen la capacidad de consumir aún algunos compuestos inorgánicos para su alimentación y desarrollo, estas están presentes en el medio en menores cantidades y su accionar comienza luego que está avanzado el proceso de degradación de la materia carbonácea.

La mayor o menor eficiencia de un proceso de barros activados está determinado por la rapidez con la cual se produce el metabolismo de todas las especies de los microorganismos presentes. Albarracín (2012).

Las células pueden también usar su propio protoplasma como sustrato para proveer la energía necesaria para mantenerse vivas, este proceso se conoce como “respiración endógena” y es propio de un sistema donde por algún motivo el alimento escasea. Ramhalo (1983).

El sistema mantiene así suficiente energía para continuar su ciclo vital independientemente de la presencia de sustrato fuera de la célula, la aireación extendida permite que el proceso opere aun habiendo ingresado en la etapa de respiración endógena, por lo tanto el crecimiento de microorganismos no cesa, pero es excedido por la degradación celular provocando durante este tiempo un decrecimiento neto en la masa celular microbiana del sistema. Ramhalo (1983).

3.4 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) Albarracín Patricia María, Davolio Franco, Mena Zolorzano Rosa M., Viera Héctor Ariel. “Diseño de un proceso para tratamiento de efluentes de citrícola por el sistema de barros activados”. VI Jornadas de Ciencia y Tecnología de las Facultades de Ingeniería del NOA. ISSN: 3367-5072. UNJu. San Salvador de Jujuy. Noviembre 2010.
- (2) Albarracín Patricia María, Davolio Franco, Viera Héctor Ariel. Conferencia: “Tratamiento aeróbico de efluentes altamente contaminantes”. “Exifacet 2012”. FACET UNT. San Miguel de Tucumán. Mayo 2012.
- (3) Azevedo Netto José M. “Sistemas de Esgotos Sanitarios” Edición CETESB, Companhia de Tecnología de saneamiento Ambiental. Sao Paulo. Brasil. Año 1977.
- (4) Barnes George E. “Tratamiento de Aguas Negras y Desechos Industriales”. Editorial UTEHA. México. Año (1967).
- (5) Davolio Franco. Conferencia “El Tratamiento de Efluentes de Citrícola por Barros Activados con Aireación Extendida” Reunión Científica CEDIA. FRT UTN. San Miguel de Tucumán. Noviembre 2009.
- (6) Ferrero José M. “Depuración Biológica de las Aguas”. Editorial Alhambra. ISBN 84-2'05-0483-1. España. Año 1974.
- (7) Montanaro Roberto. “Producción de Biogás. Plantas Centralizadas y Simplificadas”. Córdoba. Argentina. Año 2006.
- (8) Paz Castro Carmen, Henríquez Olivia, Rodolfo Freres. “Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago”. Revista de Geografía Norte Grande. Santiago de Chile. Chile. Año 2007.
- (9) Romero Rojas Jairo Alberto. “Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización”. Editorial Alfaomega. ISBN 970-15-0403-8. Año 1999.
- (10) Ramhalo Rubén S. “Tratamiento de Aguas Residuales”. Editorial Reverté SA. Quebec. Canadá. Año 1983.

Capítulo IV: El tratamiento por barros activados

4.1 Etapas de un proceso de barros activados

Las etapas propia del proceso aeróbico denominado de barros activados son las de:

- Pretratamiento: operaciones preliminares para retirar sólidos gruesos, flotantes y líquidos que pueden interferir el proceso de aireación.
- Tratamiento Primario: separación de materiales de lenta sedimentación.
- Tratamiento Secundario: Proceso aeróbico de biodigestión de la materia orgánica.
- Fuente de aireación aplicada: aire comprimido con difusores de fondo o aireación mecánica superficial para proveer adecuado aporte de oxígeno a la mezcla líquida.
- Sedimentador secundario: para separar parte de los sólidos biológicos o barros activados del efluente tratado.
- Sistema de bombeo: para retirar los sólidos biológicos separados en el sedimentador secundario.
- Reciclado: realimentar en un tercio de los sólidos biológicos al reactor aeróbico.
- Descarga de los restantes: sólidos biológicos del sistema a playa de secado o a biodigestores anaeróbicos. Davolio (2004).



Foto 9: Efluente de una citrícola en Tucumán con color característico.

4.2 Secuencia operativa del proceso de tratamiento de los efluentes de citrícola.

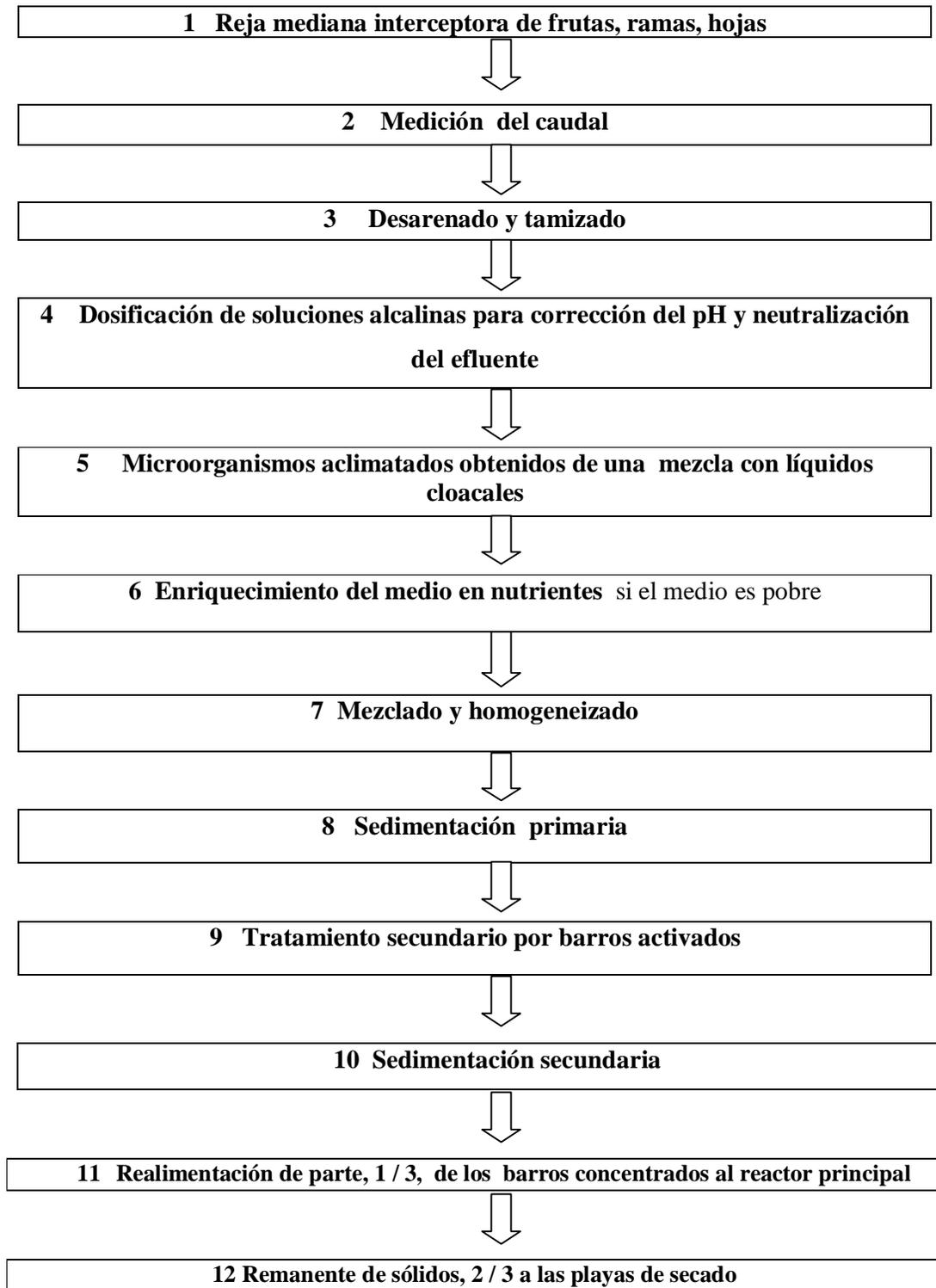


Figura 7: Secuencia método aeróbico de barros activados. Davolio (2008)

4.3 Objetivo: El tratamiento aeróbico de los efluentes de una citrícola.

Como ya se ha expresado en los párrafos anteriores se conocen muchos datos en referencia al tratamiento anaeróbico, pero en contrario a ello no existen muchas publicaciones con datos de interés y relevancia con respecto a tratamiento aeróbico en el caso de los mismos para las citrícolas.

Por ello el objetivo de este trabajo ha sido realizar los ensayos a escala piloto en un todo de acuerdo a la secuencia indicada para el sistema de barros activados o sea con un sistema totalmente aeróbico y basándose el diseño operativo en dos suposiciones fundamentales en este proceso:

- Estado estacionario: la relación entre el volumen de efluentes y la cantidad de microorganismos en el interior del reactor se mantiene constante
- Mezcla completa: el efluente nuevo a tratar con el agregado de una cantidad determinada de barros activados reciclados se ingresa al reactor donde se mezclan con una gran cantidad de aire. Metcalf & Eddy (1998).

4.4 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) Davolio Franco. "Tratamiento de los Efluentes de las Citrícolas", "IIas Jornadas Universitarias de Ingeniería, JUI 04" Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas UNCa. Catamarca. Octubre 2004.
- (2) Davolio Franco. "Barros Activados. Sistemas de Aireación. Ingeniería: Cálculos y Diseño" Cuadernillo de "Aguas Residuales. Generación y Tratamiento". Alumnos de "Ingeniería Ambiental". FACET UNT. Año 2008.
- (3) Metcalf & Eddy. "Ingeniería de las Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización". Editorial Mc Graw Hill. Madrid. España. ISBN 84-481-1607-0. Año 1998.

Capítulo V: Los efluentes de una citrícola

5.1 Caracterización de los efluentes de una citrícola.

Los efluentes de las citrícolas están caracterizados por los siguientes parámetros:

Parámetro	Mínimo	Máximo	Unidad
Q	60.000	100.000	litros / hora
DBO ₅ 20°C	2.000	4.300	mg / litro
DQO	4.000	6.000	mg / litro
OD	0	0	mg / litro
OC	1.000	≥ 1.000	mg / litro
Relación: $\frac{DQO}{DBO}$	2 : 1	1,5 : 1	$\frac{DQO}{DBO}$
pH residuales crudos	2,8	4,5	Unidades de pH
pH residuales luego del encalado	5,5	6,5 – 6,8	Unidades de pH
Sólidos flotantes	50	100	ml / litro
Sólidos sedimentables	10	100	ml / litro
Sólidos totales	menor a 500	≈ 500	mg / litro
Sólidos fijos	≈ 25% de los totales	≈ 25% de los totales	mg / litro
Sólidos volátiles	≈ 75% de los totales	≈ 75% de los totales	mg / litro

Tabla 1: Tipificación de los efluentes líquidos de una citrícola. Luján (1995).

5.2 El tratamiento de efluentes de una citrícola.

El efluente de las citrícolas se genera en parte del proceso de lavado de la fruta fresca que se prepara para empaque y el resto del mismo, de la producción de los derivados industriales del limón, el líquido tiene la coloración amarilla característica del cítrico.

A la salida de la planta industrial las aguas suelen arrastrar desechos gruesos tales como fruta en mal estado, hojas y trozos de ramas, por ello la primera etapa del tratamiento consiste en hacer pasar todo el efluente a través de una reja, separar a dichos

materiales, luego de lo cual el líquido ingresa a un desarenador, que inclusive puede estar incorporado al mismo canal de reja, donde el tiempo de permanencia es breve, de tres a cinco minutos, para permitir sedimentar los materiales de arrastre y de alta densidad. Albarracín y otro (2005).

