



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“PROPUESTA Y RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA  
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PRODUCTO DEL  
BENEFICIADO DEL CAFÉ EN FINCA SAN CARLOS, CHIAPAS”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTAN:

**SAMUEL ALEJANDRO BENÍTEZ FLORES**

**ANDREAS KLEIN SCHNIPPENKOETTER**

TUTOR:

**M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE**

2015

CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **Agradecimientos**

### **Por Andreas Klein**

A mi maestro Rodrigo Sepúlveda, por su pasión y compromiso. Por su entrega, dedicación y consejo siempre tan bien recibido en esta amistad que se ha forjado.

A mis padres, Annette y Alfred, por haberme enseñado, guiado y apoyado en el andar, a quienes les debo y agradezco la oportunidad de haber logrado un éxito más en mi vida.

A mis hermanas Antje y Agnes, por haberme acompañado desde pequeño con su amor y cariño y por siempre estar ahí, a mi lado.

A Roger, quién se volvió un hermano que creyó en mí y siempre me apoyó en toda decisión que tomé. Por su comprensión, su escucha y sus consejos.

A Sam, por creer en este proyecto y por hacerlo posible. Por la confianza que depositó en mí y por la amistad que compartimos.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera.

A Dios, sin quien nada de esto hubiera sido posible.

### **Por Samuel Benítez**

A Dios, por la vida que me dio, el camino por el que me ha guiado y las personas tan maravillosas que ha puesto en él.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por la labor incansable que desempeñan en la educación de nuestro pueblo y el orgullo de saberme hijo de la educación pública mexicana.

A mi maestro Rodrigo Sepúlveda por el gran trabajo que desempeña compartiendo sus conocimientos de una forma tan inspiradora y cálida. Por el compromiso y la paciencia que tuvo con este proyecto.

A mi familia, por todo el apoyo y cariño que me han brindado a lo largo de los años.

A mis padres, Isaura y Alejandro, por todo el amor, cariño y dedicación que depositaron en mí que me ha llevado hasta donde estoy el día de hoy. Todo se los debo a ustedes, gracias por guiarme en esta gran aventura.

A mi hermano Rodrigo, mi más viejo y querido amigo. Por todo tu cariño, regaños, risas, enojos y tus palabras de aliento. Gracias por creer en mí, no podría pedir a alguien mejor como hermano.

A Dianey, por todo tu amor, paciencia y los consejos que me has dado. Por ayudarme con este proyecto y siempre creer en mí. Por haberme impulsado a tomar decisiones importantes en mi vida y siempre estar a mi lado.

A Andreas, por la gran amistad que compartimos y la oportunidad que me dio para participar en este proyecto.

A mis amigos, en especial a Jorge, por todas las risas y buenos momentos que hemos vivido.

**Quiero dedicar este trabajo a la memoria de Ana María Herrera, mi abuela. Por ser mi inspiración y la fuerza que siempre me ha acompañado. Tu fotografía en mi escritorio es la motivación que me impulsa a nunca darme por vencido. Te extraño.**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/029/15

Señores  
SAMUEL ALEJANDRO BENÍTEZ FLORES  
ANDREAS KLEIN SCHNIPPENKOETTER  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

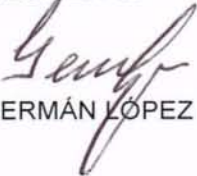
**"PROPUESTA Y RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PRODUCTO DEL BENEFICIADO DEL CAFÉ EN FINCA SAN CARLOS, CHIAPAS"**

- INTRODUCCIÓN
- I. MARCO TEÓRICO
- II. EL PROCESO DEL BENEFICIADO HÚMEDO DEL CAFÉ EN FINCA SAN CARLOS
- III. IMPACTO AMBIENTAL DEL BENEFICIADO HÚMEDO DEL CAFÉ
- IV. PANORAMA DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIADO HÚMEDO DEL CAFÉ
- V. PROPUESTA DE TRATAMIENTO
- VI. RESULTADOS DE OPERACIÓN DE LA PLANTA
- VII. PROPUESTAS DE MEJORA
- VIII. CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 14 de abril del 2015.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

# Índice

1. Introducción.....	7
Objetivo.....	10
2. Marco Teórico.....	12
2.1 Panorama Hídrico Nacional.....	12
Situación hídrica en el Estado de Chiapas	
2.2 Normativa Gubernamental en Materia de Descarga de Aguas Residuales.....	19
NOM-001-SEMARNAT-1996	
NOM-CCA-027-ECOL/1993	
2.3 Tratamiento de las aguas residuales.....	24
Contaminación del agua dulce	
El agua residual	
Características del agua residual	
Contaminantes básicos presentes en el agua residual	
3. El proceso del beneficiado húmedo del café en Finca San Carlos.....	31
3.1 Desarrollo sustentable y el caso de Finca San Carlos.....	31
¿Qué es Finca San Carlos?	
Ubicación geográfica	
Condiciones climatológicas e hidrológicas	
Contexto de desarrollo social	
La certificación Rainforest Alliance y los criterios en materia de	
tratamiento de aguas residuales	
3.2 El proceso del beneficiado del café .....	37
3.3 Recolección (Cosecha) .....	39
3.4 Recibido.....	40
3.5 Despulpado y Cribado.....	41
3.6 Fermentación.....	44
3.7 Lavado.....	47
3.8 Características del agua del influente y efluente del beneficiado húmedo.....	49
El Influyente	
El Efluente	
Las aguas residuales producidas en el proceso del beneficiado	
4. Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café.....	53
4.1 Residuos sólidos y líquidos del proceso de beneficiado húmedo.....	54
4.2 Consecuencias del vertido directo de las aguas residuales del beneficiado....	55
húmedo del café a cuerpos receptores	
Aumento de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	

- Disminución del oxígeno disuelto (OD)
- Disminución del pH
- Disminución de los caudales de la fuente de agua del beneficio
- Aumento repentino de los sólidos en suspensión
- Acidificación del suelo aledaño al cuerpo receptor
- Erosión del cauce del cuerpo receptor
- Malos olores y afectaciones al paisaje
- Imposibilidad del uso del agua del cuerpo receptor
- Altas concentraciones de elementos básicos en el agua

5. Panorama del tratamiento de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café.....	60
5.1 Características generales del agua residual del beneficiado húmedo del café.....	60
Generalidades	
5.2 Sistemas de tratamiento utilizados en la industria del café.....	68
Lechos de secado	
Lagunas de estabilización	
Plantas de tratamiento convencional (proceso biológico)	
Reactores de flujo continuo	
Precipitación química	
6. Propuesta de tratamiento.....	74
6.1 Aspectos generales.....	74
Memoria descriptiva del proceso	
Gastos y caudales	
Tiempos y duración de las descargas	
Selección de procesos de tratamiento por disponibilidad de espacio y factor económico	
6.2 Sistema de tratamiento.....	82
6.2.1 Reportes de laboratorio de muestras obtenidas en las múltiples descargas de Finca San Carlos.....	82
6.2.2 Tratamiento primario.....	84
Detalles generales del sistema	
Esquemmatización del sistema de tamizado en tanque de fermento	
6.2.3 Tratamiento secundario.....	86
Elección e instalación de los tanques de coagulación/sedimentación	
Operación hidráulica de los tanques de coagulación/sedimentación	
Elección del coagulante químico	
Propiedades físicas y químicas de la cal	
Uso de la cal en el tratamiento secundario de las aguas	

residuales	
	Reacción de la cal en el agua y formación de subproductos
	Descripción del proceso de floculación/sedimentación
6.2.4 Tratamiento terciario.....	99
	Estabilización de pH y remoción de nutrientes
	Operación hidráulica de los tanques de estabilización y
remoción	
7. Resultados de la operación de la planta.....	107
7.1 Resultados de los análisis del agua del efluente de la planta de tratamiento.	107
	Eficiencia del proceso de precipitación química
	Comparativa de las características del agua del efluente y los establecidos por la norma mexicana de descarga de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996)
7.2 Comparación de los análisis del agua del influente y del efluente de la planta de tratamiento .....	110
	Determinación del porcentaje de efectividad de la planta
8. Propuestas de mejora.....	114
8.1 Rejilla para confinar los lodos sedimentados en la evacuación del agua clarificada de los tanques.....	114
8.2 Filtro de carbón activado para remover olores y sabores.....	115
Conclusiones y recomendaciones.....	118
Bibliografía.....	121
Anexos.....	126

## Introducción

La interacción del hombre con el medio ambiente bajo los criterios actuales de explotación de los recursos naturales genera un gran desequilibrio en las características originales del entorno, estos problemas ambientales se ven reflejadas en el cambio climático global, la destrucción de la capa de ozono, la contaminación de aire, del suelo y del agua.

Este documento está enfocado en los problemas de la contaminación en el agua y más específicamente en las consecuencias generadas por la utilización de la misma como eje motor del proceso del beneficiado del café.

El procesado del café es una de las actividades agroindustriales más importantes en varios países de Latinoamérica y en México; sin embargo, los procesos que comprenden esta industria conllevan un considerable impacto ambiental, ya que genera aguas residuales con alta carga contaminante de sustancias orgánicas cuya peligrosidad ecológica ha potenciado la búsqueda de alternativas para su tratamiento y disposición final atendiendo las necesidades particulares que la misma industria establece en cuanto a la disponibilidad tecnológica y económica que, en casos como el evaluado en este proyecto, resultan pilares para definir un sistema que resulte a la vez eficiente, fácil, rápido y barato.

Comenzando por definir qué es el agua residual, sus características y cómo afecta al ambiente su disposición directa a cuerpos de agua. Es importante conocer los efectos contaminantes de las aguas residuales sobre las aguas superficiales y subterráneas ya que en conjunto comprenden alrededor del 0.76% del total de agua potable en el planeta y al mismo tiempo es la única directamente disponible para consumo humano directo. La contaminación del agua dulce depende de varios factores y del medio con el que se encuentra en contacto, de ahí que las formas en que esta se contamina sean diferentes:



- Agua superficial

Es causada por la descarga directa o indirecta de desechos líquidos y sólidos industriales y municipales no tratados o tratados inadecuadamente en ríos, lagos, arroyos y embalses tanto en zonas urbanas como en zonas rurales

- Agua subterránea

Esta se produce cuando se utilizan en gran medida químicos agropecuarios o algún otro producto químico o mineral que filtra por las capas del subsuelo y contamina las reservas freáticas.

Con esta clara premisa se entiende la importancia del tratamiento de las aguas residuales y el cuidado en su disposición para no afectar el equilibrio natural, para lo que se han ideado variados sistemas de tratamiento que se clasifican principalmente en 3 tipos: biológico, físico y químico. En el primer caso se utilizan microorganismos que degradan la materia orgánica disuelta en el agua, en el segundo caso se aprovechan las características físicas de las partículas contaminantes para poder separarlas del agua y en el tercer caso se adicionan componentes químicos capaces de reaccionar con las partículas y organismos contaminantes presentes y así separarlos y/o eliminarlos del agua.

México, como país, enfrenta serios problemas en materia ambiental, la descarga de contaminantes al ambiente de forma descontrolada que ha ocasionado daños graves al ambiente siendo muy afectados los cuerpos de agua dulce, que, entre otros, ocasionan:

- Problemas en la calidad del agua para consumo humano.
- La pérdida y destrucción de ecosistemas.
- La falta de abastecimiento de agua potable para uso agrícola por la severa contaminación del recurso.

Las regiones centro y norte son de las más densamente pobladas del país, el abastecimiento de servicios como el agua a las poblaciones ha ocasionado la sobre-explotación de los mantos acuíferos, problema que se ve agravado por la

severa contaminación de las aguas superficiales por lo que la calidad del agua en general se ha alterado considerablemente. (de la Vega, 2012)

En el capítulo 2 se habla del marco teórico, donde se empezará por definir el contexto general de la situación hídrica en el país y en el lugar donde se realizó el estudio, indicando los parámetros en torno a los cuales surgió la idea de buscar una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales del beneficiado del café.

El proceso del beneficiado húmedo del café se explica paso a paso en el capítulo 3 para dar un claro entendimiento de las etapas de transformación a las que se somete el café en esta industria, y a su vez se detalla cómo se producen las aguas residuales que tan dañinas pueden resultar para el medio ambiente de disponerlas sin darles tratamiento. En el capítulo 4 se comenta sobre la importancia de definir cuál es el impacto ambiental del beneficiado húmedo del café haciendo énfasis en las aguas residuales, que como ya mencionado, representan una fuerte e importante fuente de contaminación a los cuerpos de agua y al suelo cuando no se les da un tratamiento adecuado, para lo que en el capítulo 5 se hace referencia al panorama general de tratamiento de estas aguas residuales.

El capítulo 6 habla de la propuesta de tratamiento, en donde considerando las necesidades básicas a cubrir y tomando en cuenta las condiciones generales que hay que satisfacer; terreno, ubicación, tamaño, volumen de agua residual y capital económico, se idea una solución que satisfaga todos estos aspectos y que los englobe de tal forma que resulten en una ventaja para el proceso.

La única forma de medir la eficiencia de la planta de tratamiento es analizando los resultados de operación de la misma; en el capítulo 7 se verifica entonces que el agua residual tratada cumpla con los límites permisibles de contaminantes establecidos por la Norma Oficial Mexicana.

Si bien la planta se desarrolló con la intención de atender diversas necesidades, las propuestas de mejora que en el capítulo 8 se exponen tienen la

intención de, con la implementación de nuevas herramientas, pueda efficientarse el proceso y hacerlo más rápido, a la vez que puedan mejorarse todavía más las características del agua tratada.

## **Objetivo**

El objetivo de esta tesis es proponer e implementar una planta de tratamiento de aguas residuales para tratar el agua producto del beneficiado del café de tal forma que la descarga de la misma cumpla con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 en materia de descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Panorama Hídrico Nacional**

La marcada diferencia en la distribución del agua en México es uno de los más grandes problemas a los que se enfrenta el país. El predominante clima semiárido, las prolongadas sequías que se han presentado en años anteriores y la sobrepoblación y su dispareja distribución en el territorio nacional han creado un escenario de preocupante escasez del recurso hídrico. La zona centro – norte es la que resulta más afectada pues es justamente en la que habita la mayor parte de la población del país y la que cuenta con menos fuentes naturales de agua, de tal que para abastecer estas regiones del vital líquido ha sido necesaria la construcción de grandes y costosas obras de ingeniería.