A continuación el líquido que posee un pH ácido muy bajo, comprendido entre 2,5 y 3,8 unidades, tiene que ser neutralizado, para ello es común el empleo del OCa, óxido de calcio o industrialmente cal viva, que con agua forma la lechada de cal.

Se trata de un producto de bajo costo y posee una alta eficiencia en la neutralización, reacciona fácilmente con los ácidos y hace disminuir la acidez del medio, aumentar el pH a valores lo más próximos al valor neutro y facilita así el desarrollo de los microorganismos. Albarracín y otro (2005).



Foto 10: Canal de conducción de los efluentes de una citrícola para riego.
Gentileza Citrusvil.

Para ello luego del encalado se conduce el líquido a un tanque de mezclado, donde el líquido recorre un camino zigzagueante con lo cual se logra una homogenización del efluente, a pesar de que en este elemento de la planta se tiene un pequeño tiempo de residencia, este es suficiente como para aumentar el contacto del efluente con la cal, en breve período de contacto se produce un cambio notable de color en el efluente que permite visualizar el avance del proceso de neutralización. Albarracín y otro (2005).

El efluente aún arrastra material orgánico en suspensión, este está constituido por partículas livianas pero gruesas y de muy lenta degradación, por lo cual es inconveniente su ingreso al reactor dado que no llegarían a ser digerida por los microorganismos en el tiempo de residencia del efluente.



Foto 11: Encalado del efluente, se observa el cambio de color progresivo en la cámara de mezcla por el contacto entre este y la cal. Gentileza Citromax.



Foto 12: Tamiz separando pulpa de lenta degradación. Gentileza Citromax.

En el reactor, este material se separa con un tamiz rotatorio fino y se dispone sobre terreno para producir compost o como alternativa puede ser agregado a otros residuos para que la mezcla resultante sea empleada como alimento para el ganado por su elevado contenido de proteínas. Albarracín y otros (2008).

Luego que el efluente ha completado el ciclo de tratamiento preliminar y de tratamiento primario, ambas etapas sirven para un acondicionamiento físico del líquido, a continuación este ingresa a la etapa del tratamiento secundario y de ser necesario a un terciario, ambas normalmente son de tipo biológico.

5.3 El reactor aireado

En los reactores de barros activados es común la formación de espumas densas y el crecimiento de material filamentoso, que se pueden observar en el tanque aeróbico y también en el sedimentador secundario.

Las espumas flotantes pueden controlarse mediante el empleo de duchas de agua fijas que las hacen disminuir sensiblemente, mientras para evitar la proliferación de los microorganismos filamentosos debe existir el mayor control posible de la aireación dado que el mayor nivel de Oxígeno limita su crecimiento, la proliferación de estos microorganismos puede dificultar el proceso posterior de sedimentación secundaria.

La eficiencia en un reactor de barros activados depende de la cantidad de masa biológica que está permanentemente presente en el reactor, de la edad de la población microbiana, de la proliferación de bacterias filamentosas, de la disponibilidad de Oxígeno, de la temperatura, etcétera.

5.4 El sedimentador secundario.

Si los microorganismos en el reactor son jóvenes no poseen la capacidad de consumir todo el sustrato disponible, por lo cual no contribuyen a una significativa remoción de la DBO, los floc no crecen ni aumentan de tamaño, a consecuencia de ello no sedimentan rápidamente, en consecuencia se notará un incremento de la DBO y de sólidos en suspensión en el efluente final.

Si el proceso se opera con un barro viejo, el nivel de actividad de los microorganismos disminuye y la demanda de sustrato y de oxígeno decrece, en este caso hay una

disminución de la actividad, el floc que se forma es pequeño y pesado por lo cual sedimenta rápidamente, de esta forma parte del material en suspensión y que debería sedimentar, no se adhiere a los floc y queda en suspensión.

En consecuencia a lo expresado, operando con microorganismos muy jóvenes o muy viejos se produce una baja demanda de sustrato, estos barros no son capaces de asimilar todo el alimento que tienen disponible, de allí la gran importancia de reciclar una cantidad importante de las colonias en suspensión, separadas en el sedimentador secundario para conservar una concentración elevada de ellas en el reactor aeróbico.

5.5 Materiales y método del diseño del tratamiento a escala piloto.

En la figura 8 está representado el esquema funcional del proceso diseñado y construido para ser operado en corridas de ensayo a nivel de planta piloto.

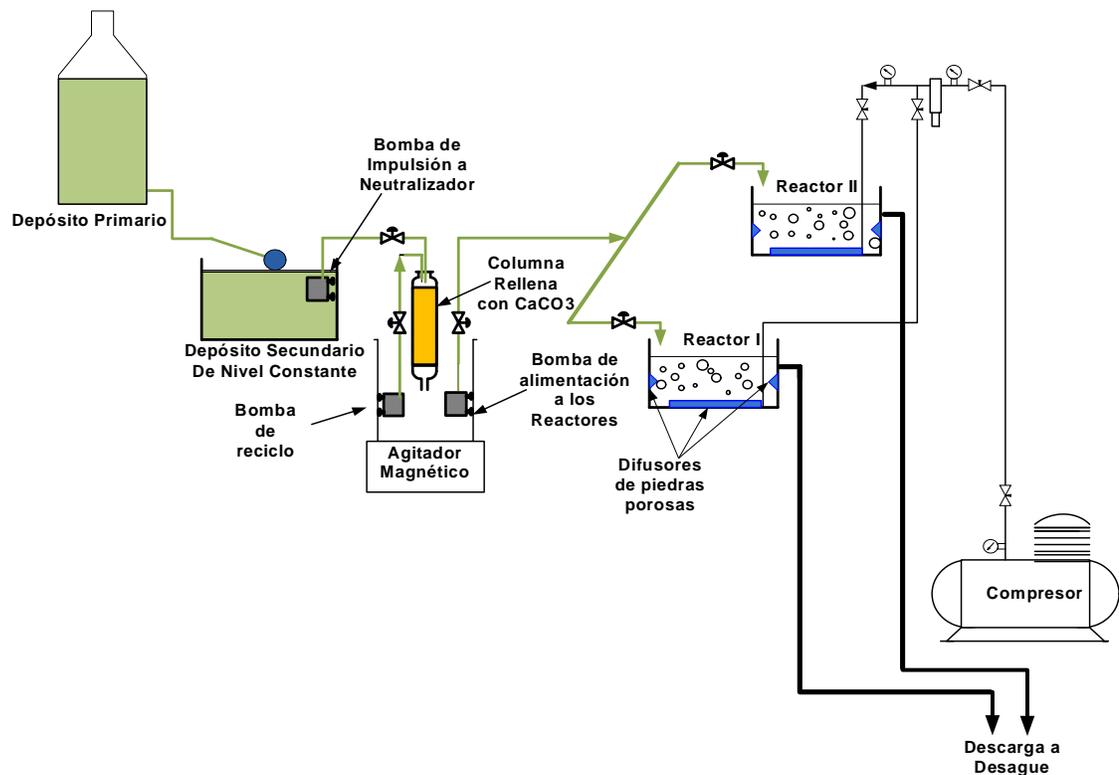


Figura 8: Esquema del proceso de barros activados a escala piloto.

Al efluente crudo, extraído directamente del canal de salida de empresas citrícolas del medio, se lo ha filtrado a los efectos de eliminar todos los sólidos orgánicos gruesos en suspensión, por cuanto la degradación biológica de los mismos es muy lenta y su

presencia afectaría el proceso de depuración aumentando excesivamente el tiempo de residencia de las aguas a depurar en el reactor. Albarracín y otros (2008).

El efluente, solamente filtrado, se ingresa al “depósito primario”, cuya función es el almacenaje temporario del mismo, desde ese recipiente se alimenta al “depósito secundario de nivel constante” cuya función es mantener un nivel constante y de esa forma garantizar igual caudal, desde este recipiente se opera la bomba que envía el líquido a la “columna de neutralización” rellena de un neutralizante de la acidez del medio.

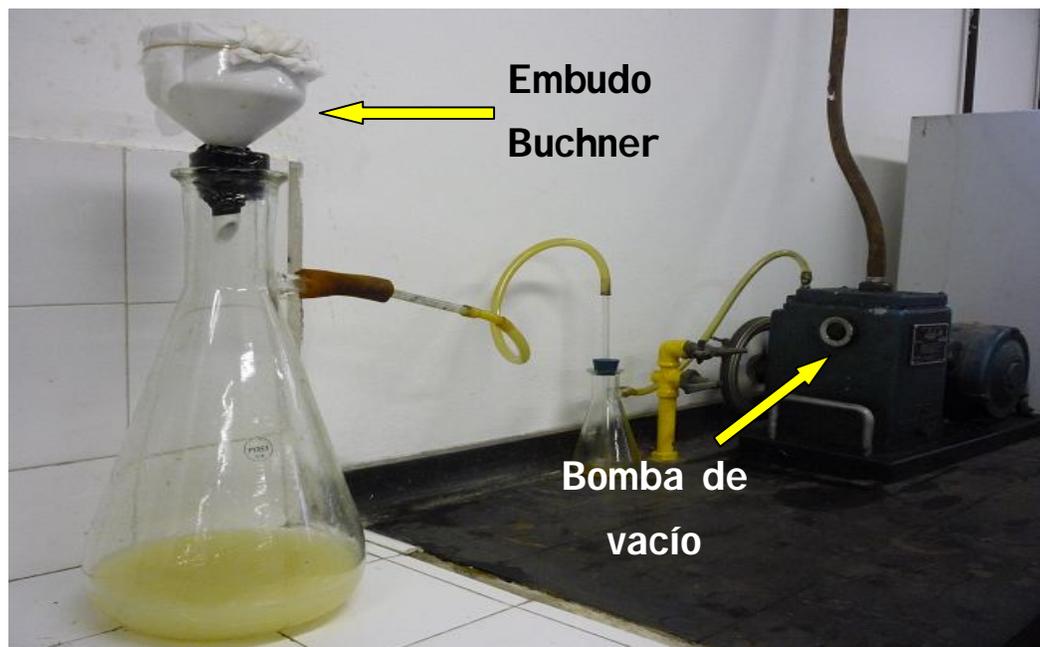


Foto 13: Sistema de filtración al vacío para separar la materia orgánica de lenta biodegradación. Laboratorio QGeI.

La “columna de neutralización” es un tubo alargado relleno de CaCO_3 en piedra, donde el efluente que ingresa, que tiene un pH ácido, se pone en contacto con el carbonato de calcio y se neutraliza parcialmente, lográndose así que el líquido egrese con un pH corregido a valores de 6,5 a 7,8, con lo cual los microorganismos pueden desarrollarse con mayor facilidad en el medio casi neutro.

El efluente neutralizado se hace pasar a un nuevo recipiente que cumple la función de “tanque de contacto” y cuya misión es de homogeneizar la mezcla en un tiempo de residencia breve, en este recipiente hay un sistema de agitación permanente del líquido y desde allí se lo envía a los reactores mediante el empleo de bombas.



Foto 14: Materia orgánica: pulpa y hollejo del efluente filtrado. Laboratorio QGeI.

Una primera bomba es de retorno y su función es reciclar a la parte del líquido que impulsa enviándolo a una segunda pasada a través de la columna rellena donde se incrementa la neutralización, mientras la segunda bomba también impulsa otra parte del efluente, pero este último para alimentar a las dos cubas que cumplen la función de “reactores aireados de barros activados”.



Foto 15: Vista del compresor y del sistema de regulación de la presión del aire.
Laboratorio QGeI.

Los reactores aireados poseen difusores porosos de aire en el fondo, con lo cual se logra un burbujeo constante con un tamaño uniforme de burbujas que mantienen a todo el sistema agitado, de tal forma que se evita la sedimentación del floc o aglomeraciones grandes de microorganismos que se unen formando colonias en suspensión en la mezcla, manteniéndose todo el sistema completamente homogéneo.

El volumen de aire necesario para el proceso es suministrado mediante el empleo de un compresor, desde el tablero de control se efectúan las regulaciones correspondientes, para lograr que el caudal del gas ingresante sea constante y se introduzca al sistema siempre con la misma presión, con lo cual se obtiene un burbujeo y un tamaño de burbujas lo más uniforme posible.

5.6 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) Albarracín Patricia María, Barnes Norma Graciela, Davolio Franco, y Genta Hugo Dante. “Una propuesta para elaborar un alimento balanceado de residuos de la industria cítrica” Primeras Jornadas Universitarias del Norte Grande Argentino sobre Medioambiente. JUNGrA 2008. Centro Cultural Universitario Eugenio Virla. San Miguel de Tucumán. Argentina. ISBN 978-987-1366-23-1. Octubre 2008.
- (2) Albarracín P, Barnes N, Davolio F, Genta H, Lescano N, Llanos C, Paz D, Prieto R. “Evaluación nutricional de residuos de la industria citrícola de la provincia de Tucumán”. “Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente”. FRT UTN. Año IX, Número XI. ISSN 1667 – 457X. Año 2008.
- (3) Albarracín Patricia María y Franco Davolio. “Tratamiento de los Efluentes de las Cítrícolas en Tucumán”. IIº Jornadas Universitarias de Ingeniería, JUI '04. Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, de la UNCa. San Fernando del Valle de Catamarca. Octubre 2004. “Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente”, Año IV, Número IV. ISSN 1667 – 457X. FRT UTN. San Miguel de Tucumán. Año 2005.
- (4) Davolio Franco, Viapiano José Santiago. “Enseñanza Práctica de Diseño de Plantas de Tratamiento de Residuales Líquidos”. CD del “II Congreso de Educación en Ciencia y Tecnología” Universidad Nacional de Catamarca. Catamarca. Junio 2007.
- (5) Degremont. “Manual Técnico del Agua”. Francia. ISBN 84-400-6039-4. Año 1973.
- (6) Luján Juan Carlos. “Análisis de los Efluentes de una Cítrícola”. Laboratorio CEDIA. FRT UTN. Año 1995.

- (7) Valdez Pedro, Guerrero Barbarita, Nieves Gertrudis, De La Torre Verónica.
“Tratamiento de las Aguas Residuales Cítricas por Vía Anaeróbica”. Universidad
Nacional Autónoma de México. Méjico. Año 1994.

Capítulo VI: Funcionamiento del Sistema Piloto.

6.1 Condiciones operativas necesarias en el proceso de barros activados.

Las operaciones en el sistema de depuración dependen principalmente de la masa de microorganismos presentes y que se encuentren aclimatados en el sistema, para ello hay que proceder a cultivar y lograr colonias que se puedan desarrollar en el medio disponible, en este caso el efluente de citrícolas.

Para ello se procedió a la extracción de efluentes cloacales, medio en el cual sobreabundan microorganismos de diferentes clases ya aclimatados en esa mezcla, a continuación se realizó la filtración de los mismos y a su posterior siembra en un nuevo medio aireado.



Foto 16: Extracción de efluentes cloacales crudos. Localidad de Ranchillos.

A medida que se produce un progreso apreciable en el proceso de aclimatación de los microorganismos al nuevo medio se visualizan cambios importantes de color en el mismo sometido a aireación, se procede a retirar una parte de la mezcla y se reemplaza esa porción incorporando cantidades crecientes del efluente industrial fresco ya neutralizado, de ser necesario en esta etapa inicial se efectúa el agregado de algunos nutrientes.

El aire se insufla al medio con un aireador de burbujeo que tiene a la salida un difusor de piedra porosa y se encuentra adherido al fondo del pequeño reactor. Ver Figura 8.

El difusor de aire tiene la función de generar burbujas de pequeño diámetro, con lo cual el proceso aumenta su eficacia por la alta transferencia de Oxígeno que se genera a través de la superficie de interfase entre la burbuja de gas y el líquido.

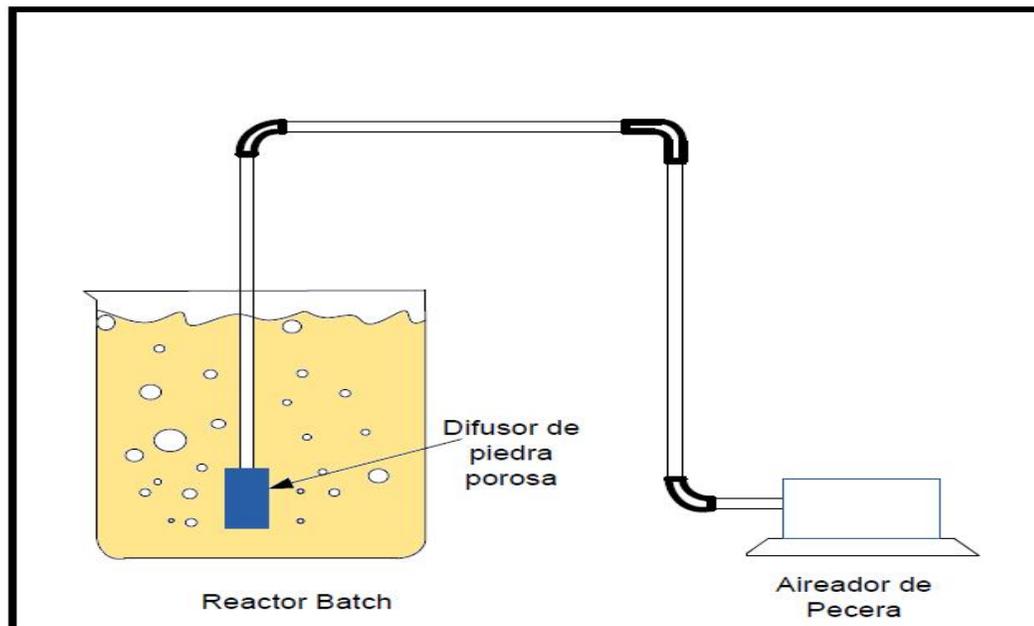


Figura 9: Esquema operativo del sistema para aclimatación de microorganismos



Foto 17: Mezcla inicial de efluente con cloacales con burbujeo, el avance del proceso de aclimatación se nota por la variación de la coloración. Laboratorio QGeI.

La aclimatación de los microorganismos es esencial a los efectos de que ellos den comienzo a su ciclo vital en la mezcla de ambos líquidos, el comienzo del proceso es con efluente cloacal puro y a continuación se procede a aumentar paulatinamente la proporción de efluente de citrícola, previamente neutralizado, hasta lograr la supervivencia de las colonias en el medio modificado.

En el proceso de barros activados se obtiene la mayor eficiencia cuando la masa de microorganismos presente en el sistema se renueva totalmente en forma periódica, de tal forma que en el ciclo vital esta masa no sea ni muy joven ni muy vieja.

La calidad de las bacterias que conforman los floc de la mezcla, o sea las colonias de microorganismos en suspensión, en el proceso de degradación de la materia orgánica, es más importante que la cantidad de microorganismos presentes en el sistema, por ello es preferible tener un menor número de colonias pero muy activas, antes que tener grandísimas cantidades de las mismas pero de actividad reducida.

La operación en el proceso está limitada a un determinado rango de concentración de sólidos en suspensión y de los tiempos de residencia celular en el reactor principal, para ello es necesario operar con:

- Un tiempo de residencia de la mezcla suficiente para que los microorganismos puedan desarrollar su actividad de metabolizar el sustrato.
- Al mismo tiempo que la residencia celular sea suficiente para la multiplicación adecuada de los microorganismos y por lo tanto poseer una antigüedad adecuada del floc.
- Cantidad de microorganismos en cantidad y calidad suficientes como para remover y metabolizar la totalidad de la carga orgánica presente en la mezcla en el menor tiempo posible.
- El floc que se encuentra en suspensión debe tener una suficiente velocidad de sedimentación o sea que se separe a la velocidad adecuada como para producir en el proceso el arrastre de la mayoría de las partículas en suspensión.
- Los microorganismos en el barro recirculado deben tener similares características de cantidad y calidad, por lo tanto tengan aun suficiente capacidad para continuar alimentándose del sustrato presente en el reactor. Erijman (2011).

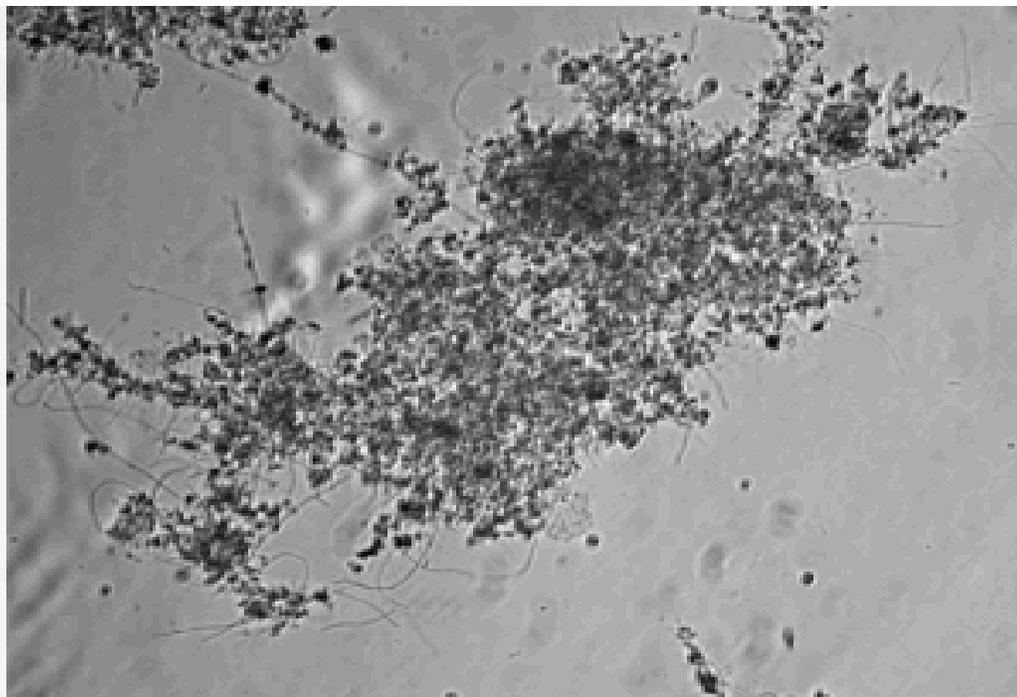


Foto 18: Floc de microorganismos y filamentos que se observan con un microscopio en un reactor de barros activados.

Cuando los microorganismos tienen una muy alta actividad aumenta en forma significativa el requerimiento de alimento y de oxígeno para mantener una actividad metabólica sostenida, pero si no poseen la capacidad suficiente como para consumir todo el sustrato disponible no contribuyen a una suficiente remoción de la DBO, su nivel de actividad disminuye y los floc no crecen con rapidez y por ello no se separan del medio y no sedimentan fácilmente. Berzosa Jimenez (2013).

Con una población adecuada de microorganismos esta es una de las principales ventajas del sistema de barros activados, el poder absorber cambios importantes de variación de la concentración en la cantidad de alimento que ingresa al reactor aeróbico, situación que suele ocurrir a lo largo del ciclo de producción. Metcalf – Eddy (1977).

Por el contrario cuando la aireación es prolongada y los digestores aeróbicos operan con poco sustrato disponible para los microorganismos, se produce un proceso denominado respiración endógena, que implica la muerte de células, en este caso estas liberan su materia orgánica que es empleada como alimento por los organismos restantes.