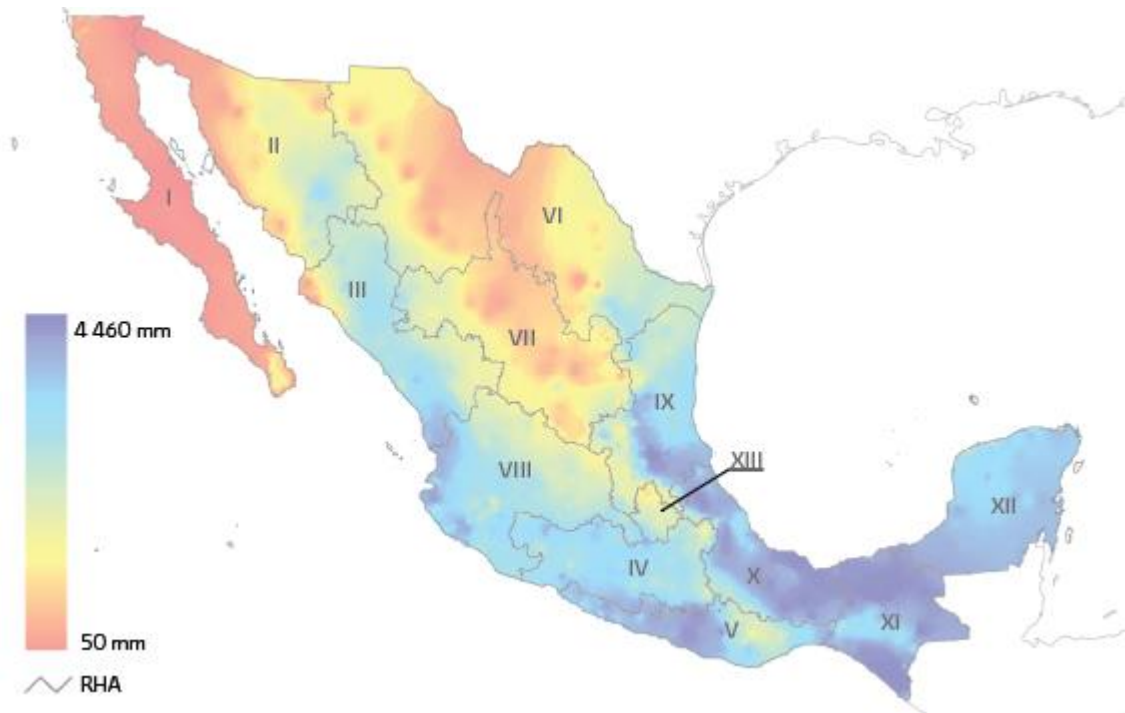
De la Vega (2012) menciona que el promedio anual de precipitación es menor a 500 mm en 52% del territorio, mientras que en el 7% es mayor a 2,000 mm y sobrepasa los 3,200 mm sólo en la zona del sureste del país.

Anualmente México recibe del orden de 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 73.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 22.1% escurre por los ríos o arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, así como la recarga incidental, anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (tabla 2.1) (CONAGUA, 2011).

Es importante contemplar también la distribución temporal y espacial del agua renovable en el país; la primera refiere a las variaciones en la disponibilidad del agua a lo largo del año dado que la mayoría de las lluvias ocurren en el verano, presentándose clima seco en el resto del tiempo. La segunda hace caso a la distribución de la precipitación en el país (figura 2.1); hay regiones donde la

precipitación es mucho más abundante y existe una baja densidad de población, y viceversa.

**Figura 2.1** Distribución de la precipitación anual en México. 1971- 2000

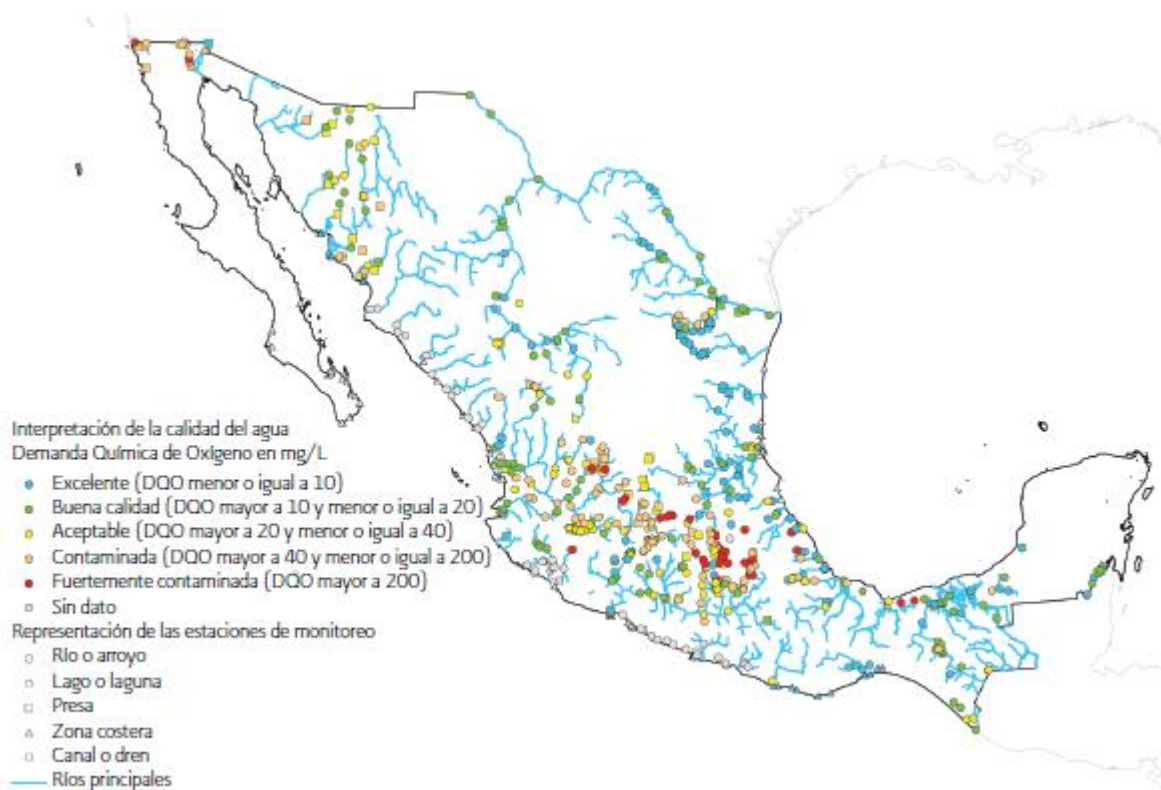


**Nota:** Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2010. Fuente: CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. Capítulo 2. Situación de los recursos hídricos (p. 23). Ciudad de México, 2011.

El agua limpia y fresca se da por hecho en muchos lugares, y una gran parte de la población es inconsciente de todo lo que hay detrás de abrir una llave y disponer directamente de ella. Es una realidad que este recurso es cada vez más escaso, en principio por la sobreexplotación, pero también por el aumento en la contaminación de sus fuentes. Es de conocimiento público, también, que en México un volumen considerable de aguas residuales es dispuesto sin haberle dado algún tipo de tratamiento, resultando en alteraciones importantes al suelo y a los cuerpos superficiales de agua en zonas urbanas y rurales por igual, creando un contexto de grave riesgo al equilibrio ambiental y a la salud humana.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) es el organismo administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) encargada de, entre otras funciones, administrar, gestionar y custodiar las aguas nacionales, analizar y resolver conflictos derivados de su explotación, aprovechamiento o conservación y de proponer las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en materia hídrica. Ha hecho evaluaciones de la calidad del agua en el país, la última en 2009, donde se determinó que 21 de las 37 cuencas en las que está dividido el territorio nacional están fuertemente contaminadas. Puede observarse en la figura 2.2 los parámetros de calidad del agua basados en el indicador DQO.

**Figura 2.2** Calidad del agua según indicador DQO, en sitios de monitoreo de agua superficial en 2009



**Nota:** Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2010. Fuente: CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. Capítulo 2. Situación de los recursos hídricos (p. 38). Ciudad de México, 2011.

## Situación hídrica en el Estado de Chiapas

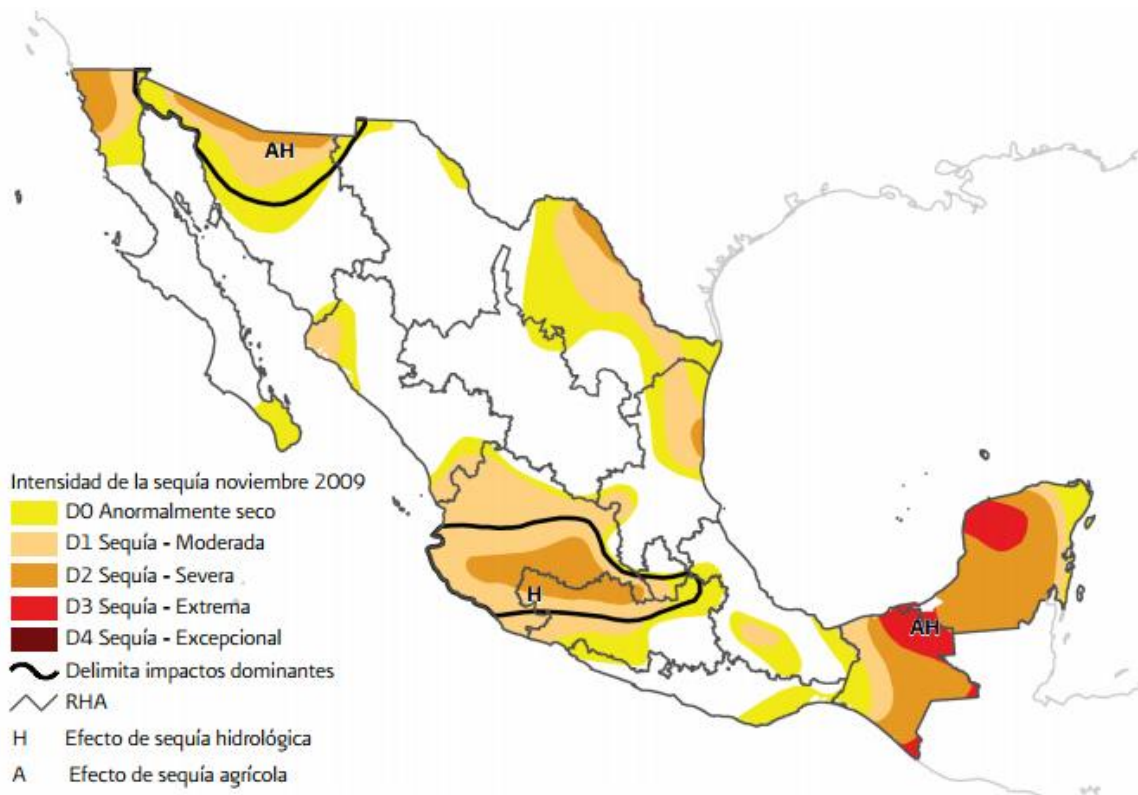
El estado de Chiapas pertenece a la Región Hidrológico – Administrativa (en adelante RHA) XI Frontera Sur, que en 2010, acorde a la Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional, registró en el período 1971-2000 la precipitación pluvial normal anual más alta de todas las RHA del país, de 1846mm, seguido por la RHA X Golfo Centro, con 1558mm y la RHA XII Península de Yucatán, con 1218mm. De la misma forma cuenta con la cifra más alta de agua renovable; 157 754 hm<sup>3</sup>/año, que para una población determinada a diciembre de 2009 de 6.62 millones de habitantes, corresponde un volumen de agua renovable de 23 835 m<sup>3</sup>/hab/año.

El escurrimiento superficial es otro parámetro de importante consideración pues corresponde a los cuerpos de agua que se encuentran más fácilmente accesibles para un aprovechamiento directo, y nuevamente la RHA XI Frontera Sur es la que cuenta con la media de escurrimiento natural superficial total más alta, de 139 739 hm<sup>3</sup>/año. Dos tercios del escurrimiento superficial está repartido en 7 ríos principales, entre los cuales el Grijalva-Usumacinta es el más importante, con un volumen de 115 536 hm<sup>3</sup>/año. La gran medida del escurrimiento superficial de la región, que comprende el 88.6% del agua renovable total, favorece su aprovechamiento para producción eléctrica; la capacidad instalada en el estado de Chiapas es de 4800 mWh.

Por otro lado, a pesar de ser uno de los estados con mayor precipitación, es también uno en los que los efectos de las sequías son más severos; a finales de la temporada de lluvias en 2009, Chiapas reportó una sequía severa-extrema que hace mucho más contrastante la diferencia climática entre la temporada de lluvias y la de estiaje que en conjunto con el reporte de CONAGUA sobre disminuciones de disponibilidad en las presas del estado dejan en evidencia la importancia de hacer mayores esfuerzos para la preservación del agua (figura 2.3).



**Figura 2.3** Condiciones de sequía al final de la temporada de lluvias, 2009

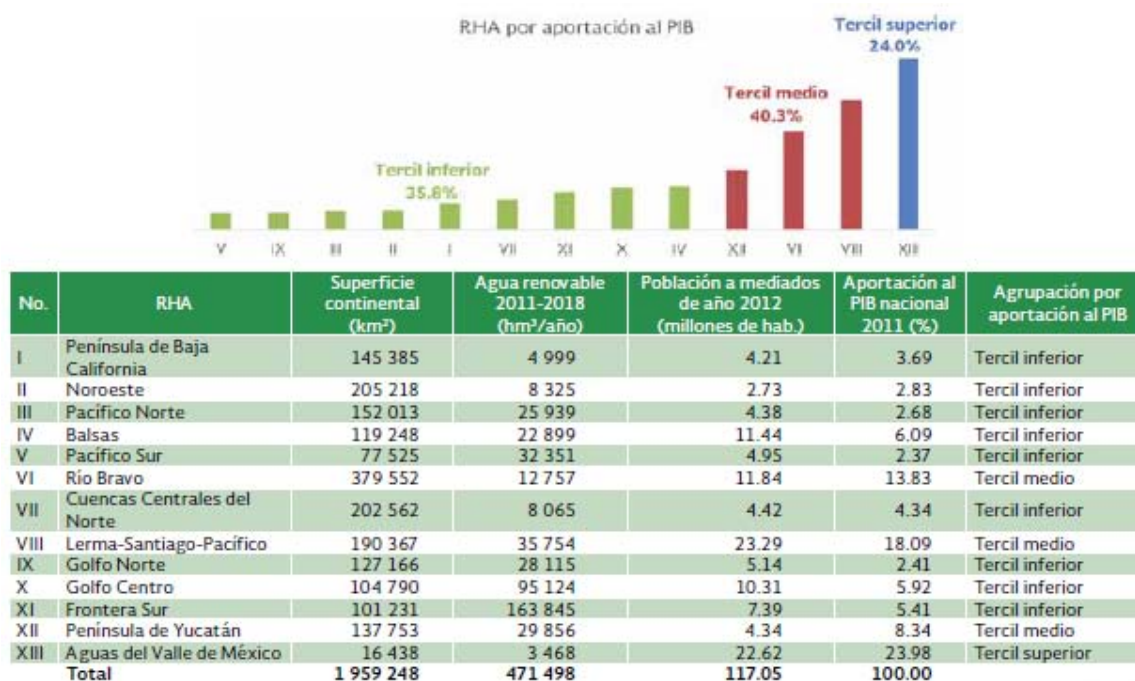


**Nota:** Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2010. Fuente: CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. Capítulo 2. Situación de los recursos hídricos (p. 27). Ciudad de México, 2011.

Otro aspecto a considerar y que también deja entre visto la necesidad de dar un mejor aprovechamiento del recurso hídrico en el país es la relación entre la disponibilidad del agua en las regiones hidrológicas y la aportación de las mismas (como delimitaciones geográficas) a la economía nacional. Para dar una idea de a lo que anterior refiere, en la figura 2.4 están las RHA mostradas en orden creciente respecto a la aportación de cada una al PIB, pudiendo fácilmente agruparlos en terciles donde se observan las significativas variaciones de cada una de estas en un esquema de comparativa entre el agua renovable, la población, y la propia aportación al mencionado PIB.

En el tercil superior, la RHA XIII Aguas del Valle de México tiene casi la cuarta parte de aportación al PIB nacional, siendo que cuenta solamente con el 0.7% del agua renovable del país. En contraste, en el tercil inferior, nueve RHA aportan el 35.8% del PIB nacional, con el 82.6% del agua renovable.

**Figura 2.4** Gráfica y tabla comparativa del agua renovable, población y aportación al PIB nacional de cada RHA



**Nota:** Los cálculos de agua renovable se refieren a valores históricos de acuerdo con la disponibilidad de estudios hidrológicos. El cálculo de agua renovable correspondiente al 2011 consideró un ciclo completo de actualización de datos hidrológicos, por lo que se mantendrá constante para el periodo 2011-2018. Las sumas pueden no coincidir por el redondeo de cifras.

Fuente: Conapo. *Proyección de la población 2010-2050*. Consultado en:

<http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones> (15/08/2013).

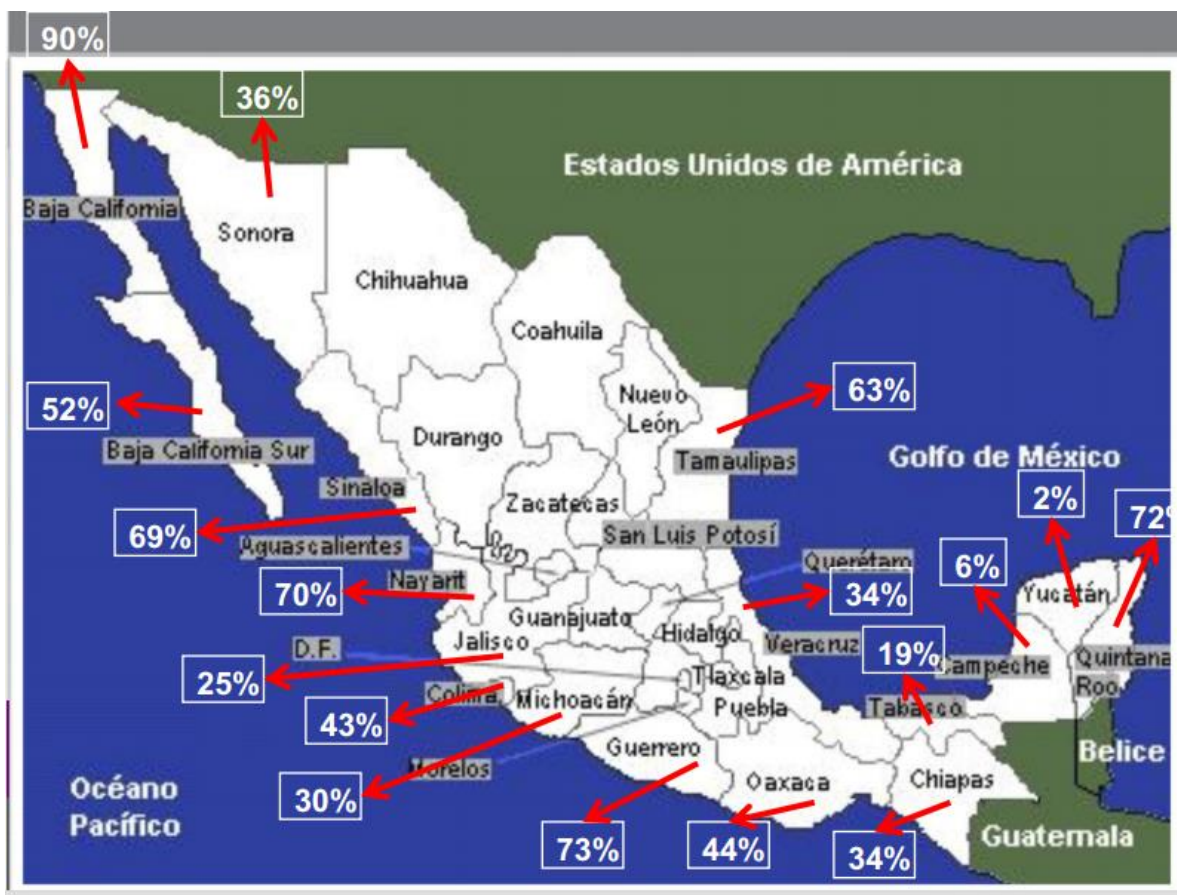
Para la superficie continental: INEGI, *Marco Geoestadístico Municipal, versión 3.1.1. 2008*.

Para el cálculo del PIB: Conagua. Subdirección General de Planeación, 2013. Elaborado a partir de: INEGI. *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa, Base 2008*. Para el cálculo del agua renovable: Conagua. Subdirección General de Planeación. 2013. Elaborado a partir de: Subdirección General Técnica. 2013.

Fuente: División Hidrológico-Administrativa, Agua Renovable (2013). Contraste regional entre desarrollo y agua renovable. En Comisión Nacional del Agua (Ed.) del libro *Estadísticas del Agua en México, Edición 2013*. (pp. 10) Distrito Federal, México. SEMARNAT.

Sergio Ramos Osorio (2010), en el marco del 6° Encuentro de Playas Limpias llevado a cabo en Ixtapa, Zihuatanejo, el 3 de junio de 2010, habló sobre el porcentaje de cobertura de tratamiento de aguas residuales por entidad federativa con playa en el año 2009. En la figura 2.5 puede observarse que el estado de Chiapas únicamente trata el 34% de las aguas residuales que produce.

**Figura 2.5** % de cobertura de tratamiento en entidades federativas con playa



**Nota:** Sergio Ramos Osorio, 2010. Fuente: Sergio Ramos Osorio. 6° Encuentro de Playas Limpias, 2010. Ponencia. Normatividad y Tratamiento de Aguas Residuales. Ixtapa, Zihuatanejo, Guerrero, 2010.

## **2.2 Normativa Gubernamental en Materia de Descarga de Aguas Residuales**

Los antecedentes de la actual política ambiental se remontan a los años 40 cuando se promulgó la Ley de Conservación de Suelo y Agua, que 30 años más tarde se transformó en la Ley para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. Fue hasta 1972 cuando se empezó a dar frente a los problemas ambientales con un enfoque más sistemático mediante la Subsecretaría para el Mejoramiento del Medio Ambiente, perteneciente a la Secretaría de Salubridad y Asistencia, organización administrativa del gobierno federal que buscaba dar solución a los efectos ambientales resultantes de una nula regulación en el manejo de los residuos, en la emisión de los contaminantes a la atmósfera y en las descargas a los cuerpos de agua; consecuencias de la estrategia de desarrollo nacional que en aquel entonces se centraba en impulsar la industrialización bajo un esquema de sustitución de importaciones y de protección al mercado interno que a su vez derivó en un modelo de explotación intensiva y extensiva de los recursos naturales, en particular por parte del sector primario.

En 1982, y a partir de esa fecha, la política ambiental mexicana adquirió un enfoque integral; tras reformas a la constitución para la creación de nuevas instituciones con bases jurídicas y administrativas precisas se crea la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), cuya función era reorientar al país hacia una nueva política ambiental y garantizar el cumplimiento de la entonces promulgada Ley Federal de Protección al Ambiente. Para 1987 el Congreso de la Unión contaba con facultad para legislar en materia de protección al ambiente; reforma que sumada a las leyes anteriores dieron pie a la publicación en 1988 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEEPEA), misma que sigue siendo la base de la política ambiental del país.

Con la creación de la Comisión Nacional del Agua en 1989 como autoridad nacional en materia de administración, protección y vigilancia en el cumplimiento

de las normas en materia hídrica, la instauración de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) creada ante la necesidad de una planeación en el manejo de los recursos naturales y políticas ambientales con un enfoque económico y social, así como la integración de la Subsecretaría de Pesca (SEPECSA), el Instituto Nacional de Ecología (INE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y la Comisión para el Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), entre otras, se crea, en Noviembre de 2000, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), organismo federal que gestiona e impulsa la protección ambiental y de los recursos naturales mediante una incidencia directa en las causas de la contaminación y de la pérdida de ecosistemas y biodiversidad.

Este nuevo modelo institucional volvió la política ambiental una política de estado que ha marcado la pauta hacia un desarrollo sustentable donde se articulan los objetivos económicos, sociales y ambientales en una forma integral y estructurada.

## **NOM-001-SEMARNAT-1996**

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales (SEMARNAT, citado por CONAGUA, 1997).

En la tabla 2.1 se muestran los límites máximos permisibles para contaminantes básicos, es decir, aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En la tabla 2.3 se muestran los límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros.

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																				
PARÁMETROS  (migran por litro, excepto cuando se especifique)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS						SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (mg/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno,	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.

P.D. = Promedio Diario, P.M. = Promedio Mensual, N.A. = No es aplicable (A), (B) y (C) Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA METALES PESADOS Y CIANUROS																				
PARAMETROS (*)	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO					
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)		Uso en riego agrícola (A)		HUMEDALES NATURALES (B)	
(miligramos por litro)	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuro	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	3.0	1.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobalto	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0	4	6.0	4.0	6.0
Cromo	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1	1.5	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(\*) Medidos de manera total.

P.D.= Promedio Diario, P.M.= Promedio Mensual, N.A.= No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

## NOM-027-ECOL-1993

La Norma Oficial Mexicana NOM-027-ECOL-1993 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria del beneficio del café.

Esta norma fue abrogada cuando entró en vigor la NOM-001-SEMARNAT-1996, el 7 de enero de 1997. Sin embargo, y como punto de comparativa, se indican en la tabla 2.3 los límites máximos permisibles que dicha norma marcaba respecto a los parámetros que consideraba en la descarga.

**Tabla 2.3** Límites máximos permisibles para las descargas de aguas residuales provenientes de la industria del beneficiado del café

<b>Límites Máximos Permisibles</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Promedio Diario</b>	<b>Instantáneo</b>
pH (Unidades de pH)	6 – 9	6 – 9
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	150	180
Grasas y Aceites (mg/L)	10	20
Sólidos Sedimentables (mg/L)	1.0	2.0
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	150	180
Materia Flotante (mg/L)	Ausente	Ausente

**Fuente:** Instituto Nacional de Ecología. (2007). NORMA Oficial Mexicana NOM-CCA-027-ECOL-1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria del beneficiado del café. Recuperado de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/216/cca27.html> el 19 de enero de 2015.



## 2.3 Tratamiento de las aguas residuales

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI, México contaba con una población total de 112'336,538 habitantes, de éstos 25'834,979 (23%) se asentaban en 188,593 localidades con población hasta 2,500 habitantes. En 2010 la cobertura promedio a nivel nacional del servicio de agua potable fue el 90.9%, que corresponde al 95.59% en zonas urbanas y 75.7% en zonas rurales. En cuanto al alcantarillado, la cobertura nacional promedio fue del 89.6%, que corresponde al 96.27% en las zonas urbanas y 67.7% en las zonas rurales, lo que significa que 17.499 millones de habitantes en zonas rurales tienen este servicio: 10.43 millones de habitantes descargan a fosas sépticas (40.4% de la población rural), y 7.06 millones de habitantes (27.3%) descargan a redes de alcantarillado. De la población rural 8.34 millones (32.3% de la población) no cuenta con servicio alguno de saneamiento (CONAGUA, 2013).

Respecto a las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación, para 2009, el estado de Chiapas ocupaba la tercera posición en capacidad instalada con 6.18 (m<sup>3</sup>/s), precedido por Guerrero, con 15.33 (m<sup>3</sup>/s) y Veracruz, con 11.62 (m<sup>3</sup>/s) y la segunda posición respecto al caudal tratado con 3.04 (m<sup>3</sup>/s), tomando la primera posición Veracruz, con 8.69 (m<sup>3</sup>/s). (Adaptado de CONAGUA, 2011).

En el contexto rural, que interesa a este documento, sólo 10.43 millones de habitantes, 40% de la población rural de acuerdo al Censo de Población y Vivienda 2010 de INEGI, disponían de fosas sépticas como método para tratar sus aguas residuales (CONAGUA, 2013). El saneamiento para esta parte de la población considera fosas sépticas secas o húmedas, pozos negros, letrinas ecológicas y otros, que, aunque en su mayoría provienen de programas de apoyo federales, estatales y/o municipales y su desarrollo ha sido extensivo resultan aún insuficientes dada la magnitud del número de localidades, presentándose en la mayoría de los casos la descarga directa o escorrentía hacia los arroyos y otros cuerpos receptores naturales causando los diversos problemas que esto implica.

## El agua residual

Es como se denomina a aquella resultante de haber utilizado el agua natural o de alguna red de abastecimiento para un uso determinado (municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario, etc.). Esta agua está contaminada, es decir, degradada de sus características originales, con sustancias de carácter orgánico e inorgánico y puede ser nociva tanto para el medio ambiente como para cualquier consumidor. Su composición es variable; las características que adquiere pueden variar de una descarga a otra, dependiendo del uso que se le dio y de las sustancias con las que estuvo en contacto.

La FAO<sup>1</sup> (Food and Agriculture Organization) define el agua residual como:

*“Agua que no tiene valor inmediato para el que se utilizó, ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella. No obstante, las aguas residuales de un usuario pueden servir de suministro para otro usuario en otro lugar.”*

La NOM-001-SEMARNAT-1996<sup>2</sup> define al agua residual como:

*“Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.”*

Compete a la normativa de cada país indicar y especificar bajo qué condiciones se considera al agua como residual, así como establecer las unidades de medición de la carga contaminante e indicar los límites máximos permisibles acorde al tipo de agua residual y a la naturaleza de la descarga.

La mayoría de las unidades se expresan en una relación masa-volumen; (mg/L) y/o ppm, y la carga contaminante en particular, se mide en unidades de masa por unidad de tiempo.

## Características del agua residual

El agua residual tiene componentes orgánicos e inorgánicos que pueden ser biodegradables y no biodegradables. Los primeros son el sustrato que los microorganismos asimilarán naturalmente mientras que los segundos son componentes tóxicos o inertes, en su mayoría.

Dadas las condiciones en las que se presenta el agua residual, en los puntos de origen de los efluentes existen ciertos factores de carácter químico, físico y biológico que nos permiten evaluar estas aguas y situarlas dentro de un margen de impacto ambiental. Acorde a la cantidad de dichos componentes se puede calificar el grado de contaminación como fuerte, medio o débil y su conocimiento es indispensable para la regulación de las descargas a cuerpos de aguas nacionales y para los proyectos y operación de instalaciones y plantas de tratamiento de aguas residuales.

A continuación se describen las más importantes de cada tipo que están incluidas en la normatividad que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas de aguas residuales a cuerpos de agua nacionales y que aparecen como referentes importantes para el caso particular de las aguas residuales producto del beneficiado del café.

- Características Físicas

### Sólidos Totales

La característica física más importante en términos de normatividad ambiental es el contenido de sólidos totales o sólidos totales totales, estos son cualquier materia (orgánica e inorgánica) que se encuentre suspendida o disuelta en el

medio acuoso. Estos sólidos totales se dividen en sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.

### Temperatura

La temperatura es un parámetro importante por el impacto que genera sobre la vida acuática ya que afecta directamente la cantidad de oxígeno disuelto en el medio y las velocidades de reacción y asimilación de sustancias químicas y agentes biológicos.

- Características químicas

### Materia Orgánica

En el agua residual promedio, un 75% de los sólidos suspendidos y un 40% de los sólidos disueltos son de naturaleza orgánica. Los principales compuestos orgánicos que se encuentran en el agua residual son:

- i. Proteínas: 40-50%
- ii. Carbohidratos: 25-50%
- iii. Grasas y Aceites: 10%

Para poder medir la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua se han ideado diversos métodos y procedimientos de laboratorio estandarizados, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno y la Demanda Química de Oxígeno.