6.2 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) Berzoza Jimenez Martín. “Causa y Control de Filamentosas en Lodos Activados” Serquimsa SA. Ingeniería Transparente. Colombia. Año 2013.
- (2) Erijman Leonardo, Figuerola Eva L. M. F, Guerrero Leandro D, Ayarza Joaquín M. “Impacto de los recientes avances en el análisis de comunidades microbianas sobre el control del proceso de tratamiento de efluentes”. Revista Argentina de Microbiología. Volumen 43, n°2. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Junio 2011.
- (3) Metcalf – Eddy Inc. “Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales”. ISBN 84-335-6416-1. Editorial Labor SA. Mayo 1977.

Capítulo VII: Los parámetros de diseño.

7.1 El reactor aeróbico elemento principal del proceso.

Finalizada la construcción de la instalación se realizaron dos pruebas preliminares a los efectos de comprobar la funcionalidad del sistema:

1° Ensayo de burbujeo: este ensayo se ha realizado con alimentación al sistema totalmente armado, llenado con agua y en condiciones de funcionamiento normal, la observación del mismo en operación permite la verificación de la existencia de posibles pérdidas en las válvulas o conexiones, comprobar el funcionamiento de la bomba que alimenta a las cubas y de igual forma la de retorno, además del sistema de control y de conducción de aire por cañerías y accesorios.

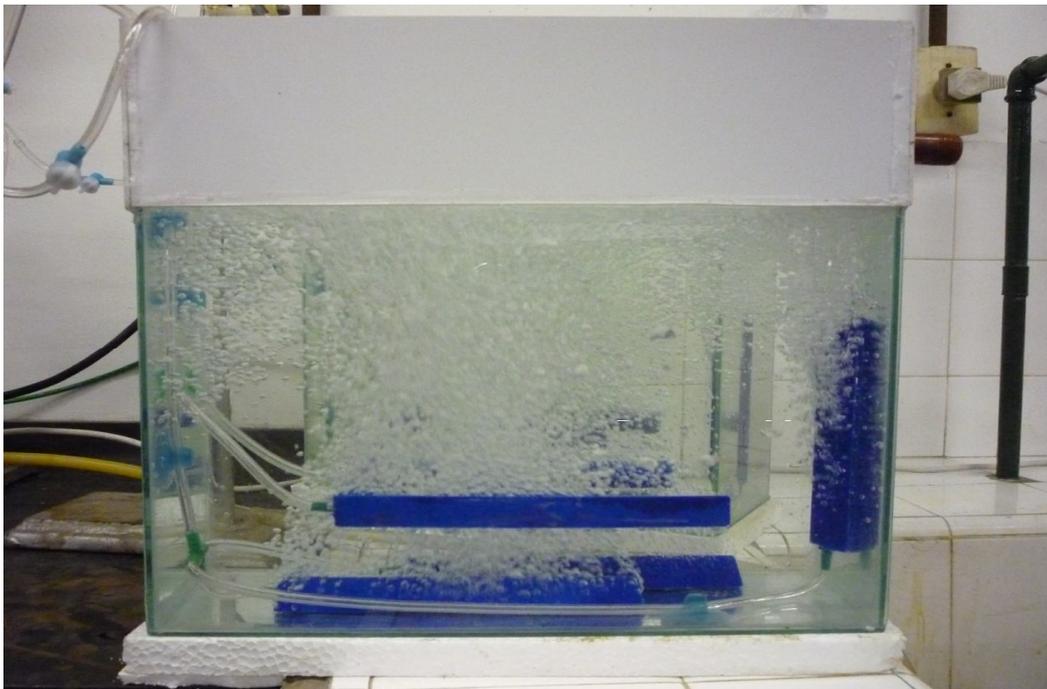
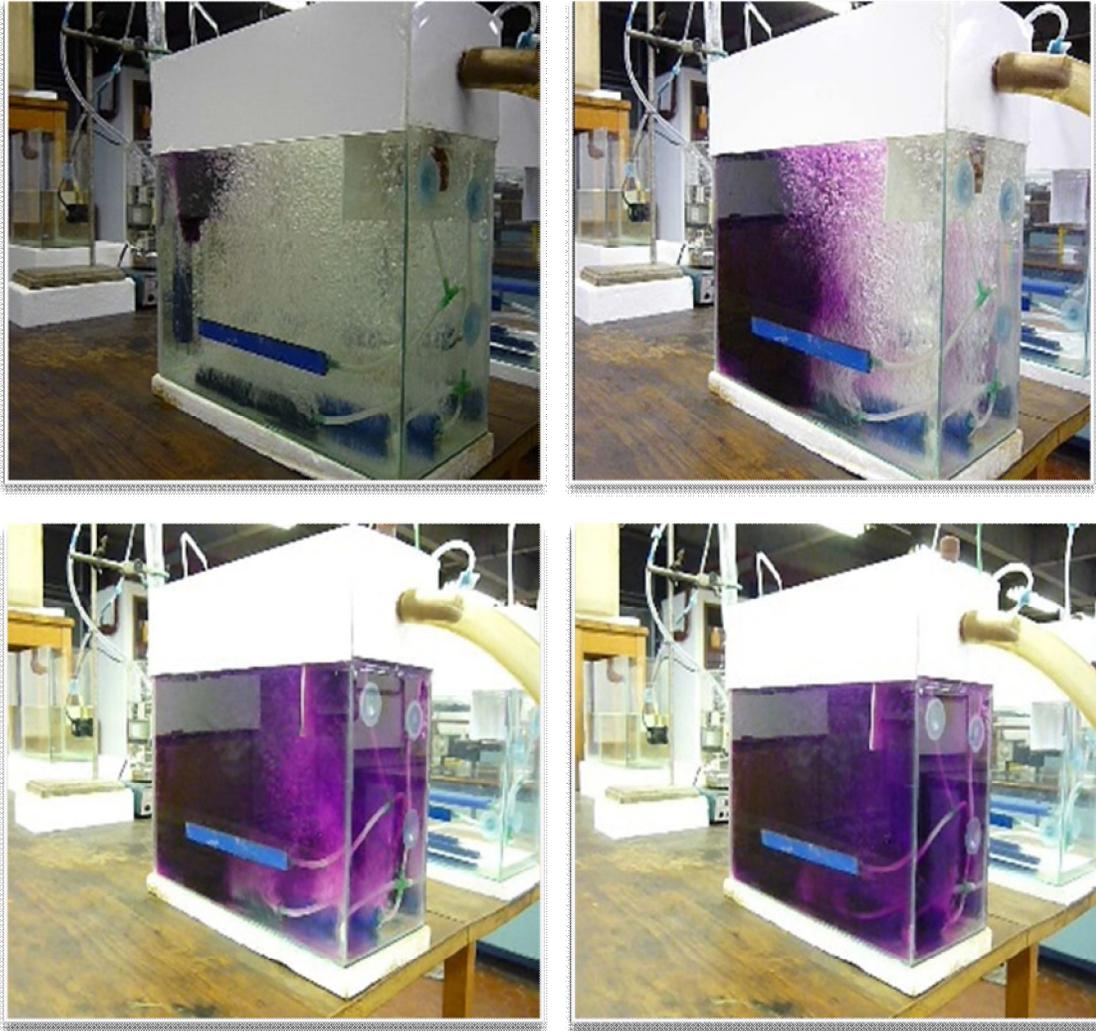


Foto 19: Burbujeo de aire del fondo en el reactor principal, manteniendo la presión constante, el sistema es totalmente aeróbico. Laboratorio QGeI.

2° El ensayo de la prueba de agitación, de mezclado y de homogenización del líquido dentro de los dos reactores, se realiza colocando en el líquido ingresante a las cubas un colorante que cumpla la función de trazador.

En este ensayo se empleó como sustancia coloreada una solución de KMnO_4 , la misma al mezclarse con el agua permitió evaluar el tiempo necesario para alcanzar un

mezclado completo, acompañado por la uniformidad en la coloración en todo el reactor.



Fotos 20: Prueba de mezcla completa en los reactores aeróbicos. Laboratorio QGeI.

7.2 Obtención experimental de los parámetros de diseño

El diseño en un proceso totalmente aeróbico: el sistema de barros activados donde los verdaderos operadores son los microorganismos aeróbicos que actúan, un dato de suma importancia es el de conocer el requerimiento de oxígeno de la población microbiana, la producción de células en el sistema y la velocidad de remoción de la materia orgánica ingresante en el afluente contaminado al reactor. Crites (2000).

Para obtener los valores indicados es necesaria la determinación experimental de coeficientes cinéticos, que se obtiene a partir de balances de materiales con los cuales se diseñan modelos matemáticos, a partir de los cuales se logran los parámetros que

permiten dimensionar los equipos de aireación, el tamaño del reactor aeróbico y finalmente las instalaciones para el manejo de los barros provenientes de la sedimentación secundaria.

El tratamiento de efluentes provenientes del proceso industrial de la industria citrícola ha sido ampliamente desarrollado pero con métodos anaeróbicos y existe mucha información científica en la bibliografía, la redacción de experiencias y de resultados obtenidos al respecto, con lo cual se pueden rediseñar sistemas.



Foto 21: Instalación completa funcionando en ensayo en blanco. Laboratorio QGeI.

No obstante como ya se ha indicado no ocurre lo mismo con el desarrollo de métodos aeróbicos, que es el objetivo de este proceso de investigación, tema sobre el cual en la práctica no existe información en publicaciones científicas, ni antecedentes de resultados, por ello la necesidad de obtener datos experimentales propios, sin parámetros referenciales con las cuales efectuar la comparación con los obtenidos.

Por lo expuesto es que los datos que se presentan son el resultado de experiencias propias que se han logrado trabajando con efluentes proveniente de diferentes industrias citrícolas locales, con lo cual los valores resultantes no reflejan el resultado del tipo de efluentes de una sola empresa, sino los de varias.



Foto 22: Sistema completo operando con efluente. Laboratorio QGeI.



Foto 23: Sistema operando y con visualización del cambio de color en el proceso de enclado y de la formación de espuma en los reactores. Laboratorio QGeI.

Para operar el reactor aeróbico, elemento principal en cualquier proceso de barros activados, se ha debido operar a escala piloto como en un proceso continuo de régimen estacionario y bajo las condiciones de mezcla completa. Metcalf-Eddy (1998).

El balance de material del sustrato de un constituyente activo se puede escribir como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{cambio en la} \\ \text{concentración} \\ \text{del sustrato en} \\ \text{el reactor o} \\ \text{tasa de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de micro-} \\ \text{organismos} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a la} \\ \text{que el sustrato} \\ \text{entra al reactor} \\ \text{como afluente} \\ \text{o tasa de flujo} \\ \text{de micro-} \\ \text{organismos al} \\ \text{interior} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a} \\ \text{la que el} \\ \text{sustrato} \\ \text{abandona el} \\ \text{reactor como} \\ \text{efluente o tasa} \\ \text{de flujo al} \\ \text{exterior} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{oxidación del} \\ \text{sustrato en el} \\ \text{reactor o} \\ \text{crecimiento neto} \\ \text{de micro-} \\ \text{organismos en} \\ \text{el sistema} \end{array} \right)$$

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Crecimiento neto}$$

En las condiciones operativas de régimen estacionario la concentración de sustrato en el reactor permanece constante, por lo tanto el primer miembro de la ecuación: acumulación, es igual a cero, o sea que:

$$0 = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a la} \\ \text{que el sustrato} \\ \text{entra en el reactor} \\ \text{como afluente o} \\ \text{tasa de} \\ \text{acumulación de} \\ \text{microorganismos} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad a la} \\ \text{que el sustrato} \\ \text{abandona el} \\ \text{reactor como} \\ \text{efluente o tasa de} \\ \text{flujo hacia el} \\ \text{exterior} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{oxidación del} \\ \text{sustrato en el reactor} \\ \text{o crecimiento neto de} \\ \text{microorganismos en} \\ \text{el sistema} \end{array} \right)$$

Si se considera la velocidad de cambio en la concentración del sustrato por oxidación dentro del reactor, se tendrá la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} \cdot V_r = Q_o \cdot C_o - Q_o \cdot C_e$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q \cdot (C_o - C_e)}{V_r}$$

Donde:

dC/dt = Velocidad de consumo de sustrato por los microorganismos [mg / litro . día]

C_o = Concentración de sustrato DBO en el afluente [mg/l].