### Demanda Bioquímica de Oxígeno

Este parámetro determina la cantidad de oxígeno disuelto que es utilizado por los microorganismos para realizar la asimilación del sustrato orgánico disuelto en el agua y arroja una cifra aproximada del oxígeno necesario para estabilizar un agua

de desecho. Se ha estandarizado el parámetro como la diferencia de oxígeno inicial contra el medido en un lapso de 5 días a una temperatura constante de 20 grados centígrados, a una atmósfera de presión y sin la reincorporación de oxígeno a la muestra. De aquí se obtiene el término  $DBO_{5-20}$ , con unidad expresada en  $kg/m^3$  o, comúnmente, en  $mg/l$ .

### Demanda Química de Oxígeno

Es la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica que se puede oxidar en el agua de desecho. Esta indica la cantidad total de oxígeno necesaria para descomponer y degradar química y biológicamente la totalidad de la materia orgánica contenida en el agua; es un parámetro que usualmente es más elevado que la  $DBO_{5-20}$  dado que en la mayoría de las veces existe un porcentaje de los contaminantes que no es asimilado biológicamente.

### Oxígeno Disuelto

Esta es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua. Es un excelente indicador para evaluar la calidad del agua debido a que mayores niveles de oxígeno disuelto indican bajos contaminantes por degradar. Por otro lado si los niveles de oxígeno son muy bajos, es claro indicio de que el agua tiene un contenido importante de agentes contaminantes. Existen además variables que afectan los niveles de oxígeno disuelto en el agua, como la temperatura de la misma y la presencia o no de materia vegetal como plantas y algas que están directamente relacionadas con la producción y consumo de oxígeno.

### Potencial de Hidrógeno

Es la medida adimensional para la acidez o alcalinidad de una sustancia y mide la concentración de iones de hidronio en dicha sustancia. El pH de un agua

razonablemente limpia o de origen natural, no contaminada, oscila entre las 6 y las 9 unidades de pH.

#### Fósforo Total

El fósforo es un elemento muy fácilmente aprovechable por algas que pueden eutrofizar fácilmente los cuerpos de agua, y éstas y otras plantas que consumen el oxígeno disuelto del agua dejan lugar a una deducción inductiva en las cantidades tolerables de fósforo, de acuerdo con el hecho de que 1 mg de fósforo requiere, en un paso de su ciclo en algún cuerpo de agua, de una cantidad de 130 mg de oxígeno. (Fair, Gordon M., et al, 2008)

#### Nitrógeno Total

Este se encuentra presente en el agua residual en forma de nitritos, nitratos y amonio; sustancias que son utilizadas por las plantas en su metabolismo y que, por tanto, propician la eutrofización de los cuerpos de agua receptores. Por otro lado son sustancias que requieren de procesos microbiológicos para ser reducidos, y estos procesos consumen parte considerable del oxígeno disuelto del agua, disminuyendo las concentraciones de este parámetro y afectando así la calidad del agua.

### **Contaminantes básicos presentes en el agua residual**

Se hace referencia a los contaminantes básicos con aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a la Norma Oficial Mexicana se contemplan únicamente los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total (suma de las

concentraciones de nitrógeno Kjeldahl, de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/l de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH.

Por otro lado están también los contaminantes patógenos y parásitos, correspondientes a aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana y/o para la flora y fauna del cuerpo de agua receptor. En lo que corresponde a la Norma Oficial Mexicana se consideran únicamente los coliformes fecales y los huevos de helminto.

## **3. El proceso del beneficio húmedo en Finca San Carlos**

### **3.1 Desarrollo Sustentable y el Caso de Finca San Carlos**

#### ¿Qué es Finca San Carlos?

San Carlos es una finca que al igual que muchas otras en el estado de Chiapas, es productora de café. Su fundación se remonta a 1892, cuando la familia Hotzen llega a México por invitación del gobierno de Porfirio Díaz, que mediante las leyes de parcelización trajo a la región a las compañías deslindadoras con el objetivo de otorgar fáciles concesiones de terreno a terceros para el desarrollo de variadas actividades comerciales e industriales, entre las cuales el cultivo del café y algodón fueron de las más importantes, y así colonizar el sureste del país.

#### Ubicación geográfica

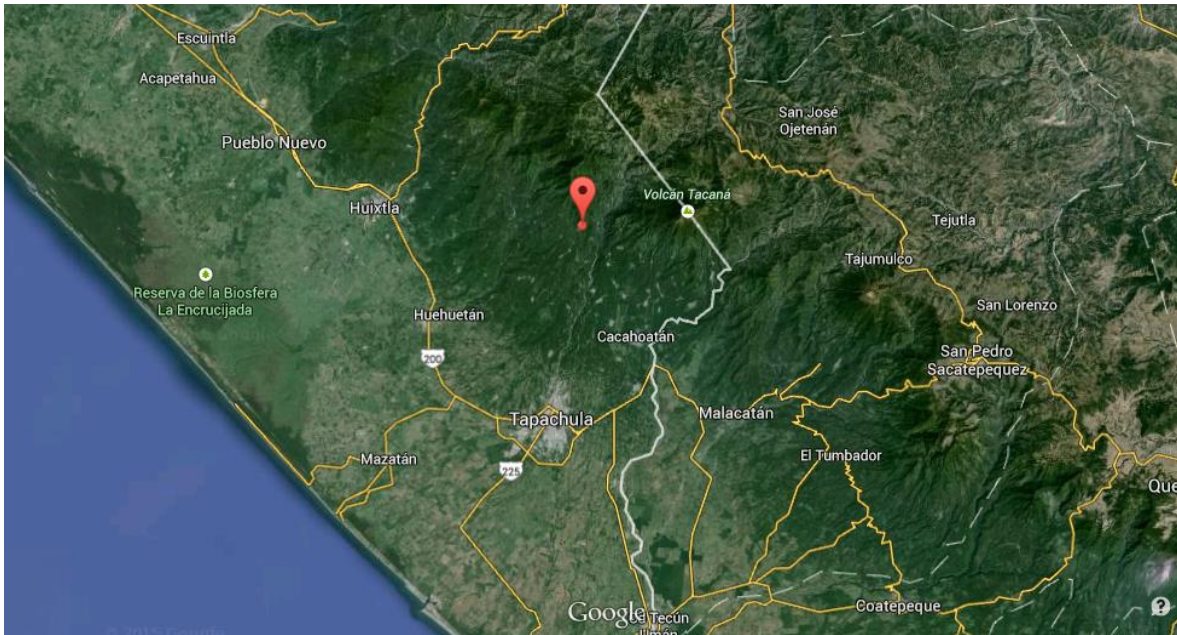
El casco de la finca está ubicado en las coordenadas 15.118096, - 92.227893 (15° 7'5.20"N, 92°13'40.40"O), en el sureste mexicano, dentro de las delimitaciones del municipio de Tapachula, en el Estado de Chiapas. Pertenece a la región hidrológica 23. Costa de Chiapas, a su vez regida por la Región Hidrológica Administrativa XI. Frontera Sur.

La finca está ubicada a 25 km al norte de la Ciudad de Tapachula (cabecera municipal), a 11 km del Volcán Tacaná y a 10km en línea recta de la frontera con Guatemala (Figuras 3.1 y 3.2). Se encuentra a una altura media de 1250 msnm.

El municipio de Tapachula limita al norte con Motozintla y Guatemala, al este con Cacahoatán, Tuxtla Chico, Frontera Hidalgo y Suchiate, al Sur con el Océano Pacífico y al oeste con Mazatán, Tuzantán y Huehuetán. Su extensión territorial es de 857 km<sup>2</sup>.

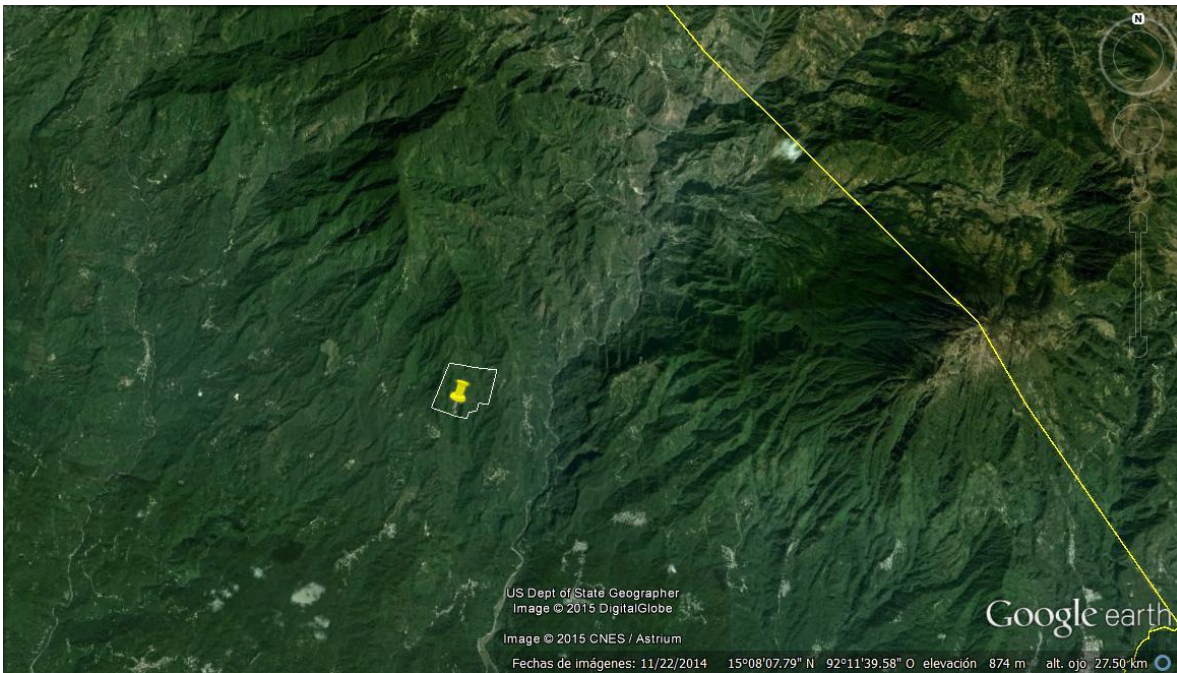


**Figura 3.1** Ubicación geográfica de Finca San Carlos



**Nota** Fuente: Ubicación geográfica de la finca [mapa digital]. (2015). Recuperado de <https://www.google.com.mx/maps/place/15%C2%B007'05.2%22N+92%C2%B013'40.4%22W/@15.0754612,-92.197182,94863m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x0:0x0>

**Figura 3.2** Ubicación del predio, detalle de topografía.



**Nota** Fuente: Ubicación geográfica de la finca [mapa digital]. (2015). Recuperado de <https://www.google.com.mx/maps/place/15%C2%B007'05.2%22N+92%C2%B013'40.4%22W/@15.0045708,-92.2322905,14469a,20y,39.76t/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x0:0x0>

## Condiciones climatológicas e hidrológicas

El municipio de Tapachula cuenta con 5 clasificaciones diferentes de climas:

1. **Am**, Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, 41.07% de la superficie municipal.
2. **A(w1)**, cálido subhúmedo con lluvias en verano, de mediana humedad, 31.64% de la superficie municipal.
3. **A(w2)**, cálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad, 17.66% de la superficie municipal.
4. **ACm**, semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, 4.45% de la superficie municipal
5. **C(m)**, templado con abundantes lluvias en verano, abarca el 5.18% de la superficie municipal

A la ubicación geográfica de Finca San Carlos le corresponde la clasificación C(m), clima templado, con abundantes lluvias en verano y una temperatura mayor a 18°C en el mes más cálido, y mayor a los 0°C en el mes más frío.

**Tabla 3.1** Registro mensual y anual total de precipitación en Finca San Carlos entre 2006 y 2013

Mes	Año							
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Enero	20	19	0	21	14	10	35	31
Febrero	40	60	183	35	61	60	132	13
Marzo	33	54	43	81.5	40.5	113.5	119	38
Abril	160	115	103.5	88.5	287	78.5	304	73
Mayo	902	348	220	478	654.5	245	326	446
Junio	830	357	559	633	585.5	1188	594	762
Julio	546	421	549	371	882	871	383.5	551
Agosto	507	530	613.5	346	878	1443	793	730
Septiembre	594	746	832.5	533.5	1115.5	1117	547	784
Octubre	464	514	425	475	567	622	323	484
Noviembre	42	81	40	127.5	119	61	235	101
Diciembre	54	14	18	82	3	51	24	35
<b>Total</b>	<b>4192</b>	<b>3259</b>	<b>3587</b>	<b>3272</b>	<b>5207</b>	<b>5860</b>	<b>3816</b>	<b>4048</b>

**Nota** Fuente: Registro anual de precipitación en Finca San Carlos (2014). Archivo personal. Alfredo E. Klein Moeller, Finca San Carlos, Tapachula, Chiapas.

En cuanto a la precipitación en el municipio de Tapachula, acorde al SMN, para 2009 llovió un total de 3831.5 mm, presentándose los valores mensuales más altos entre mayo y septiembre con una media de 535mm. La Tabla 3.1 muestra los datos de precipitación obtenidos en las instalaciones de Finca San Carlos del año 2006 al 2013, donde puede observarse que la media anual en el período indicado es de 4748mm, casi un 25% por encima de la precipitación anual que se presentó en la totalidad del municipio en 2009.

### La certificación Rainforest Alliance Certified y los criterios en materia de tratamiento de aguas residuales

Rainforest Alliance es una organización internacional sin fines de lucro que trabaja para la conservación de la biodiversidad y asegurar un desarrollo sostenible y sustentable mediante la transformación de las prácticas del uso de suelos, las prácticas comerciales y el comportamiento del consumidor. El alcance de la certificación cubre la totalidad de la finca, incluyendo la infraestructura, el cultivo y todas las actividades que dentro de ella se realicen.

Los objetivos de trabajo de Rainforest Alliance integran:

- Integrar la producción agropecuaria sostenible a las estrategias locales y regionales para favorecer la conservación de la biodiversidad y velar por el bienestar social y ambiental.
- Aumentar la conciencia de agricultores, comercializadores, consumidores e industrias acerca de la interdependencia entre ecosistemas sanos, agricultura sostenible y responsabilidad social.
- Inculcar en los comercializadores y consumidores la importancia de elegir productos que provienen de operaciones ambientalmente sostenibles y socialmente responsables.

Para ser merecedor de la certificación Rainforest Alliance Certified, la finca deberá cumplir con la política y las normas de la Cadena de Custodia de la RAS, que establece las mejores prácticas para los operadores que manejan, transforman, o etiquetan los productos de dicha finca. La Cadena de Custodia se refiere a todos los pasos en la cadena de suministro, desde la producción primaria, el procesamiento, transformación, manufactura, almacenamiento, transporte, etc. hasta la venta final (intercambio legal del producto).

“ ...

*Las fincas certificadas como Rainforest Alliance Certified™ cumplen con las exhaustivas normas de la Red de Agricultura Sostenible (RAS), una coalición de organizaciones conservacionistas sin fines de lucro, las cuales se ocupan de criterios sociales, económicos y ambientales. A través de un sistema de indicadores locales, las normas de la RAS pueden ser aplicadas a más de 100 diferentes cultivos cultivados en el trópico y el sub-trópico. El café, el té, las frutas y las flores son algunos de los cultivos más frecuentes...*

...

*...La RAS es una coalición de organizaciones conservacionistas independientes sin fines de lucro que promueve la sostenibilidad social y ambiental de actividades agrícolas mediante el desarrollo de normas para mejores prácticas de manejo. La RAS fomenta las mejores prácticas desde la finca al mercado, generando beneficios en las fincas a los productores a través del proceso de certificación, y proporcionando un mecanismo para los comerciantes, las marcas y los consumidores para promover y asegurar la sostenibilidad a lo largo de la cadena de valor...*

“

(Rainforest Alliance, 2012)

La RAS es propietaria de la “Norma de Agricultura Sostenible”, en la que se establecen los campos de evaluación que la finca deberá cumplir para aplicar a la certificación. El campo que interesa a este documento y para el que se desarrollo corresponde al capítulo **4. Conservación de los Recursos Hídricos**, descrito a continuación.

“

*El agua es vital para la agricultura y para las familias que dependen de ella. Las fincas certificadas realizan acciones para conservar el agua y evitar su desperdicio. Previenen la contaminación de aguas superficiales y subterráneas mediante el tratamiento y monitoreo de aguas residuales. La Norma de Agricultura Sostenible incluye medidas para prevenir la contaminación de aguas superficiales causada por el escurrimiento de sustancias químicas o sedimentos. Las fincas que no ejecutan estas medidas deben garantizar mediante un programa de monitoreo y análisis de aguas superficiales que no degradan los recursos hídricos, hasta que cumplan con las acciones preventivas estipuladas.*

**4.1 La finca debe ejecutar un programa de conservación de agua para fomentar el uso racional del recurso hídrico. Las actividades de este programa deben hacer el mejor uso de la tecnología y de los recursos disponibles. La finca debe contemplar la recirculación y reuso de aguas, el mantenimiento de las redes de distribución y la minimización del uso...**

...

**4.4 Todas las aguas residuales de la finca deben contar con un sistema de tratamiento de acuerdo con su procedencia y el contenido de sustancias contaminantes. Los sistemas de tratamiento deben cumplir con la legislación nacional y local vigente y contar con los permisos de operación respectivos. Deben existir procedimientos operativos para los sistemas de tratamiento de aguas industriales. Todas las plantas empacadoras deben contar con trampas con el objeto de evitar el vertido de sólidos de los procesos de lavado y empaque hacia los canales y ecosistemas acuáticos.**

**4.5 Criterio crítico. La finca no debe descargar o depositar aguas residuales industriales o domésticas en ecosistemas acuáticos sin demostrar que las aguas vertidas cumplen con los requisitos legales respectivos, y que sus características físicas y bioquímicas no degradan**

**la calidad del cuerpo receptor de agua. En ausencia de requisitos legales, las aguas vertidas deben cumplir con los siguientes parámetros mínimos:**

<b>Parámetro de calidad del agua</b>	<b>Valor</b>
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5, 20</sub> )	Menor de 50 mg/L
Sólidos suspendidos totales	
pH	Entre 6.0 – 9.0
Grasas y aceites	Menor de 30 mg/L
Coliformes fecales	Ausentes

**Se prohíbe mezclar aguas residuales con aguas no contaminadas para el vertido de aguas residuales al ambiente.**

...

**4.7 Criterio crítico. La finca no debe depositar en ecosistemas acuáticos ningún sólido orgánico o inorgánico tal como desechos domésticos o industriales, productos rechazados, escombros, tierra y piedras de excavaciones, basura de la limpieza de tierras, entre otros materiales.**

... “

(RAS, 2010)

### **3.2 Proceso del Beneficiado del Café**

El proceso al que se somete el grano de café, desde que se cosecha en el campo hasta que está listo para ser tostado y molido para preparar la bebida, lleva el nombre de “beneficiado”, y las instalaciones donde se lleva a cabo este proceso son llamados “beneficios”. Ahora bien, el beneficiado del café se realiza en dos etapas, la primera es en el “beneficio húmedo”, donde el uso del agua es indispensable, y la segunda en el “beneficio seco”, donde ya no es requerida; de ahí entonces que la contaminación del agua ocurre justamente en el proceso

correspondiente al “beneficio húmedo” y que por tanto es el que se explicará y en torno al cual se desarrolló el proyecto de la planta de tratamiento.

El fruto maduro del café (café cereza) una vez cosechado es un material altamente perecedero por lo cual debe ser rápidamente transformado a café pergamino seco (con humedad en el rango 10 al 12%) para preservar su alta calidad intrínseca. El proceso mediante el cual se transforma el café cereza (fruto) en café pergamino seco (semilla), se conoce con el nombre de “beneficio” y es “húmedo” porque se utiliza agua para el lavado de la semilla. Se da el nombre de “beneficiadero” (o propiamente “beneficio”) al establecimiento en el que se realizan en forma ordenada e higiénica, las operaciones y procesos destinados a transformar el café cereza en café pergamino seco (Puerta y Rodríguez, 2001).

El beneficiado húmedo es el método de procesamiento de café más utilizado en Centroamérica, México y Colombia, el método surgió como una alternativa para solucionar el problema de la fermentación inmediata y excesiva del café en zonas tropicales. Luego de la cosecha de la cereza se eliminan los componentes externos, después los frutos son depositados en despulpadoras para eliminar el epicarpio o pulpa. Seguidamente se utilizan tanques de fermentación para obtener la hidrólisis del mucílago mediante la acción de enzimas propias del grano y de microorganismos en el agua en donde el tiempo de fermentación es variable (Cervantes 1998, citado por Valadez, 1998).

Se requiere de altos volúmenes de agua; sobre todo por su uso como mecanismo de transporte del grano dentro de las instalaciones y como medio para su clasificación, por lo que ésta está sujeta siempre a contaminarse con materia orgánica proveniente de los subproductos de cada una de esas etapas. Es importante mencionar también que el agua y su uso en el beneficio es en todo momento bajo efecto de gravedad, es decir, que ésta se hace mover junto con los granos de café a lo largo de todo el proceso mediante diferenciales de pendientes entre el punto inicial y el final en cada subetapa.

El proceso en el beneficio húmedo en Finca San Carlos es, en orden, el siguiente:

### 3.3 Recolección (Cosecha)

- Llamado comúnmente “tapisca”, es la primera etapa de todo el proceso. Consistente en recolectar los frutos que están completamente maduros (Figura 3.3), característicos por su color rojo o amarillo intenso, dependiendo de la variedad. Sin embargo, dado que la recolecta es manual, es muy común que se mezclen frutos verdes, semimaduros, secos, enfermos, brocados, etc., que más tarde serán separados en el proceso del beneficiado dado que afectan considerablemente la calidad final del café.

**Figura 3.3** Recolecta del café maduro (Tapisca)



**Nota** Fuente: Tapisca de café [fotografía]. (2014). Recuperado de <http://primiciadiario.com/archivo/2013/se-reboso-la-taza-los-pequenos-cultivadores-de-cafe-en-cese-de-actividades/>



### 3.4 Recibido

- La segunda parte del proceso consiste en “recibir”, llamada así la tarea de medir los volúmenes (cajas; Una “caja” es la unidad de volumen estandarizada en esta industria, correspondiente a 100 libras de grano maduro) de café que los trabajadores recolectaron durante la jornada laboral. De ahí entonces que se le llame “recibidero” a la parte de las instalaciones del beneficio donde se lleva a cabo este proceso. Una vez medidos los volúmenes de café de cada trabajador, estos son depositados en un tanque sifón, que obedece a la forma de una pirámide invertida lleno de agua, con la intención de separar mediante densidades los granos de buena calidad, que se depositan en el fondo, y los de mala calidad o que tienen algún defecto, que flotan, así como hojas, palos y otros objetos indeseados que pudieran venir junto con los granos de café (Figura 3.4). Posteriormente los granos de buena calidad son extraídos del tanque mediante sifonado para continuar el proceso.

**Figura 3.4** Separación de granos de café de mala calidad por densidades (flotación)



**Nota Fuente:** Lavado del café [fotografía]. (2014). Recuperado de [http://www.cafejuquila.com/home/?page\\_id=50#](http://www.cafejuquila.com/home/?page_id=50#)



espacio destinado para hacerla composta y posteriormente darle uso como abono. Los granos despulpados se mueven a través de canales mediante agua para enseguida entrar a otro tanque separador consistente en una criba cilíndrica horizontal giratoria, semisumergida, y con un serpentín interior (o tornillo “sin fin”) (Figura 3.7), donde los granos de buena calidad caen entre las rendijas de la misma y se depositan al fondo y aquellos con algún defecto flotan, los cuales una vez atravesada la criba continúan por un canal de salida hacia un tanque de fermentación destinado para estos granos, que dada su mala calidad son llamados “café vano”. Los granos de buena calidad que se depositaron en el fondo son nuevamente sifonados hacia otro canal que los dirige a uno de los 5 tanques de fermentación (o fermento).

**Figura 3.6** Granos de café despulpado, antes de la fermentación.



**Nota** Fuente: Lavado de Café. Café despulpado [fotografía]. (2014). Recuperado de [http://www.cafejuquila.com/home/?page\\_id=50#](http://www.cafejuquila.com/home/?page_id=50#)

**Figura 3.7** Tanque separador de criba horizontal con tornillo “sin-fín”



**Nota Fuente:** Tanque de criba [fotografía]. (2014). Archivo personal. Alfredo E. Klein Moeller, Finca San Carlos, Chiapas

- El agua que drena a través de la rejilla de fondo de los tanques de fermento durante el proceso de despulpado corresponde a la totalidad del agua empleada en todo el proceso correspondiente hasta este punto, dada la continuidad que el mismo proceso establece. Corresponde entonces ésta a la primera de las dos fuentes de aguas residuales del beneficio y se dispone para darle tratamiento.
- Hasta aquí, el proceso tiene una duración de aproximadamente 2 horas, dependiendo de los volúmenes de café que se recolectaron en la jornada.

### 3.6 Fermentación

- El siguiente paso consiste en el proceso de fermentación, con la intención de retirar la capa remanente del despulpado llamada mucílago, que se encuentra fuertemente adherida a los granos de café, el cual está compuesto principalmente por pectinas y azúcar.

**Figura 3.8** Café despulpado en tanque de fermento



**Nota Fuente:** Tanque de fermento con café [fotografía]. (2014). Recuperado de <http://www.lucida.com.mx/DonJusto/Fermentacion.jpg>

- En la fermentación del café ocurren varios procesos donde básicamente las levaduras y las bacterias del mucílago mediante sus enzimas naturales oxidan parcialmente los azúcares produciendo ATP, ácido láctico, ácido acético y dióxido de carbono en su mayoría. Además se obtienen otros alcoholes como propanol, etanol y butanol y se producen también en menores cantidades otros ácidos como el succínico, fórmico, butírico y

sustancias olorosas como aldehídos, cetonas y ésteres. También se degradan los lípidos del mucílago del café y cambian el color, el olor, la densidad, la acidez, el pH, los sólidos solubles, la temperatura y la composición química y microbiana del sustrato. (Puerta, 2012)

- El mucílago, o miel, representa entre el 15.5% y el 22% en peso del fruto maduro, por tratarse de un material gelatinoso insoluble en el agua (hidrogel) es necesario solubilizarlo para convertirlo en un material de fácil remoción en el lavado (hidrosol). Para esto es necesario forzarlo a su degradación mediante la fermentación natural (bioquímica)... (Anacafé, 2014)
- El mucílago está fuertemente adherido a la cáscara del grano de café; desde el punto de vista fisicoquímico, el mucílago es un sistema coloidal líquido y liofílico o hidrogel, contiene agua, pectinas, azúcares y ácidos orgánicos, durante la maduración del grano de café el pectato de calcio (localizado en la laminilla media) y la protopectina de la pared celular son convertidos en pectinas (Elías, 1978). La concentración de la materia orgánica en las aguas procedente del fermento del café depende del volumen utilizado por el beneficio, y en particular si hay recirculación de agua o no.
- Todo esto se lleva a cabo en los tanques de fermento (Figura 3.8), los cuales son de forma rectangular de aproximadamente 6x2 metros de lado y una profundidad variable en pendiente que oscila entre 1.2 y 2.5 metros en el sentido longitudinal. Los tanques cuentan en el fondo de la parte más profunda (2.5m) con una rejilla para drenar el agua y una pequeña compuerta en el muro inmediato superior a ésta para dar salida al café cuando el proceso ha terminado.

- En este proceso los granos de café despulpados son dirigidos al tanque de fermento seleccionado mediante un sistema de canales y el uso de agua, ingresando a éste en el punto donde se presenta la menor profundidad (1.2m), para que se vaya llenando de forma gradual y sin necesidad de mecánicamente acomodarlo, a la vez que la compuerta de salida está cerrada y la válvula de descarga de la rejilla está abierta, para que el agua pueda ser drenada.
- Es importante drenar el agua con la que el café entró al tanque dado que en el caso particular de Finca San Carlos, el proceso de fermentación se hace “en seco”, es decir, que el café no se encuentra sumergido. Una vez terminado el proceso de despulpado del café recibido en la jornada laboral, estando ya todo este en el tanque de fermentación y el agua debidamente drenada, se tapa el café con una lona con la intención de mantener la humedad y la temperatura tan necesaria en este proceso, que dura aproximadamente 72 horas.
- Dadas las necesidades actuales de las empresas cafetaleras en materia de calidad es importante realizar una fermentación controlada previa al secado para poder garantizar las características del producto final, ya que si no se retira de forma efectiva el mucílago pueden afectarse gravemente las cualidades del grano, reflejándose en una mala calidad en la bebida. Esa fermentación controlada se basa principalmente en el tiempo de fermento que se establece en función del volumen de café despulpado, pudiendo variar éste entre 32 y 56 horas, además de prever que los tanques no tengan algún remanente de agua que pudiera afectar o modificar el proceso general de fermento en las capas inferiores de café.

### 3.7 Lavado

- El lavado es el último proceso al que se somete el café en el beneficio húmedo y consiste justamente en “lavar” los granos de café una vez terminado el proceso de fermentación, con la intención de remover todas las sustancias líquidas y sólidas remanentes de la degradación del mucílago. Para esto primero se retira la lona que cubre el café en el tanque de fermento, se cierra la válvula de descarga de la rejilla de fondo del tanque y se abre la compuerta de salida. Mediante una manguera de agua a presión se hacen desplazar los granos a través de dicha compuerta y a través de un canal hasta el tanque de lavado, que es de forma rectangular, de 1x8 metros y 1.2 m de profundidad, con un fondo en pendiente ligera, entrando los granos por la parte más alta del mismo. En el otro extremo se encuentra instalada una bomba sumergible para desazolvar que se hace operar una vez se haya vaciado el tanque de fermento y esté todo el café en el tanque de lavado. Dada la capacidad de esta bomba de succionar líquidos, sólidos y semisólidos permite, mediante la fricción ejercida entre el fluido y los granos, limpiar a estos últimos de restos del fermento.
- La bomba conduce la mezcla de granos y agua hacia una tolva rectangular (Figura 3.9) de 1.5m de lado, con orificios en sus paredes, instalada sobre un tanque receptor, permitiendo que el agua drene a través de estos y el café ya lavado se vaya acumulando. Una vez terminado este proceso, las aguas que filtraron a través de los orificios del silo, retenidas en el tanque receptor, son dispuestas para darles tratamiento. Los granos de café son entonces dirigidos hacia un último tanque, entrando a otra criba horizontal giratoria para someterlos a una última separación, dado que en el fermento pueden perder calidad algunos de estos. Este tanque recibe todo el café lavado y lo canaliza hacia los patios de secado. Dado que los granos se encuentran ya “limpios”, el agua que se emplea en éste último tanque se contamina mínimamente. Una vez lavado, permanece aproximadamente 5



horas en el último tanque hasta que se haya hecho espacio en algún patio de secado para entonces canalizarlo.