C_e = Concentración de sustrato DBO en el efluente [mg/l]

Q_o = Caudal de afluente al reactor [l/h]

V_r = Volumen de cada reactor = 21,6 litros.

El tiempo de residencia hidráulico, θ_h , o sea el tiempo en que la mezcla líquida permanece en promedio en el reactor, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\theta_h = \frac{V}{Q_0}$$

Se llama: ΔC = a la velocidad específica de consumo de sustrato

C_b es la concentración de barros en el reactor, obtenido experimentalmente con un volumen determinado de efluente. APHA (1992).

$$\Delta C = \frac{C_0 - C_e}{\theta_h \cdot C_b}$$

Generalmente los procesos biológicos se producen en concordancia a una cinética de primer orden, con lo cual se obtiene la expresión para la velocidad específica, siendo k la constante de velocidad para el proceso:

$$\Delta C = k \cdot C_e$$

$$k = \frac{\Delta C}{C_e}$$

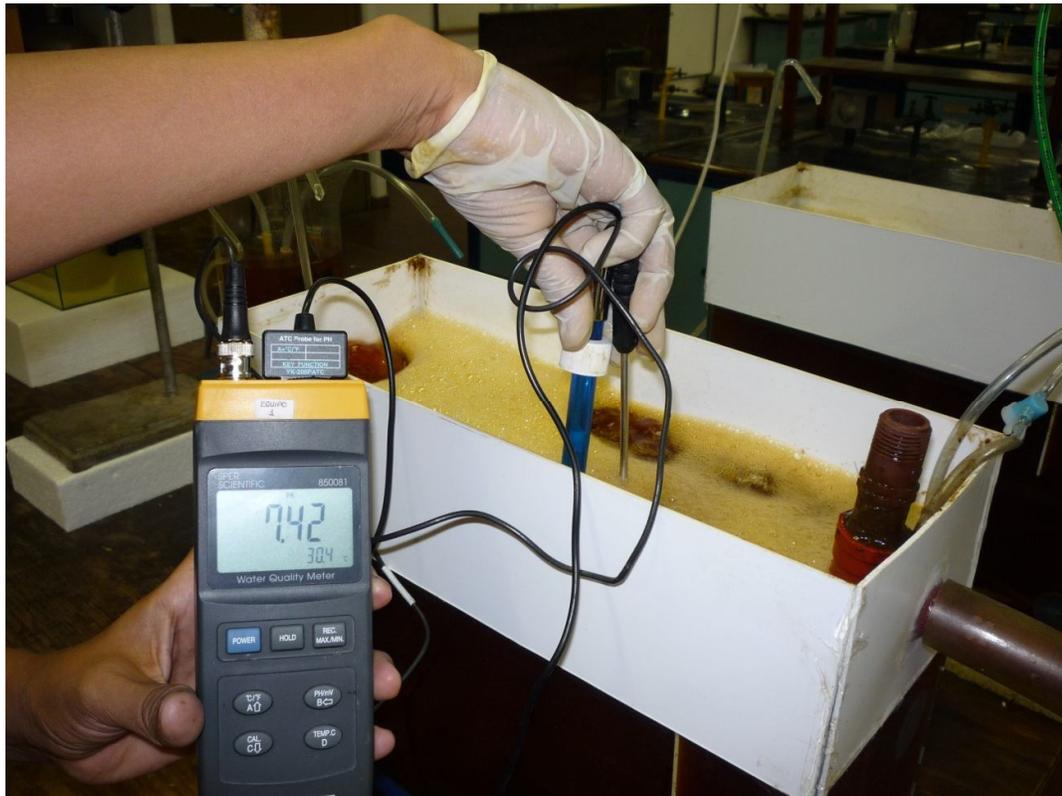


Foto 24: Control de parámetros con los reactores en pleno funcionamiento mediante equipo de medición multiparamétrico: Laboratorio QGeI.

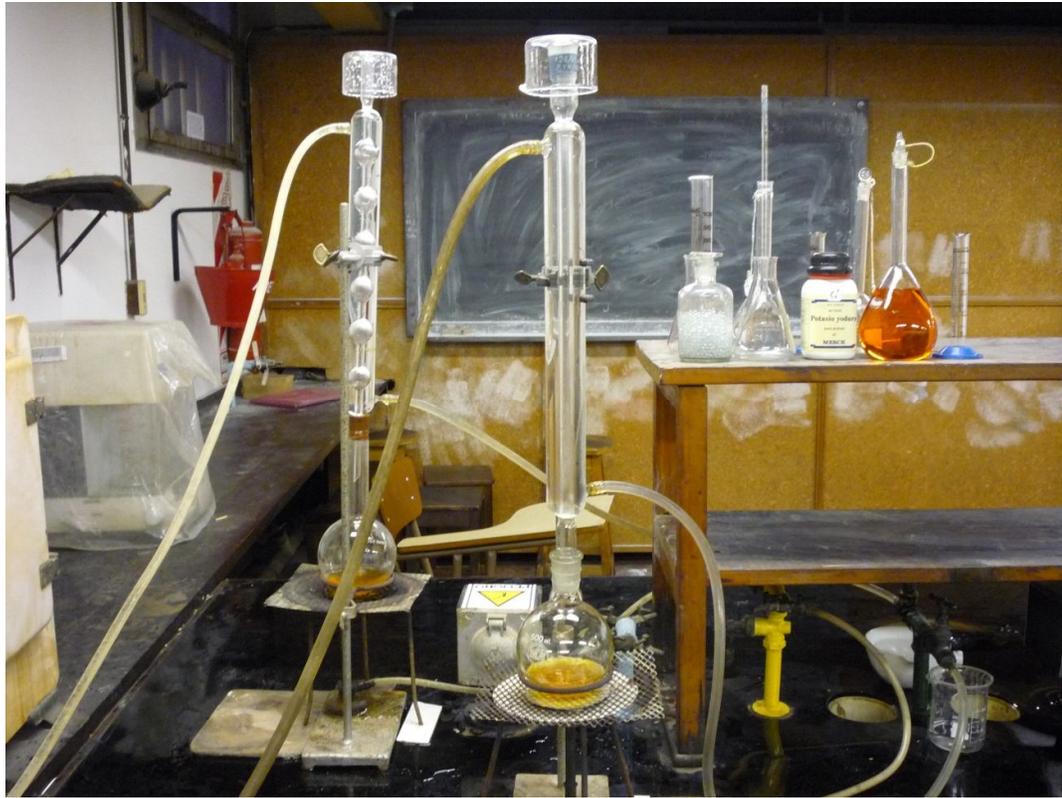


Foto 25: Determinación de la carga orgánica en afluente y efluente. Laboratorio QGeI.

En todo proceso biológico la temperatura es un factor crítico que hay que considerar seriamente para el diseño del reactor, por ello se ha considerado conveniente operar con dos reactores operando en paralelo. Metcalf-Eddy (1977).

Parámetro Controlado	Símbolo	Unidades	Frecuencia del Control
Caudal Alimentación	Q_0	[litro/d]	Diario
Concentración Sustrato Afluente	C_0	DBO₅ [mg/litro]	3 en 5 días
Concentración Sustrato Efluente	C_e	DBO₅ [mg/litro]	3 en 5 días
Oxígeno Disuelto	OD	[mg/litro]	Diario
pH	pH	pH	Diario

Tabla 2: Frecuencia en la medición de parámetros.

Al operar en paralelo se logra un mejor control de las variables en cada ensayo, además como punto a destacarse es que ambos reactores se alimentan con el mismo

efluente, se obtiene así una doble cantidad de datos en el mismo tiempo y totalmente compatibles entre sí.

Valores medios de Corridas con los dos reactores	C₀ [mg/litro]	C_e [mg/litro]	ΔC C₀ - C_e [mg/litro]	t [días]	Q [litros/día]
1^a	5970	430	5.540	0,5	7,5
2^a	5970	610	5.360	1	10
3^a	5970	1.200	4.770	1,5	15
4^a	5970	3.800	2.170	2	30

Tabla 2: Valores medios de corridas con los reactores operando en paralelo.

Se puede considerar que una reacción biológica responde a una cinética de primer orden cuando las concentración de sustrato son relativamente bajas, situación que normalmente ocurre en el caso de un reactor biológico continuo que se encuentra operando en condiciones de mezcla completa. Ramalho (1983).

Los parámetros cinéticos se han obtenido como resultado de varios ensayos efectuados con los dos reactores experimentales funcionando en paralelo, para ello ha sido necesario realizar varias corridas en los reactores experimentales, modificando en cada caso el Tiempo de Residencia del efluente en los mismos: **t_r, los resultados se muestran en la tabla 2.** Ramalho (1983).

7.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) APHA, American Public Health Association, AWWA, American Water Works Association, WPCF, Water Pollution Control Federation. “Métodos Normalizados, para el análisis de aguas potables y residuales”. Editorial Diaz De Santos. Traducción de la 17ª Edición. Año 1992.
- (2) Crites Ron y Tchobanoglous George. “Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones”. Editorial Mc Graw Hill. Colombia. ISBN 84-335-6416-1. Año 2000.
- (3) Metcalf & Eddy. “Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales”. ISBN 84-335-6416-1. Editorial Labor SA. Barcelona. España. Mayo 1977.

- (4) Metcalf & Eddy. “Ingeniería de las Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización”. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. España. ISBN 84-481-1607-0. Año 1998.
- (5) Rubens S. Ramalho. “Tratamiento de Aguas Residuales”. Editorial Reverté SA. Quebec. Canadá. Año 1983.

Capítulo VIII: Cálculos del sistema.

8.1 Aireadores y transferencia de Oxígeno.

En el proceso aeróbico de barros activados es de fundamental importancia la cantidad y también la rapidez con que se introduce al sistema el Oxígeno, evidentemente la carga orgánica presente en el efluente es determinante en cuanto al mayor o menor requerimiento de gas. Davolio (2007).

La elección del sistema de aireación, ya sea de burbujeo de fondo o formado por aireadores de superficie, es de fundamental importancia en este aspecto, evidentemente existe una muy variada cantidad de modelos que varían especialmente en el diseño del rodete, dado que cada fabricante da a este elemento características propias con lo cual trata de obtener el mayor rendimiento y por lo tanto la mayor eficacia en el tratamiento.

Los aireadores de superficie presentan la ventaja de que poseen una mayor adaptabilidad en cuanto se refiere a su instalación, pueden ser fijos montados sobre pasarelas de hormigón o metálicas o móviles montados sobre balsas flotantes que pueden ser cambiadas de lugar y reubicadas mediante el uso de cuerdas que permiten desplazar a la balsa manejándolas desde la orillas.

El aireador superficial debe estar diseñado para lograr incorporar una gran cantidad de Oxígeno a la mezcla y mantener la mayor dispersión posible del gas, pero además evitar que en el reactor se produzca la sedimentación de los barros activados en el fondo del tanque. Davolio (2008).

Se han elegido para el cálculo aireadores superficiales de la marca AS Coutex de eje vertical, seleccionado el modelo dentro de la tabla provista por el fabricante del producto, que se expone a página 80.