- El proceso de lavado es relativamente rápido, de 30 a 45 minutos aproximadamente, y dependiente de igual forma de los volúmenes de café.

**Figura 3.9** Tolva para café lavado



**Nota Fuente:** Tolva para café lavado [fotografía]. (2014). Archivo personal. Alfredo E. Klein Moeller, Finca San Carlos, Chiapas

Entonces, de forma general, se tienen 2 tipos diferentes de aguas residuales producto de 2 etapas diferentes en el proceso del beneficiado; la primera es residual del proceso de despulpado, que llamaremos “Agua de

Despulpado” y del consiguiente transporte del café durante todas las subetapas pertenecientes a éste, y la segunda, llamada “Agua de Lavado”, derivada del proceso específico de lavado, después del fermentado. Cada una de estas aguas tiene características diferentes en cuanto a agentes contaminantes, que si bien son en todo caso orgánicos y no contienen elementos tóxicos o metales pesados, mantienen particularidades entre sí debido a que entran en contacto con distintos subproductos del café.

### **3.8 Características del agua del Influyente y el Efluente**

La comparativa entre el agua del influente y del efluente del beneficio indicará claramente el grado de contaminantes que ésta adquiere durante el proceso de beneficiado, y será justamente el resultado de dicha comparativa la base sobre la cual se fundamentará la operación de la planta de tratamiento, validando la efectividad y eficiencia del proceso mientras se establece un indicador que determinará el objetivo a cumplir; que el agua del efluente de la planta tenga características físico-químicas parecidas a las aguas del influente del beneficio, con la clara intención de devolverla al medio natural sin desestabilizar el cuerpo receptor.

Una vez aclarado esto, procede a explicar con cierto detalle las características del agua del influente y del efluente del beneficio, siendo la última la que corresponde al influente de la planta de tratamiento; de ahí la importancia de conocerla a detalle.

#### **Influente**

El agua del influente se definirá como aquella que entra al sistema del beneficio desde una fuente exterior, aclarando que todas las tomas de agua “limpia” dentro de las instalaciones están conectadas a esa misma fuente y que por ende la calidad del agua en cualquiera de dichas tomas es la misma.

La fuente del influente es única y corresponde a un pequeño arroyo aledaño a las instalaciones cuyas aguas nacen aproximadamente 1 km aguas arriba del beneficio, y hasta ser desviada mediante una obra de toma y empleada en el proceso de beneficiado no ha estado en contacto con agentes contaminantes ajenos a su propio estado natural, es decir, que no han entrado en contacto humano. Este arroyo tiene un caudal en época de estiaje, correspondiente a la época de cosecha, de aproximadamente 30lps.

La obra de toma corresponde a un canal de desvío de longitud media de 50 metros que ingresa el agua procedente del arroyo a un pequeño tanque regulador de capacidad aproximada a 3 metros cúbicos, que funge a la vez como desarenador, con la intención de mantener una carga constante sobre la instalación hidráulica del beneficio.

## Efluente

Dados los procesos a los que se somete el café en el beneficio húmedo se producen principalmente 2 tipos diferentes de aguas residuales, las cuales se canalizan para darles tratamiento. La primera corresponde al agua de despulpado, y como mencionado anteriormente, corresponden a aquellas de desecho en el proceso correspondiente al despulpe. La segunda corresponde a las aguas de lavado, llamadas también “Aguasmieles”, provenientes de lavar el café después del proceso de fermentación.

## Las aguas residuales producidas en el proceso del beneficio

Estas aguas son el influente de la planta y conocerlas permite indicar los parámetros de tratamiento y establecer la operación del sistema; para esto es importante mencionar que dada la naturalidad de las descargas y su procedencia,

sea del despulpado o del lavado, no existe una continuidad en el tiempo debido a que se producen en lapsos de tiempo muy cortos, pudiendo considerarlas como casi instantáneas, por un lado, y por otro, dado que no existe una metodología establecida para controlar los volúmenes de agua a emplear en el proceso del beneficio acorde a un volumen conocido de café, las concentraciones de contaminantes pueden igualmente variar; en ciertas etapas del proceso se requiere mantener niveles de agua en los tanques independientemente de si se van a despulpar 400 quintales, o solo 20.

Estas variaciones son un punto interesante para considerar y evaluar respecto al tipo de tratamiento que se le dará porque realmente no existe una igualdad y una continuidad en la calidad y características del agua residual que resulta crucial para un sistema biológico, por ejemplo, presentándose el caso de que un día puede estar muy diluida porque fue poca la cantidad de café que se despulpó o lavó y al día siguiente puede estar muy concentrada porque los volúmenes fueron mayores. Aunque si bien se han hecho esfuerzos por reducir su consumo, como la implementación de los actuales pulperos “en seco” que utilizan prácticamente nada de agua, mover la pulpa de forma mecánica o el control de fugas, es inevitable prescindir de su uso.

Otro aspecto importante que se consideró en el estudio previo a definir el tipo de proceso que se empleará para el tratamiento fue el hecho de que estas aguas residuales no se producen todo el año; la cosecha tiene una duración que abarca de mediados de Octubre a finales de Febrero, normalmente, por lo que el resto del año se encuentra fuera de servicio. Para lo anterior hay pros y contras particulares para los diferentes opciones de tratamiento que se compararon y analizaron detalladamente.

Una vez que se conocen las características físico-químicas de dichas aguas residuales y teniendo claro el objetivo de calidad al que se pretende llegar en los efluentes una vez tratados, considerando la normativa vigente en materia de

descargas de aguas residuales, resulta primordial seleccionar los tipos de tratamiento que son apropiados desde el punto de vista técnico y económico; donde se busca reducir los contaminantes presentes en dichas aguas residuales y lograr así convertirlas en vertidos que no afecten al medio ambiente.

En el tratamiento de las aguas residuales, generalmente es necesario combinar varias operaciones unitarias, cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas y cuyo propósito es el de eliminar, en primer lugar, el material en suspensión, luego las sustancias coloidales y finalmente las sustancias disueltas (Bebin, 1986).

## **4. Impacto ambiental del beneficiado del café**

La industria del café es una de las principales actividades económicas en el estado de Chiapas, y existe un gran número de beneficios húmedos de café, cuando menos uno por finca, que producen una gran cantidad de desechos sólidos como la pulpa y el pergamino, y desechos líquidos; aguas de despulpado y de lavado.

Es mucho lo que se ha avanzado en cuanto a la disposición de residuos sólidos porque son subproductos del proceso que son fácilmente manejables dada su naturaleza física y sobretodo porque se transforman en otros productos aprovechables, como la composta que se emplea para fertilizar la plantación. Sin embargo, con algunas excepciones, la generalmente inadecuada disposición de las aguas residuales da paso a serias polémicas entre instituciones gubernamentales como SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) y los productores de café.

El manejo inapropiado y casi nulo de los subproductos del café que se generan durante el proceso del beneficiado provoca impactos negativos importantes en el ecosistema de las fincas cafetaleras donde el suelo, el aire y sobretodo el agua, resultan afectados; de ahí que el primer paso para dar solución a la problemática del impacto ambiental de esta industria radica en hallar soluciones apropiadas respecto al tema de la contaminación del agua, debido a la facilidad que puede este medio afectar a terceros.

El estudio de los subproductos es importante para poder determinar cuál es para los cafecultores la forma más viable de disponerlos, contemplando el aspecto técnico y económico de estos procedimientos y siempre enfocado en minimizar la cantidad de agua residual que se genera.

## 4.1 Residuos sólidos y líquidos del proceso de beneficio

En el proceso de cultivo y procesamiento del café se generan enormes cantidades de residuos sólidos y líquidos; del fruto del café únicamente es aprovechable, para la preparación de la bebida, el 7.6% de su peso fresco, el 92.4% restante corresponde a subproductos no aprovechables.

Los residuos orgánicos que resultan del beneficio del café no son esencialmente tóxicos o venenosos, en términos generales, y su peligrosidad para los humanos puede asimilarse en primera instancia a la de otros residuos vegetales vertidos en las aguas, por ejemplo, residuos de empresas procesadoras de frutas (cáscaras, jugos, pulpa), residuos de fábricas de alimentos concentrados para ganados, etc. (Arcila, 1979).

La pulpa de café es el primer subproducto que se obtiene en el método usado para el procesamiento del fruto de café y representa, en base húmeda, alrededor del 43,58% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006). Y en materia de la contaminación que ésta genera, puede darse una idea con la siguiente cita: Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que Colombia exporta, se generan 162 900 toneladas de pulpa fresca, la cual si no se utiliza adecuadamente produciría una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 868 736 habitantes (Veenstra, 1995, citado por Rodríguez, 2009); su producción media es de 2,25 toneladas frescas/ha-año (Rodríguez, 2007, citado por Rodríguez, 2009).

El segundo subproducto que se genera es el mucílago del café, que se retira mediante la fermentación en el proceso correspondiente en el beneficio húmedo, y entre algunas características, representa en base húmeda, un aproximado al 15% del peso del fruto fresco (Montilla, 2006), que en términos de volumen corresponde a 91 ml por cada 1 kg de café cereza, que de ser eliminado mediante fricción haciendo uso de una “desmucilagenadora” (que no es el caso de la finca), se producirían 768 kg de mucílago/ha-año (Rodríguez, 2007, citado por Rodríguez, 2009). Por cada millón de sacos de 60 kg de café almendra que

Colombia exporta, se generan aproximadamente 55 500 toneladas de mucílago fresco, que de no disponerse adecuadamente, generaría una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 310 000 habitantes (Veenstra, 1995, citado por Rodríguez, 2009).

Cuando el mucílago es removido del grano mediante el proceso de fermentación natural, como en el caso de Finca San Carlos, se produce un residuo líquido que corresponde al principal contaminante presente en las aguas de lavado, y es tratado en la planta de depuración de aguas residuales. Cabe mencionar que aún hoy en día, en la mayoría de las fincas se retira el mucílago mediante este procedimiento, donde se producen en promedio entre 4 y 5 litros de aguas residuales por kg de café despulpado, y la disposición de esas aguas mediante vertido directo a los cuerpos de agua, como generalmente se hace dado que los beneficios están ubicados cerca de esos cuerpos para disponer de agua para todo el proceso (influyente del beneficio húmedo, ver capítulo 2 “Proceso del beneficiado del café”), corresponde a uno de las principales causantes de contaminación hídrica, produciendo una eutrofización de magnitudes importantes que conlleva a otros problemas como la muerte de flora y fauna acuática, malos olores, atracción de fauna nociva, proliferación de insectos y formación de hongos y capas de bacterias en las superficies de las piedras, favoreciendo estos últimos a la disminución a corto y mediano plazo de las concentraciones de oxígeno en el agua.

Puede deducirse entonces que la capacidad contaminante del fruto dado el promedio en el uso del agua en los beneficios y contemplando su participación en las distintas etapas en el proceso es:

- Agua de despulpado, 160 g DQO / kg de café verde
- Agua de lavado, 170 g DQO / kg café verde

Lo que corresponde en conjunto y en términos aproximados a la contaminación equivalente de 5.6 personas adultas por día (Alpizar, 1998).



Es primordial hacer notar que cada beneficio emplea diferentes cantidades de agua para el lavado de una unidad de peso, sin embargo puede considerarse una media de  $6 m^3$  de agua por cada 100kg de café cereza. Otro aspecto igualmente importante para considerar es que la temporada de cosecha, cuando se hace uso del beneficio, coincide con la temporada de estiaje; cuando los niveles de los ríos y otros cuerpos de agua son mínimos y por tanto aumenta la concentración de los contaminantes, además de que existe una demanda de agua considerable para el proceso de beneficiado en sí. En resumen, se emplean grandes volúmenes de agua que son contaminadas en el proceso de beneficiado y descargadas al cuerpo receptor que se encuentra en caudal mínimo.

La importancia que tiene la implementación de una solución a la problemática de las aguas residuales es muy grande dada la influencia directa que tienen éstas sobre la calidad del ecosistema cafetalero y en las afectaciones a la salud de los trabajadores, donde el contacto directo con estas aguas es la principal fuente de enfermedades infecciosas gastrointestinales, entre otras.

Los contenidos y tipos de contaminantes minerales y orgánicos presentes en las aguas residuales del beneficio están directamente relacionados con la variedad de café beneficiada, el tipo de beneficio (proceso de beneficiado y sus etapas) y la cantidad y calidad de agua empleada en ese proceso.

## **4.2 Consecuencias del vertido directo de las aguas residuales del beneficio del café a cuerpos receptores**

En párrafos anteriores se explicó la equivalencia de la contaminación provocada por los subproductos del café en una comparativa con las aguas residuales del consumo humano, donde puede darse una perspectiva del severo daño que puede provocarse al medio ambiente de ser vertidas esas aguas en forma directa a cuerpos receptores.

Es importante aclarar nuevamente que los niveles de contaminantes en las aguas producto del beneficiado del café varían constantemente en concentración en medida correspondiente a los volúmenes de café procesados y los requerimientos individuales de agua de cada beneficio. Por otro lado, la capacidad contaminante de las aguas residuales es medible, también, en función del tamaño del cuerpo receptor, haciendo referencia a su caudal y su consiguiente capacidad de amortiguación.

### **Aumento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Esto ocasionado por las grandes cantidades de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar el exceso de materia orgánica presente en el agua, en todos los casos mucho mayor a la posible cantidad de Oxígeno Disuelto que pudiera tener el agua del cuerpo receptor.

### **Disminución del oxígeno disuelto en el agua**

Consecuencia directa del aumento de la DBO; se debe al creciente consumo de oxígeno por parte de los microorganismos para degradar la materia orgánica, empobreciendo su concentración en el agua, tan indispensable para la vida de la flora y fauna acuáticas.

### **Disminución del pH**

Las aguas del despulpado y del lavado contienen alcoholes, acetonas y otros ácidos producto de la fermentación de los azúcares y pectinas que presentes en la pulpa y mucílago de los granos de café, las cuales al combinarse con las aguas de los cuerpos receptores disminuyen el pH. Este efecto es considerable cuando el cuerpo receptor tiene un caudal relativamente bajo comparado con el

promedio de los volúmenes de agua de las descargas y por ende tiene una baja capacidad amortiguadora.

### **Disminución de los caudales de la fuente de agua del beneficio**

El beneficio está ubicado cerca de una fuente continua de agua, y en la época de beneficiado se derivan de ésta grandes volúmenes que contribuyen a la disminución del caudal del mismo, considerando además la simultaneidad de la temporada de cosecha con la de estiaje.

### **Aumento repentino de los sólidos en suspensión**

La mayor parte de los contaminantes del agua residual del beneficio del café corresponde a sólidos en suspensión, que ensucian el agua del cuerpo receptor volviéndola turbia.

### **Acidificación del suelo aledaño al cuerpo receptor**

Consecuencia del bajo pH de las aguas residuales que al ser vertidas al cuerpo receptor e infiltrarse en el suelo propician la acidificación de éste, viéndose este fenómeno reflejado en la muerte de la vegetación que crece en las riberas; las hojas de los arbustos se queman y los tallos presentan crecimientos extraños, generalmente más gruesos de lo normal.

### **Erosión del cauce del cuerpo receptor**

Dado que las descargas de las aguas residuales son de grandes volúmenes, el caudal del cuerpo receptor aumenta repentinamente causando una erosión en el cauce, favoreciendo la formación de “pozas” donde se estanca gran parte de la materia orgánica procedente de dichas descargas.

## **Malos olores y afectaciones al paisaje**

La disminución del oxígeno disuelto favorece la proliferación de colonias de bacterias anaerobias que descomponen fácilmente la materia degradable en el agua, sobre todo en aquellas partes del cauce donde ésta se estanca, produciendo olores desagradables y un mal aspecto del paisaje.

## **Imposibilidad del uso del agua del cuerpo receptor**

La contaminación producida por la descarga del agua residual no permite que pueda emplearse el agua del cuerpo receptor para consumo animal y mucho menos para consumo humano, tampoco puede usarse para riego ni en ninguna instalación o proceso que requiera de agua “limpia”.

Por otro lado, fuera de los microorganismos que intervienen propiamente en la fermentación del café y que pasan con los residuos del mucílago a las aguas de lavado, ocurre que la presencia de residuos orgánicos por sí misma favorece la proliferación de diversos microorganismos, algunos de los cuales pueden ser eventualmente patógenos.

## **Aumento en la concentración de elementos básicos en el agua**

En el proceso de beneficiado muchas sustancias contenidas en el grano de café, como Potasio (K), Fósforo (P), Magnesio (Mg), Nitrógeno (N) y Calcio (Ca) entre otros, se disuelven en el agua, y cuando son descargadas las aguas residuales, éstas hacen que se eleven las concentraciones de dichas sustancias en el cuerpo receptor. Resulta importante mencionar que estos nutrientes, en particular el nitrógeno y el fósforo, originan el fenómeno de eutrofización en los cuerpos receptores.

## **5. Panorama del tratamiento de las aguas residuales del beneficiado húmedo del café**

### **5.1 Características generales del agua residual del beneficio del café**

#### **Generalidades**

En todo el proceso del beneficiado húmedo se requiere agua para poder transportar el grano de café en sus diversas etapas en el beneficio, que al estar en contacto con materia orgánica durante todo el proceso se contamina y genera un desequilibrio ecológico importante al ser regresada a los cuerpos de agua de donde es extraída inicialmente.

Los desechos más importantes del proceso completo del beneficiado húmedo pueden separarse en dos tipos: los desechos sólidos (pulpa principalmente) y los desechos líquidos (aguas de despulpado y aguas de lavado).

Existen parámetros físico – químicos para evaluar cualitativa y cuantitativamente la calidad del agua. Es así que este tipo de aguas residuales ha sido objeto de varios estudios encaminados a develar la magnitud del problema y, mediante su caracterización, determinar la solución más viable. Los resultados arrojados por estas investigaciones son altamente divergentes pero todos concluyen en la necesidad de dar un tratamiento a estas aguas residuales antes de ser arrojadas fuera del beneficio debido a su deplorable calidad. (Bello, 2002)

Las características del agua de desecho en la industria del café son muy variables, no se diga de un beneficio a otro, si no que pueden cambiar significativamente de un día a otro en el mismo beneficio debido a la calidad de la mano de obra y a las cantidades de agua que las instalaciones requieren, de ahí

que cada planta de producción cafetalera utilice distintos volúmenes de agua para los procesos de lavado y despulpado.

Por otro lado se presenta que la temporada de cosecha y de beneficiado del café coincide con la época de estiaje; resultando en caudales mínimos en los ríos y arroyos propiciando la baja capacidad de dilución de los mismos, entre otras condiciones ya mencionadas (capítulo 4.2).

Debido a estas grandes variaciones entre una y otra descarga de agua residual dentro de un mismo beneficio, como en el caso de Finca San Carlos, y de aquellos análisis llevados a cabo por instituciones como la ANACAFÉ, en Guatemala, CENICAFÉ en Colombia y PROMECAFE, entre otras, surgen un sinnúmero de resultados de caracterización con valores ampliamente variados que indican diferentes grados de contaminación. Algunos de estos, como los expresados en la tabla 5.1, dan una idea general de los índices esperados en esas aguas residuales.

**Tabla 5.1** Características del agua residual del café.

<b>Parámetro Evaluado</b>	<b>Agua de despulpado</b>	<b>Agua de lavado</b>
<b>DQO (mg/l)</b>	12400-16200	8100-13150
<b>DBO (mg/l)</b>	3400-9450	5250-7150
<b>Sólidos totales (mg/l)</b>	6200-8650	4150-5200
<b>Sólidos Volátiles</b>	4600-6050	2990-4060
<b>Nitrógeno Amoniacal (mg/l)</b>	14-20	11-17
<b>Fósforo total (mg/l)</b>	20-25	13-19
<b>Fenoles (mg/l)</b>	18-55	ND
<b>pH</b>	3.5-4.5	4.2-5.0

**Nota** Fuente: Gerrero, L. A. & Arévalo M. F. *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. Tesis de licenciatura. Universidad de El Salvador.

Otros datos con los que puede calificarse lo altamente contaminantes que son las aguas residuales de la industria del café se muestran en la tabla 5.2, resultado de un estudio llevado a cabo 31 beneficios de café por la Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café en ese país, para el XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura.

**Tabla 5.2** Características físicas y químicas de los desechos líquidos del café

Tipo de Agua	pH	DQO (mg/l)	Sólidos Totales (mg/l)	Sólidos Volátiles (mg/l)
Agua de despulpado	4.5	2190	1340	1150
Agua de lavado	4.4	1700	1090	950

**Nota** Fuente: Adaptado de Lardé, G.; Velázquez, E.; Rodríguez, N. et al. (1997). Situación actual de los desechos líquidos del café en El Salvador. En Jorge Echeverri y Luis Zamora (Ed.) del libro *Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura. Costa Rica. 1997.* (pp. 425) San José, Costa Rica: Editorama.

Para analizar las características de aguas residuales del beneficio húmedo del café es muy importante conocer las características no solamente de aguas de salida del beneficio sino también del agua de entrada al beneficio (Sokolov, 2002).

**Tabla 5.3** Análisis del agua de abastecimiento y descarga

Parámetro	Agua de Abastecimiento	Descarga
DBO (mg/l)	27.7	4158
DQO (mg/l)	59.5	9354
SS (mg/l)	< 0.1	6
pH	6.8	4.57

**Nota** Fuente: Adaptado de Barrios, A. (1999). Cap. 1.1 Situación del Beneficiado de Café en los Países. Situación en Guatemala. En Edgar L. Ibarra (Ed.) del libro *“Seminario Regional de Consulta sobre Situación Actual del Beneficiado de Café: Revisión y Avances Tecnológicos del Proceso” Memoria. CICAPE, Heredia, Costa Rica. Diciembre 1998.* Tegucigalpa, Honduras: IICA-PROMECAFE.

En la tabla 5.3 se muestra una comparativa entre el agua de abastecimiento (influyente del beneficio) y el agua de descarga (efluente) publicada en el Análisis

de la Situación en el Beneficiado Húmedo del Café en Guatemala, presentado por Adolfo Barrios para el Seminario Regional de Consulta sobre Situación del Beneficiado de Café: Revisión y Avances Tecnológicos del Proceso, llevado a cabo en 1998 en Heredia, Costa Rica.

Como se puede ver en la tabla 5.4, las características de aguas de despulpado y lavado exceden los límites permisibles por Comisión Nacional del Agua (CNA): el pH es bajo, los valores de SST son 6.5 veces más arriba del límite, el valor más alto de DQO es 25,655.2 ppm, la concentración de DBO es 5.5 veces más arriba del valor del límite permisible, las concentraciones de grasas y aceites son 194 veces más elevadas, las concentraciones de fósforo están 41.6 veces más elevadas (García, 2000).

**Tabla 5.4** Datos de los parámetros de 4 Fincas de la región del Soconusco

<b>Parámetros</b>	<b>Límites Permisibles</b>	<b>Despulpado</b>	<b>Lavado</b>
<b>pH (Unidades)</b>	5.0 – 10.0	4.5 – 5.5	4.0 – 5.5
<b>SST (ppm)</b>	175.0	96.0 – 1,190.0	152.0 – 1,140.0
<b>DQO (ppm)</b>	NA	4,028.0 – 8,067.0	3,200.0 – 25,655.2
<b>DBO (ppm)</b>	200.0	162.8 – 990.6	893.1 – 1,105.0
<b>Grasas y aceites (ppm)</b>	25.0	900.0 – 5,100.0	450.0 – 4,850.0
<b>Fósforo (ppm)</b>	20.0	16.0 – 236.8	108.8 – 832.0

**Nota** Fuente: Sokolov, M. (2002). Cap 5.3 Contaminación ambiental por las aguas residuales del procesamiento húmedo del café: prevención y tratamiento. En Jürgen Pohlen (Ed.) del libro *México y la Cafeticultura Chiapaneca*, (p. 324). Aachen, Alemania: Shaker Verlag GmbH.

Las aguas de despulpado que se generan en la primera etapa del beneficiado poseen una gran cantidad de sólidos orgánicos disueltos, siendo éstos el mayor agente contaminante, producto del remojo y contacto de la pulpa en el medio acuoso.



De una forma muy general, la variabilidad en la concentración de los contaminantes en las aguas de despulpado puede idealizarse en los valores que expresa la tabla 5.5, correspondientes a los promedios obtenidos para distintos números de muestras y llevadas a cabo en diferentes países productores.

**Tabla 5.5** Características físico – químicas de las aguas de despulpado

<b>Parámetros</b>	<b>UV 1975 México</b>	<b>CICAFE 1979 Costa Rica</b>	<b>ZULUAGA 1987 Colombia</b>	<b>BAILLY et al, 1991 México</b>	<b>HORTON S.A., El Salvador</b>	<b>WARD S.A., El Salvador</b>
<b>T (°C)</b>	18.5	---	---	20.0	---	---
<b>pH</b>	5.25	5.9	5.0	5.4	4.4	---
<b>ST (ppm)</b>	5917.1	---	11 776.5	12 500.0	11 300.0	4960.0
<b>SST (ppm)</b>	652.3	---	395.0	2000.0	790.0	848.0
<b>SDT (ppm)</b>	5264.8	322.0	11 381.5	10 500.0	10 510.0	4114.0
<b>Sól. Sed. (ml/L)</b>	150.0	---	---	100.0	---	---
<b>DBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	---	---	---	---	---	---
<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	1658.8	---	---	9500.0	9400.0	2630.0
<b>OD (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	8124.4	4832.0	16 475.0	13 667.0	---	---

**Nota Fuente:** Adaptado de Bello, R. (2002). Cap 5.2 Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café. En Jürgen Pohlen (Ed.) del libro *México y la Cafecultura Chiapaneca*, (p. 316). Aachen, Alemania: Shaker Verlag GmbH.

Es característico el color marrón claro que estas aguas adquieren, en parte causada por la liberación de los taninos presentes en la cáscara exterior de los granos (pulpa) cuando ésta se rompe y desprende en el proceso mecánico del despulpado, y por otra, de un porcentaje del mucílago que se disuelve en el agua en el arrastre de los granos desde los pulperos, a través de los canales de conducción, hasta los tanques de fermento (Tabla 5.6). Estas aguas, sin embargo, mantienen una viscosidad relativamente baja debido a un menor contenido de sustancias coloides.

La composición de estas aguas no ha sido aún investigada con suficiente profundidad, pero se sabe que contienen una gran cantidad de pectinas, protopectinas, ésteres de pectinas, azúcares solubles, cafeína y una fracción importante de taninos (Elías, 1978).

**Tabla 5.6** Características del agua de despulpado

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>
<b>pH</b>	4.2
<b>Temperatura</b>	27 °C
<b>OD</b>	0 mg/l
<b>DBO</b>	20 000 mg/l
<b>Sólidos Totales</b>	16 000 mg/l

**Nota** Fuente: Guerrero, L. A. & Arévalo M. F. *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. Tesis de licenciatura. Universidad de El Salvador.

La tabla 5.7 presenta las características de las aguas residuales según se determinó en algunos beneficios del Soconusco, Chiapas, en una comparativa entre el agua de entrada al beneficio (influyente) y de descarga (efluente), marcando una pauta para un entendimiento más claro sobre el grado de contaminación que adquiere el agua que se emplea en el proceso del despulpado, siendo ésta una de los dos tipos de aguas residuales que se producen en la industria.

De los datos presentados se puede resumir que estas aguas residuales son ácidas; de pH bajo, con alto contenido en materia orgánica en forma de sólidos principalmente disueltos y que constituyen un medio adecuado para el crecimiento de microorganismos potencialmente patógenos, además de tener muy altas demandas bioquímicas y químicas de oxígeno.

**Tabla 5.7** Valores promedio de los resultados obtenidos al analizar las aguas residuales de 7 beneficios del Soconusco (Bello et al, 1995).

<b>Parámetro</b>	<b>Entrada</b>	<b>Despulpado</b>
<b>T (°C)</b>	19.7	19.5
<b>pH</b>	6.4	5.5
<b>ST (ppm)</b>	372.6	2392.6
<b>SST (ppm)</b>	94.3	908.1
<b>SDT (ppm)</b>	278.3	1484.5
<b>Sól. Sed. (ml/L)</b>	0	88.4
<b>DBO<sub>5</sub> (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	4.4	1235.6
<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	N.D.	2210.5
<b>OD (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	7.8	2.2

**Nota** Fuente: Adaptado de Bello, R. (2002). Cap 5.2 Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café. En Jürgen Pohlen (Ed.) del libro *México y la Cafecultura Chiapaneca*, (p. 317). Aachen, Alemania: Shaker Verlag GmbH.

Por otro lado está el agua de lavado (tabla 5.8), proveniente de aquella con la que se lavan los granos de café después del proceso de fermentación del mucílago. Esta agua puede estar más o menos diluida, dependiendo de la forma en la que se efectúa dicho proceso, y por lo mismo puede tener una mayor o menor DBO<sub>5</sub>/DQO que el agua del despulpado, principalmente debido a dos razones:

1.- La cantidad de materia orgánica que se retira en el despulpado, directamente relacionado con la eficiencia de remoción de la pulpa en este proceso.

2.- La cantidad de agua empleada para remover todos los productos de la degradación de materia orgánica generados durante la fermentación, correspondientes a una fracción de la materia orgánica original del mucílago.

Al igual que el agua de despulpado, el agua de lavado tiene muchos sólidos disueltos, pero además, contiene un elevado grado de sustancias coloidales residuos de la asimilación de las pectinas presentes en el mucílago en el proceso de fermentación, lo que propicia el aumento considerable de la viscosidad, aunque la densidad relativa tanto de una como de la otra sea muy cercana a la unidad (véase tabla 5.8).

**Tabla 5.8** Características del agua de lavado

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>
<b>pH</b>	4.5
<b>Temperatura</b>	27.5°C
<b>OD</b>	0 mg/l
<b>DBO</b>	5000 mg/l
<b>DQO</b>	13 000 mg/l
<b>Sólidos Totales</b>	6960 mg/l

**Nota** Fuente: Guerrero, L. A. & Arévalo M. F. *Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café*. Tesis de licenciatura. Universidad de El Salvador.