8.2 Dimensionado del sistema.

a. Caudal de efluentes:

$$Q = 60.000 \frac{l}{hs} * 24 hs / día$$

$$Q = 1.440.000 \frac{l}{dia}$$

$$Q = 1.440 \frac{m^3}{dia}$$

b. DBO total volcada diariamente:

$$DBO_{total} = 5.970 \frac{mg}{l} * 1.440.000 \frac{l}{dia}$$

$$DBO_{total} = 8.597 * \frac{10^5 mg}{dia}$$

$$DBO_{total} = 8.597 \text{ kg} \frac{DBO}{dia}$$

c. Concentración de la DBO:

$$Conc DBO = \frac{DBO_{total}}{Q_{diario}}$$

$$Conc DBO = \frac{8.597 \frac{kg DBO}{dia}}{1.440 \frac{m^3}{dia}}$$

$$Conc DBO = 5,97 \frac{kg DBO}{m^3} = 5,97 * 1.000 \frac{g DBO}{m^3}$$

$$Conc DBO = 5.970 \frac{mg DBO}{l}$$

d. Consumo de aire: Erijman (2010).

$$Valor aconsejado = 1,5 \frac{Kg Oxigeno}{Kg DEO} = 50 \frac{m^3 aire}{kg DBO}$$

Adoptamos un exceso de aire del 20%. Departamento Sanidad (1967).

$$Volumen de aire total = 60 \frac{m^3 aire}{kg DBO}$$

e. Consumo de aire total diario:

$$CONS_{total de aire} = 8.597 \frac{kg DBO}{dia} * 60 \frac{m^3 aire}{kg DBO}$$

$$CONS_{total de aire} = 515.820 \frac{m^3 aire}{dia}$$

f. Consumo de oxígeno:

$$Vol_{TOTAL} O_2 = Volumen_{aire} * 0,21$$

$$Vol_{TOTAL} O_2 = 515.820 \frac{m^3 aire}{dia} * 0,21 \frac{m^3 Oxigeno}{m^3 aire}$$

$$Vol_{TOTAL} O_2 = 108.322 \frac{m^3 Oxigeno}{dia}$$

g. Peso de oxígeno consumido por día:

$$22,4 m^3 oxigeno \rightarrow 32 Kg Oxigeno \square$$

$$108.322 m^3 oxigeno \rightarrow x = 154.746 Kg Oxigeno$$

h. Cálculo de la superficie del tanque de aireación. Degremont (1973).

$$Sup_{tanque} = \frac{Q_{diario}}{tasa\ aconsejada}$$

Para 30 CV de potencia por aireador, se aconseja de 28,8 a $60 \frac{m^3}{m^2 dia}$. Se adopta $40 \frac{m^3}{m^2 dia}$. Metcalf & Eddy (1998).

$$Sup_{tanque} = \frac{1440 \frac{m^3}{dia}}{40 \frac{m^3}{m^2 dia}}$$

$$Sup_{tanque} = 36 m^2$$

$$Sup_{total\ tanque} = Sup_{tanque} * factor\ seguridad * factor\ barro\ retorno$$

Factor de seguridad: variaciones de caudal, formación de espumas, imprevistos.

Factor barro de retorno: barro regresados del sedimentador secundario, equivalen a 1 / 3 del total. Este valor puede variar entre un 10 a un 50 %.

$$Sup_{total} = 36 m^2 * 1,2 * 1,33$$

$$Sup_{total} = 57,5 m^2$$

i. Profundidad del tanque de aireación, se aconseja una profundidad de 4,6 a 7,6 metros. Metcalf & Eddy (1998).

Adoptamos una profundidad de 4,6 m.

j. Volumen del tanque de aireación:

$$Vol_{tanque} = 57,5 m^2 * 4,6 m$$

$$Vol_{tanque} = 265 m^3$$

k. Tiempo de permanencia:

$$t_{\text{permanencia}} = \frac{\text{Vol}_{\text{tanque}}}{Q}$$

$$t_{\text{permanencia}} = \frac{265 \text{ m}^3}{1.440 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

$$t_{\text{permanencia}} = 0,134 \text{ días}$$

$$t_{\text{permanencia}} = 4.42 \text{ hs}$$

1. Cálculo del tiempo de permanencia del efluente en el reactor biológico de acuerdo al nivel de tratamiento exigido por la legislación vigente.

La cinética de la reacción de la biodegradación biológica se ajusta en general al tratamiento matemático que corresponde a una de primer orden, por lo tanto la ecuación a aplicar es:

$$C = C_0 * e^{-kt}$$

donde C_0 = concentración del afluente al reactor $\left[\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right]$

C_e = concentración del efluente al reactor $\left[\frac{\text{mg}}{\text{l}}\right]$

k – constante de biodegradación biológica $\left[\frac{1}{\text{día}}\right]$

t = tiempo medio de permanencia [días]

Con los datos obtenidos en forma experimental en diferentes ensayos con los dos reactores operando en paralelo se obtuvieron los datos con los cuales se ha elaborado la siguiente tabla:

t días	C_0 mg/litro	C_e mg/litro	ΔC mg/litro	Q litros/día
0,5	5970	3800	2170	30
1	5970	1200	4770	15
1,5	5970	610	5360	10
2	5970	430	5540	15

Tabla 4: Variación de la concentración según el tiempo.

Tabla 5: Logaritmos

t días	$\ln \frac{C_e}{C_0}$
0	0
0,5	-0,45
1	-1,6
1,5	-22,8
2	-2,63

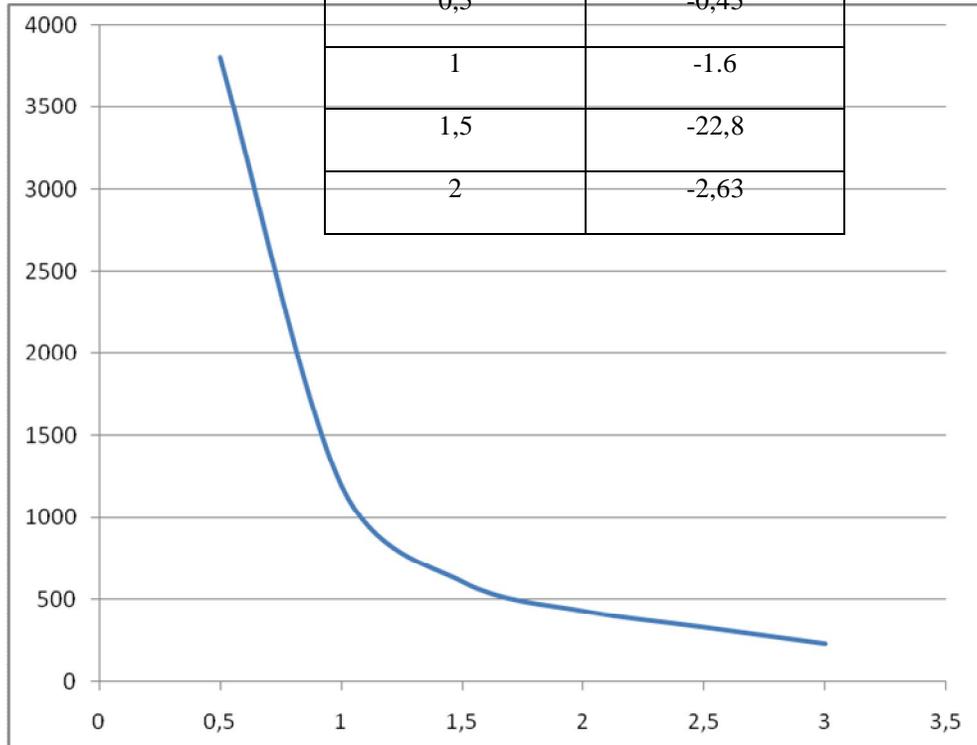


Gráfico 1: $C_e = f(t)$

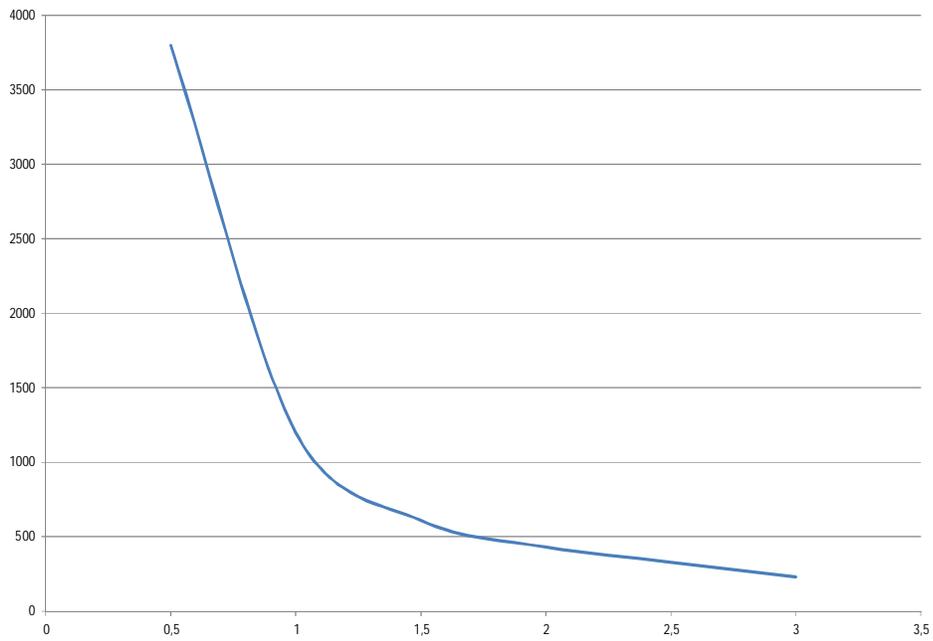
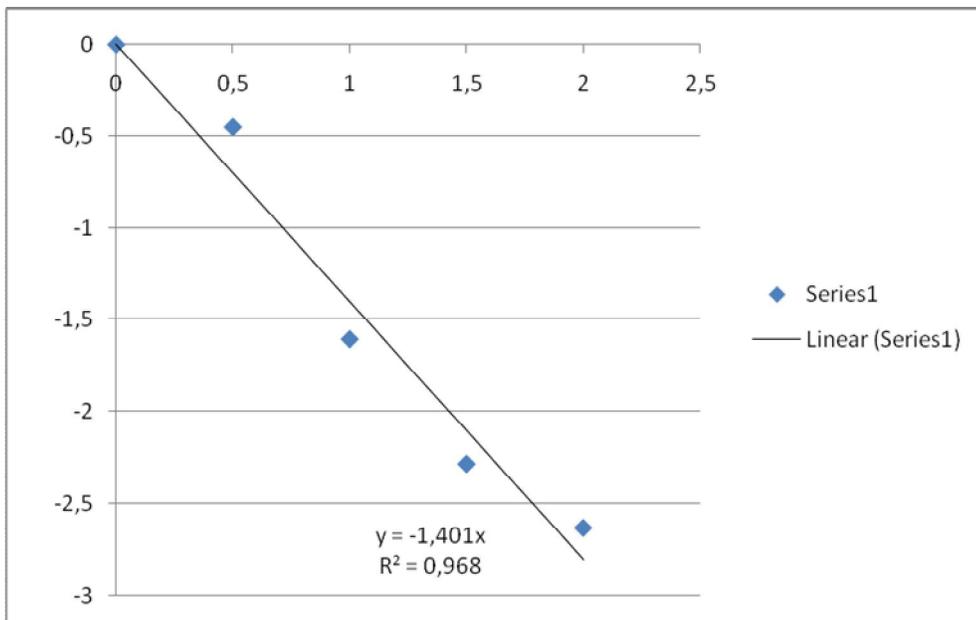


Gráfico 2: $C_0 - C_e = f(t)$

Gráfico 2: $C_0 - C_e = f(t)$



Gráfica 3: $\ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right) = f(\text{tiempo})$

$$C_e = C_0 \cdot e^{-1,4018 \cdot t}$$

$$\ln(Ce/Co) = -1,4018 \cdot t$$

$$\ln 50 / 5970 = -4,7825 = -1,4018 \cdot t$$

$$t = 3,4117 \text{ días} = 3,41 \text{ días}$$

m. Recalculo del volumen del bioreactor aireado:

$$4,42 \text{ horas} \rightarrow 265 \text{ m}^3$$

$$3,41 \times 24 \text{ horas} \rightarrow x = 4.906 \text{ m}^3$$

n. Recalculo de superficie del reactor: Profundidad aconsejada 4 a 7 m. Departamento de Sanidad (1967).

$$\text{Superficie} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Profundidad}} \text{ Reactor}$$

$$\text{Superficie} = \frac{4.906 \text{ m}^3}{4,6 \text{ m}}$$

$$\text{Superficie} = 1066 \text{ m}^2$$

o. Dimensiones del reactor, tomamos una relación largo: ancho de $\sim 2:1$. Departamento de Sanidad (1967).

$$S = l * a = 1.066 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie Reactor} = \text{Ancho} * \text{Largo} = 23 \text{ m} * 46 \text{ m}$$

$$\text{Profundidad Reactor } h = 4,6 \text{ m}$$

p. Verificación tiempo de permanencia del efluente en el reactor:

$$\text{tiempo}_{\text{permanencia}} = \frac{\text{Volumen reactor}}{Q \text{ Caudal diario}}$$

$$\text{tiempo}_{\text{permanencia}} = \frac{23 \text{ m} * 46 \text{ m} * 4,6 \text{ m}}{1440 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

$$\text{tiempo}_{\text{permanencia}} = 3,38 \text{ días}$$

Valor aconsejado de permanencia: 3 a 4 días. Departamento de Sanidad (1967).

q. Equipamiento con aireadores:

Se considera oportuno emplear aireadores superficiales de baja velocidad de rotación, con rodete de diámetro grande y cuyo suministro de O_2 es importante. Para la selección se emplea la tabla de la Empresa fabricante : AS Coutex.

Aireador Tipo	Potencia Motor CV	Diámetro rodete mm.	Velocidad rpm	Capacidad Kg O_2 / hora

AS 5001	1	500	120	2,0
AS 6001	1,5	600	100	3,1
AS 7002	2	700	82	4,2
AS 8003	3	800	74	6,4
AS 8504	4	850	80	8,5
AS 8505	5,5	850	95	10,6
AS 9007	7,5	900	91	14,6
AS 9010	10	900	105	18,3
AS 1015	15	1000	100	30,4
AS 1220	20	1200	81	38,6
AS 1425	25	1400	67	48,8
AS 1630	30	1600	57	66,8
AS 2040	40	2000	47,5	87,8
AS 2250	50	2250	40	108,4
AS 2560	60	2500	38	127,2
AS 2675	75	2690	36	158,5

Tabla 6: Aireadores AS Coutex

En base a la misma se adopta:

- Aireador Superficial tipo: AS 2040
- Potencia del motor: 40 CV
- Diámetro rodete: 2.000 mm = 2 m.
- Velocidad de rotación: 47,5 rpm
- Capacidad nominal de oxigenación: 87,8 Kg Oxígeno/hora.

$$87,8 \frac{\text{kgOxígeno}}{\text{hora}} = 2.107,2 \frac{\text{kgOxígeno}}{\text{día aireador}}$$

r. Número de aireadores necesarios:

$$\text{Consumo de Oxígeno diario} = \frac{O_2 \text{ total necesario}}{\text{días de permanencia}} =$$

$$\text{Consumo de Oxígeno} = \frac{154.746 \text{ Kg de Oxígeno necesario}}{3.38 \text{ días de permanencia}} = 37864$$

$$\frac{\text{kgOxígeno}}{\text{día}}$$

$$N^{\circ} \text{ aireadores} = \frac{O_2 \text{ diario necesario}}{O_2 \text{ entregado por aireador}}$$

$$N^{\circ} \text{ aireadores} = \frac{37864 \frac{\text{kgOxígeno}}{\text{día}}}{2.107,2 \frac{\text{kgOxígeno}}{\text{día aireador}}} =$$

$$N^{\circ} \text{ aireadores} = 18 \text{ aireadores}$$



Foto 26: Área de Oxigenación cubierta por un aireador superficial de eje vertical.

s. Superficie que le corresponde a cada aireador:

$$\text{Superficie cubierta por cada aireador} = \frac{\text{Superficie total}}{N^{\circ} \text{ aireadores}}$$

$$\text{Superficie de aireación de cada aireador} = \frac{23 \text{ m} * 46 \text{ m}}{18 \text{ aireadores}} = 59 \frac{\text{m}^2}{\text{aireador}}$$

t. Diámetro de acción por cada aireador:

$$\text{Diámetro de aireación de cada aireador} = 80 \text{ m}^2 = \pi * R^2$$

$$\text{Diámetro de atracción de cada aireador} = a = \sqrt{80 \text{ m}^2} = 8,7 \text{ m}$$

u. Potencia total instalada:

$$\text{Potencia instalada} = N^{\circ} \text{ aireadores} * \text{Potencia aireador}$$

$$\text{Potencia instalada} = 18 \text{ aireadores} * 40 \frac{\text{CV}}{\text{Aireador}} = 720 \text{ CV} = 530 \text{ Kw}$$

8.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) Davolio Franco. “Contaminación de Aguas. Tratamiento de Aguas Residuales”. Cuadernillo de clase para calcular y diseñar plantas de tratamiento Curso dictado en el Congreso de la CONEIQ. FACET UNT. San Miguel de Tucumán. Noviembre 2002.
- (2) Davolio Franco, Viapiano José Santiago. “Enseñanza Práctica de Diseño de Plantas de Tratamiento de Residuales Líquidos”. Publicado en CD del “II Congreso de Educación en Ciencia y Tecnología”. UNCa. Catamarca. Junio 2007.
- (3) Davolio Franco. “Tratamiento Secundario y Terciario. Procesos Aeróbicos y Anaeróbicos”. Cuadernillo de Clases para Alumnos de Ingeniería que cursan las Asignaturas: "Aguas Residuales. Generación y Tratamiento" e "Ingeniería Ambiental" en la FACET de la UNT. San Miguel de Tucumán. Año 2008.
- (4) Erijman Leonardo. “Tratamiento de Efluentes”. INTI. INGEBA. CONICET. UBA. Año 2010.
- (5) Metcalf & Eddy. “Ingeniería de las Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización”. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. España. ISBN 84-481-1607-0. Año 1998.
- (6) Departamenmto de Sanidad del Estado de Nueva York. “Manual de Tratamiento de Aguas Negras”. Editorial Limusa Wiley SA. Mejico DF. Año 1967.

Capítulo IX: El proceso de sedimentación

8.1 El sedimentador secundario

En el proceso de barros activados el sedimentador secundario reviste una gran importancia debido a que en el mismo se produce la sedimentación de los barros retirados del reactor aireado y se produce la concentración de los mismos.

Luego de la concentración de los barros aproximadamente un tercio de ellos se retorna al reactor principal, estos se mezclan con el efluente y con el resto de las colonias que permanecen en el mismo, de esta forma se logra un objetivo que es fundamental para el proceso de biodegradación biológica y que es mantener una gran cantidad de microorganismos activos para que se alimenten de la materia orgánica contenida en el efluente. Davolio (1996).

Evidentemente mientras la cantidad de microorganismos sea elevada mayores serán los requerimientos que habrá de alimentos y mejor será el rendimiento del proceso en cuanto a reducción de la carga orgánica, en consonancia a un menor tiempo de permanencia de la mezcla en el reactor. Davolio (1996).

8.2 Ensayo de sedimentación y cálculos.

Luego de la filtración la cantidad de sólidos suspendidos gruesos contenidos en el efluente: pulpa y hollejo, se reduce sustancialmente y los sólidos totales remanentes en el líquido residual es reducida: de 500mg /litro. Davolio (2008).

Los ensayos de sedimentación se realizaron con el efluente tratado en los reactores aeróbicos, posteriormente extraído y colocado en una probeta, con la cual se efectuó el control del tiempo del descenso de la interfase de clarificación, para poder obtener la velocidad de sedimentación en función del tiempo y graficar el proceso.

Controlando los tiempos necesarios para el descenso de la capa de la interfase de clarificación hasta llegar a la máxima compactación de los barros se obtienen los datos necesarios para determinar el avance del proceso de sedimentación, los valores obtenidos pueden ser representados en una gráfica con la ayuda de la cual se puede calcular el área superficial del sedimentador. Davolio (2007).

Con los datos experimentales obtenidos en el proceso de sedimentación, del efluente tratado en los reactores, se obtienen los valores para construir la gráfica: $h = f(t)$.



Foto 27: Probeta con efluente tratado, comienzo del proceso de sedimentación.
Laboratorio QGeI.



Foto 28: Se observa el descenso de la interfase. Laboratorio QGeI.



Foto 29: Descenso de la interfase. Laboratorio QGeI.

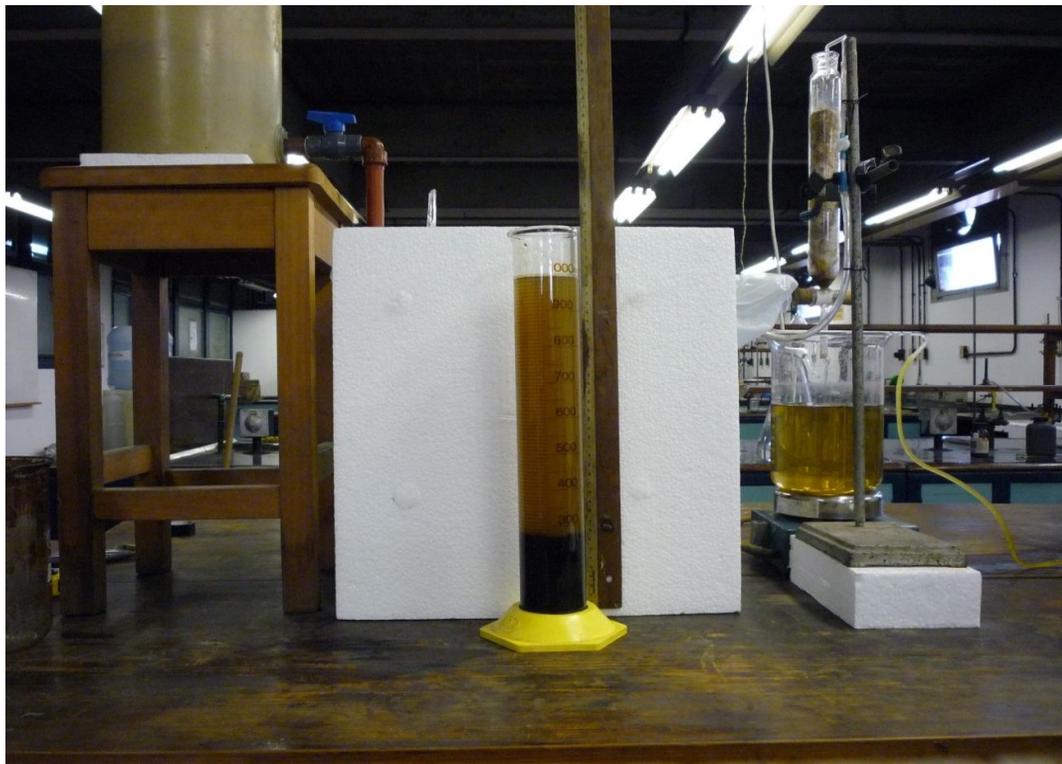


Foto 30: Proceso de sedimentación en etapa cercana a la compactación final. Laboratorio QGeI.

Tiempo [minutos]	0	10	20	30	40	50	<u>60</u>	70	80	90	100	110	120
Altura Interfase [centímetros]	36	21	12	7	6	5	<u>4,5</u>	4,5	4	4	3,5	3,5	3

Tabla 7: Sedimentación $h = f(t)$

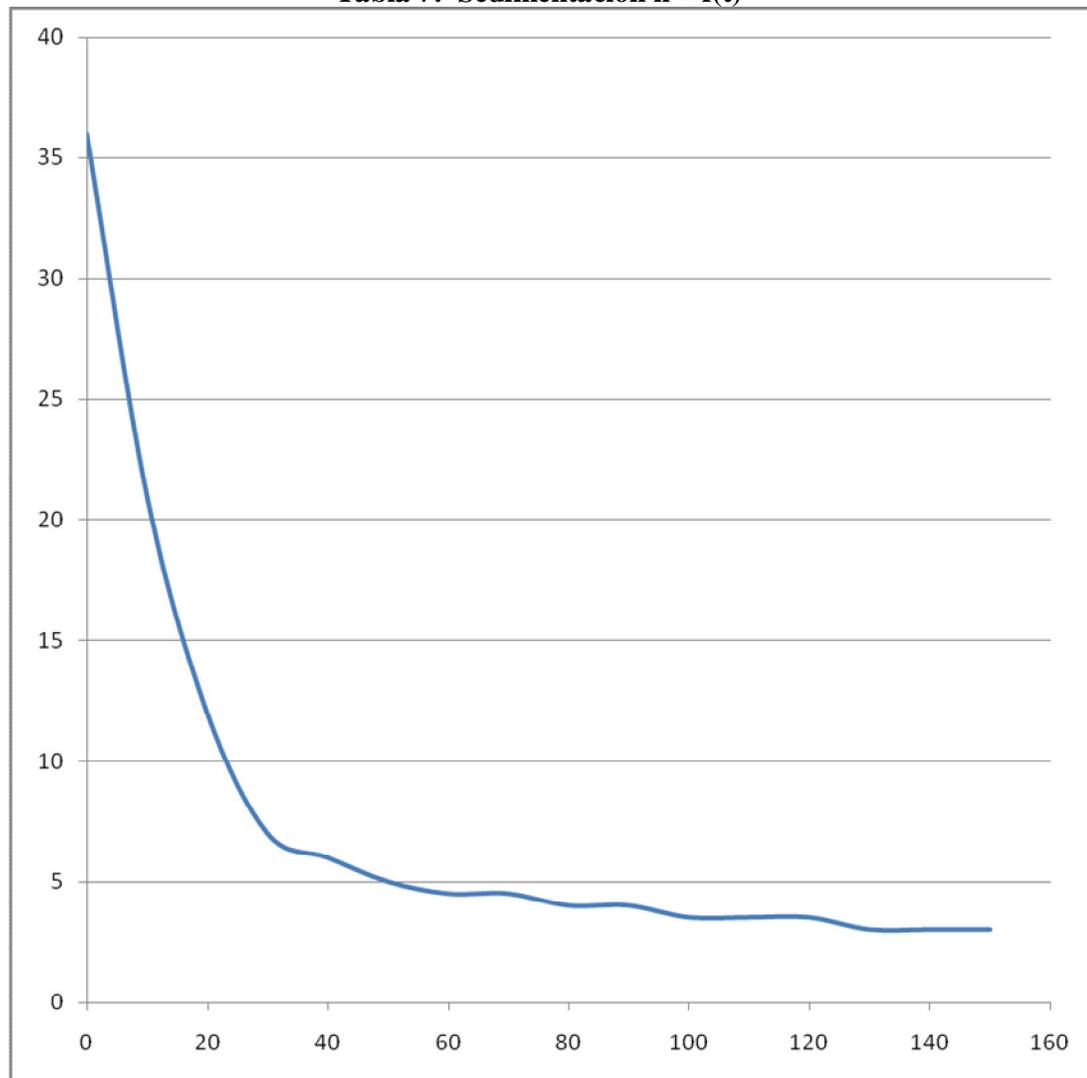


Gráfico 4: Experimental. Altura columna sedimentación [cm] = $f(t)$ [minutos]

Con los valores obtenidos en el ensayo de sedimentación, altura de la interfase líquida en función del tiempo de sedimentación se construye la curva auxiliar que es necesaria para dimensionar un sedimentador circular. Davolio (2008).

De la representación gráfica de la curva obtenida midiendo la altura de la interfase de sedimentación con el líquido sobrenadante en función del tiempo se obtienen los datos necesarios para calcular la superficie del sedimentador circular. Metcalf & Eddy. (1998).

Datos para el cálculo:

- Concentración inicial de Sólidos: $C_0 = 500$ mg/litro
- Altura inicial en la probeta: $h_0 = 36$ centímetros
- Caudal: $Q = 60$ m³/hora = 1 m³/minuto
- Concentración final: $C_e = 4.000$ mg/litro
- Altura compactación en la probeta: h_e
- Tiempo necesario para el inicio de la compactación: t_c

La altura de compactación final en la probeta se obtiene calculándola con la ecuación:

$$h_0 \times C_0 = h_e \times C_e$$
$$h_e = \frac{h_0 \times C_0}{C_e} = \frac{36 \times 500}{4.000} = 4,5 \text{ cm}$$

Con la ayuda de la gráfica experimental de: $h = f(t)$, determinamos el valor de t_c

$$t_c = 60 \text{ minutos}$$

con los datos obtenidos de la experiencia de sedimentación podemos calcular el área superficial del sedimentador:

$$A_{\text{sedimentador}} = \frac{Q \times t_c}{h_0} = \frac{1 \times 60}{0,36} = 167 \text{ m}^2$$

Diámetro sedimentador = 14,5 metros



Foto 31: Sedimentador circular en funcionamiento. Gentileza La Alumbraera.

8.3 Referencias Bibliográficas del Capítulo:

- (1) Davolio Franco. Conferencista Invitado. “Taller de Contaminación por Efluentes y Desechos”. Subprograma Nacional Prioritario de Contaminación Ambiental. Centro Cultural Universitario Eugenio Virla. San Miguel de Tucumán. Argentina. Octubre 1996.
- (2) Davolio Franco, Viapiano José Santiago. “Enseñanza Práctica de Diseño de Plantas de Tratamiento de Residuales Líquidos”. Publicado en CD del “II Congreso de Educación en Ciencia y Tecnología”. UNCa. Catamarca. Junio 2007.
- (3) Davolio Franco. “Tratamiento Secundario y Terciario. Procesos Aeróbicos y Anaeróbicos”. Cuadernillo de Clases para Alumnos de Ingeniería que cursan las Asignaturas: "Aguas Residuales. Generación y Tratamiento" e "Ingeniería Ambiental" en la FACET de la UNT. San Miguel de Tucumán. Año 2008.
- (4) Metcalf & Eddy. “Ingeniería de las Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización”. Editorial Mc Graw Hill. Madrid. España. ISBN 84-481-1607-0. Año 1998.

Capítulo IX

9.1 Conclusiones

El tratamiento de efluentes industriales y poblacionales en la Provincia de Tucumán es totalmente insuficiente, es un tema pendiente de solución y el nivel de contaminación que se registra en el agua, en el aire y en el suelo ha alcanzado valores sumamente alarmantes, revertir la situación actual implicará costos elevadísimos.

Esta Provincia se ha transformado en la región geográfica con mayor nivel de contaminación en todo el Norte de Argentina.

Las industrias citrícolas durante la época de la zafra del limón, que se extiende durante más de seis meses y con la mayor intensidad desde Mayo hasta Octubre, es la responsable, junto con los ingenios azucareros y las destilerías de alcohol, de la tremenda contaminación industrial del recurso hídrico, esto se detecta a lo largo de todo el Río Salí y sus afluentes.

El tratamiento de los efluentes de las industrias citrícolas requiere de mucha atención, en especial tomando en cuenta los crecientes volúmenes volcados diariamente a los cauces de los ríos, el alto grado de contaminantes debido a la materia orgánica contenida en ellos, situación que se repite durante toda la época de zafra del limón.

Existen en la bibliografía muchos antecedentes referidos a tratamientos anaeróbicos, muy especialmente con lagunas de estabilización anaeróbicas, desde las cuales, durante el proceso biológico que es bastante lento, se desprenden fuertes olores, por cierto muy desagradables, que han generado serios problemas entre las Empresas del rubro y las poblaciones aledañas.

El tratamiento anaeróbico implica el desprendimiento a la atmósfera de grandes volúmenes de gases cuyo efecto invernadero es elevado, como ser el Metano, CH_4 , que es potencialmente 20 veces más agresivo para el medio que el Dióxido de Carbono, CO_2 .

El método sobre el cual se ha orientado esta investigación es un tratamiento de efluentes la industria citrícola netamente aeróbico, sobre el cual no se han encontrado antecedentes bibliográficos de importancia.

El método se ha desarrollado sobre la base de un tratamiento totalmente aeróbico orientado hacia el sistema denominado de barros activados, por cuanto es una metodología de eficacia comprobada en diferentes aplicaciones a nivel mundial, muy especialmente con efluentes de elevados contenidos de materia orgánica biodegradable.

En esta Provincia se cuenta con antecedentes de funcionamiento de la planta de tratamiento de una Empresa, no citrícola, donde se han obtenido resultados muy satisfactorios con efluentes no tradicionales.

En el modelo que se ha desarrollado y que se propone como alternativa de tratamiento de los efluentes de citrícolas, se han empleados elementos clásicos que siempre se incorporan, en cualquier proyecto, como ser la filtración y la neutralización previas de los efluentes, antes de ingresar luego a los bioreactores.

El sistema aeróbico diseñado ha demostrado ser altamente eficaz en cuanto a rendimiento en el abatimiento de la carga orgánica, medida como DBO, se ha obtenido un rendimiento global próximo al 95%, valor que implica que el proceso es razonablemente muy aceptable.

Es necesario agregar que el desprendimiento de olores fue nulo, en la sedimentación secundaria el tiempo de separación de las fases estuvo dentro de los valores de tiempo que se consideran convenientes, por otra parte las dos partes resultantes de este proceso se encontraron perfectamente diferenciadas.

Por los valores de carga orgánica sumamente elevada contenida en los efluentes de una citrícola, DBO, en algunos casos superiores a 6.000 mg/litro, aún con un abatimiento de un 95%, la carga contaminante residual es muy elevada y no se ajusta a los parámetros legales que las normas ambientales aceptan para la descarga de efluentes en un curso de agua, por lo cual se considera que hay que complementar el tratamiento secundario aeróbico con una etapa terciaria también aeróbica o buscar complementar al proceso.

Recomendación de Posibles Líneas de Trabajo:

El sistema de aireación es evidentemente uno de los factores críticos más importantes, de acuerdo a ello es el mayor o menor éxito en el tratamiento, los costos operativos del

mismo pueden ser muy elevados considerando a la intensidad de aireación que debe lograrse en el proceso.

Por lo tanto, uno de los objetivos principales a considerar si se realiza una segunda etapa del estudio que se ha iniciado, es lograr, en el menor tiempo, la mayor eficiencia en el proceso de oxidación de la materia orgánica contenida en el efluente.

Aumentar la eficiencia, implica disminuir los costos del tratamiento, esto es evidentemente uno de los puntos principales hacia donde direccionar, dar continuidad y profundizar las tareas de investigación iniciadas.

No es de descartar que de implementarse una etapa terciaria de tratamiento, en serie y en condiciones similares, se obtenga una mejora que permita reducir los requerimientos de Oxígeno en el tratamiento secundario, al mismo tiempo que pueda servir para mejorar el rendimiento global del proceso, disminuyendo los costos.