Las aguas de lavado, dependiendo de la variedad de café que se procesa en el beneficio, adquieren diferentes tonalidades; en cafés de la variedad *arabica* y sus respectivas subvariedades, el agua adquiere un color marrón grisáceo y es más rojiza en aquellas de la variedad *robusta*. Por otro lado, dada la ya mencionada viscosidad que adquiere el agua, se mantienen en suspensión las partículas sólidas de mayor tamaño que resultan del desprendimiento de restos de pulpa que pudieron haber quedado adheridos a los granos en el proceso de despulpado, evitando que éstas precipiten de forma natural.

## **5.2 Sistemas de tratamiento utilizados en la industria del café**

Se han implementado diversos tipos de tratamiento en las fincas cafetaleras, esto debido a la gran diversidad de necesidades y limitaciones de cada una. Cabe resaltar que también existen muchos beneficios de café que no cuentan con sistemas de tratamiento y sus descargas son directas a los cuerpos receptores.

### **Lagunas de secado**

Este sistema de manejo de aguas residuales sigue el principio de evaporar el agua residual lo más rápido posible. Para conseguir esto se aprovechan extensiones de terreno naturalmente planas que son impermeabilizadas para impedir la filtración del agua residual al subsuelo.

Es óptimo operar estos sistemas en condiciones de mucho sol y viento, por lo que es muy importante para la efectividad de este método que se permita disponer el agua sobre una superficie amplia que favorezca el máximo aprovechamiento de la energía solar y a la vez minimizar la película de agua por evaporar.

En algunos casos se añade cal al agua residual para estabilizarla y evitar que entre en un proceso de digestión aerobia y favorezca la proliferación de flora y fauna nociva, así como la emanación de olores.

Este proceso es empleado en el Beneficio El 77, en Chalchuapa, El Salvador, donde un sistema de 17 lagunas interconectadas y situadas en una extensión de 2 ha (20 000 m<sup>2</sup>) evapora aproximadamente 19 200 m<sup>3</sup> anuales, a una tasa aproximada de 122.3 m<sup>3</sup> diarios (Lardé y Saravida, 1997).

## Lagunas de estabilización

Este sistema consiste en la construcción de lagunas artificiales donde el fondo y las paredes de la misma son impermeables para evitar filtraciones al subsuelo y así disponer el agua de desecho de forma adecuada. La diferencia con un lecho de secado es el carácter biológico del sistema, ya que en éste se desarrollan microorganismos que asimilan la materia orgánica en presencia de oxígeno (aerobios), en su ausencia (anaerobios) o en niveles intermedios (facultativos).

Lardé, G. (1998) comenta que el método más extendido para tratar las aguas residuales del café es justamente el de lagunas de estabilización. En algunos lugares los lodos remanentes (al desecarse las lagunas) se recuperan y se usan como abono orgánico.

Lardé y Jacinto (2000), estudiaron los cambios experimentados por el agua residual del café (despulpado y lavado) retenida en una laguna de estabilización no impermeabilizada de 408 m<sup>3</sup> en régimen discontinuo y en un periodo de 210 días. En 175 días se removió el 92% de la DQO desde el valor máximo de 13 160 ppm. Concluyen que las lagunas de estabilización pueden ser una opción viable técnica, económica y ambientalmente para el manejo de las aguas residuales del café (Citado por Rodríguez, 2009).

La operación de estas lagunas es al aire libre, por lo que está sujeta a los cambios de temperatura y caudales; siendo necesario diseñar la laguna para operar para las condiciones más desfavorables en todo el año. Se deberá considerar un sobredimensionamiento por razones de lluvia y por acumulación de lodos en el fondo además de que en condiciones invernales se deberá tener en consideración un mayor tiempo de retención ya que la velocidad de asimilación del sustrato es menor.

## **Tratamiento aerobio (lodos activados)**

El objetivo de estas plantas es remover los sólidos suspendidos y la demanda bioquímica de oxígeno que tenga el agua de desecho. Para lograr esto, el agua se conduce a través de un proceso continuo consistente en diferentes etapas; un proceso primario donde un sistema de rejillas eliminan la mayoría de las partículas de gran tamaño, continúa por canales desarenadores cuya función es disminuir la velocidad del flujo para sedimentar por acción gravitacional las partículas que por su tamaño atravesaron las rejillas pero que son propensas a precipitar, después de esto y si los caudales entrantes son variantes en el tiempo, un tanque de regularización que mantiene gasto constante a la entrada del tratamiento secundario (los cultivos de microorganismos pueden perder su eficiencia con las variaciones de caudal y por ende, de la concentración de los contaminantes).

En la siguiente etapa del tratamiento se elimina el remanente de la demanda bioquímica de oxígeno y también la mayor parte de los sólidos suspendidos, para lo que se hace uso de un proceso biológico donde una población de microorganismos asimilan la materia orgánica disuelta en el agua; considerando que la naturaleza aerobia de estos microorganismos requiere de la presencia de oxígeno, es necesario inyectar aire al proceso. Uno de los inconvenientes de utilizar microorganismos aerobios es que después de haber asimilado el sustrato orgánico permanece en el agua la masa correspondiente a los mismos microorganismos, por lo que es crucial hacer pasar el agua, antes del proceso final, por tanques clarificadores donde se retiren los lodos residuales.

El tratamiento final consiste en la filtración del agua a través de materiales porosos como gravas y arenas donde se remueven los sólidos suspendidos que pudieran permanecer en el agua posterior a la clarificación, además de mejorar de forma general las características del agua tratada.

Silvano (1997), en Costa Rica, reporta el empleo de lodos activados de baja carga, como el tratamiento biológico con el que se alcanzaron los mejores resultados en el tratamiento de las aguas residuales del café. El agua entra a un pretratamiento mecánico con rejillas, pasando luego a una etapa de neutralización y sedimentación, seguido de una oxidación biológica mediante lodos activados, sedimentación y filtración con carbón activado. Las aguas entran a la planta con una DQO entre 30 000 y 35 000 ppm, y salen, después de la filtración sobre arena y carbón activado, con 10-20 ppm de DQO. No reporta tiempos de proceso (Citado por Rodríguez, 2009).

## **Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente**

Estos operan en un régimen continuo y en flujo ascendente, de ahí su nombre; el influente entra por la parte inferior del reactor y atraviesa todo el perfil longitudinal, saliendo por la parte superior. Estos reactores se caracterizan por mantener un ambiente anaerobio donde los microorganismos se establecen en colonias que crean gránulos o cúmulos con buenas cualidades de sedimentación y que no son susceptibles a ser arrastrados bajo las condiciones prácticas del reactor, de ahí que la óptima retención de los lodos activos hagan posible un buen tratamiento incluso a altas tasas de cargas orgánicas, como en el caso de las aguas residuales del beneficiado del café.

Este tipo de tratamiento se estableció en el beneficio “San Juanillo”, en Naranjo, Costa Rica (Tabla 5.9); el sistema consiste en un tanque de almacenamiento con capacidad de 200 m<sup>3</sup> (aproximadamente el 50% de la producción diaria de aguas residuales), un tanque de recirculación de las aguas, un sistema de dosificación de alcalinizante (sosa cáustica), una campana de almacenamiento de biogás y un quemador. No reporta resultados (Wasser, 1997).



Oviedo (1988), en Venezuela, evaluó a escala de laboratorio diferentes tecnologías anaerobias para las aguas residuales de café, cuyas concentraciones variaron entre 2600 y 6069 ppm para la DQO. La alternativa seleccionada para el tratamiento de las aguas fue un reactor anaerobio tipo UASB\*, con el que se alcanzaron remociones de carga orgánica en el rango de 80 a 95% con una DQO de entrada de 4706 ppm (Citado por Rodríguez, 2009), véase tabla 5.9.

\* Por sus siglas en inglés: Upflow Anaerobic Sludge Blanket, en español RAFA; Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

**Tabla 5.9** Características del beneficio, de las aguas residuales y parámetros de diseño del sistema.

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Capacidad de procesado del café	400 fanegas diarias, 35 000 anuales
Producción de materia orgánica	10 kg de DQO / fanega
Producción de agua residual	1 m <sup>3</sup> de agua por fanega, 400 m <sup>3</sup> diarios
Capacidad de tratamiento requerida	4000 kg de DQO / día
Carga orgánica máxima de los reactores	10 kg de DQO / m <sup>3</sup> .día
Eficiencia de tratamiento esperado	85% de DQO
Producción de Biogás	Hasta 1000 m <sup>3</sup> / día

**Nota** Fuente: Adaptado de Wasser, R. (1997). Reactor anaerobio para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio, San Juanillo, Naranjo, Costa Rica. En Jorge Echeverri y Luis Zamora (Ed.) del libro *Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura. Costa Rica. 1997.* (p. 430) San José, Costa Rica: Editorama.

## Coagulación química

Un proceso pocas veces empleado debido a su alto costo es el de coagulación química, consistente simplemente en la adición de compuestos coagulantes que transfieren sus iones a la sustancia que se desea remover, neutralizando la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso que sedimenten naturalmente, permitiendo una

clarificación del agua. Este proceso elimina a su vez grasas, aceites y otros elementos como nitrógeno y fósforo (precipitación química) que se encuentran típicamente presentes en las aguas residuales utilizadas en la industria del café.

Zayas y Col. (2007), evaluaron la remoción de materia orgánica presente en aguas residuales del café a través de los procesos de coagulación y floculación química, utilizando floculantes comerciales, seguido de procesos de oxidación, en condiciones ácidas, alcanzando reducciones del 86% (Citado por Rodríguez, 2009).

## 6. Propuesta de tratamiento

### 6.1 Aspectos generales

#### Memoria descriptiva del proceso

La propuesta del proceso consiste en darle tratamiento primario, secundario y terciario al agua para mejorar su calidad y devolverla al medio ambiente con la mínima alteración posible. Para cumplir con lo anterior se instaló un sistema que cumple con cada función de forma ordenada y eficaz, asegurando que la totalidad del agua a tratar pase por las 3 etapas indicadas de la siguiente manera:

1.- Se produce agua residual en el proceso de despulpado, la totalidad del agua generada en esta parte es la que circula a través de las instalaciones del beneficio húmedo de la Finca mientras se lleva a cabo el proceso mencionado y se separa de los granos de café una vez que ha llegado a los tanques de fermento mediante un sencillo sistema consistente en una rejilla-tamiz, ubicada al fondo del mismo, que mantiene los granos de café dentro pero permite que el agua salga. Esa rejilla-tamiz separa todos los elementos sólidos que pudiera contener el agua y ésta se direcciona hacia el tratamiento secundario mediante una válvula a la salida de cada tanque de fermento que la ingresa al sistema de tuberías instalado para tal fin.

2.- El agua residual que sale de los tanques de fermento, proveniente del despulpado, se direcciona entonces hacia el tratamiento secundario ingresando a los dos tanques que se han instalado para esta parte del proceso. En éstos es en donde se lleva a cabo la coagulación y precipitación química mediante la adición del agente coagulante y una posterior inyección de aire para homogeneizar la mezcla. Este proceso empieza una vez que termina el proceso de despulpado (y por ende deja de producirse agua residual) y toda el agua residual producida haya

drenado hacia los tanques; el tratamiento secundario se efectúa con la totalidad del agua residual producida al día, por lo que no es un proceso constante en el tiempo.

3.- Una vez finalizado el proceso de coagulación y cuando los lodos han sedimentado en el fondo de los tanques, el agua clarificada se evacúa hacia el tratamiento terciario mientras que los lodos residuales son enviados al sistema de drenaje de la Finca para un posterior tratamiento anaerobio.

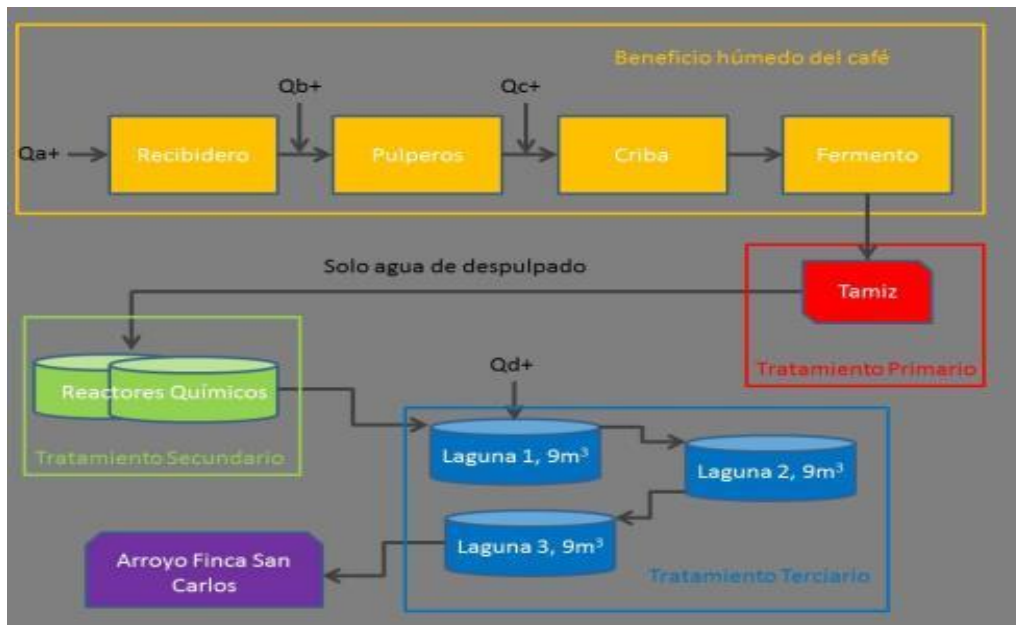
4.- El agua clarificada proveniente del tratamiento secundario es enviada ahora a otros 3 tanques conectados en serie para darle un tratamiento terciario y mejorar su calidad. En este proceso, cuyo tiempo de retención ronda las 12 horas, se lleva a cabo una re-carbonatación natural (absorción de CO<sub>2</sub> del ambiente) que disminuye el pH del agua estabilizando en un valor alrededor de 7.5 y se logra también una disminución en los niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo) ya que estos son absorbidos considerablemente por los lirios acuáticos (plantas) plantados en uno de los tanques para ese fin.

5.- Una vez atravesado esta última etapa del tratamiento, el agua ahora tratada drena por la válvula de salida del tercer tanque del tratamiento terciario y es devuelto al arroyo del que se tomó inicialmente, antes del proceso del beneficiado húmedo del café.

## Gastos y caudales

La totalidad del volumen de agua del efluente de la planta de tratamiento se compone de 4 diferentes gastos de entrada distribuidos en diferentes puntos tanto en el proceso de beneficiado como en el de la planta de tratamiento. Estos puntos de gastos de entrada se indican en la figura 6.1, y los volúmenes a los que corresponde cada uno se detallan en la tabla 6.1.

**Figura 6.1** Entradas de agua al proceso de beneficiado y tratamiento



**Tabla 6.1** Gastos correspondientes a los puntos de entrada de agua

Punto de entrada	Gasto de entrada (L/s) (Aprox.)
<b>Qa:</b> Agua para recibidero	1.5
<b>Qb:</b> Agua para despulpa	0.3
<b>Qc:</b> Agua para el tanque de la criba	1.2
<b>Qd:</b> Agua para lagunas de estabilización	0.5

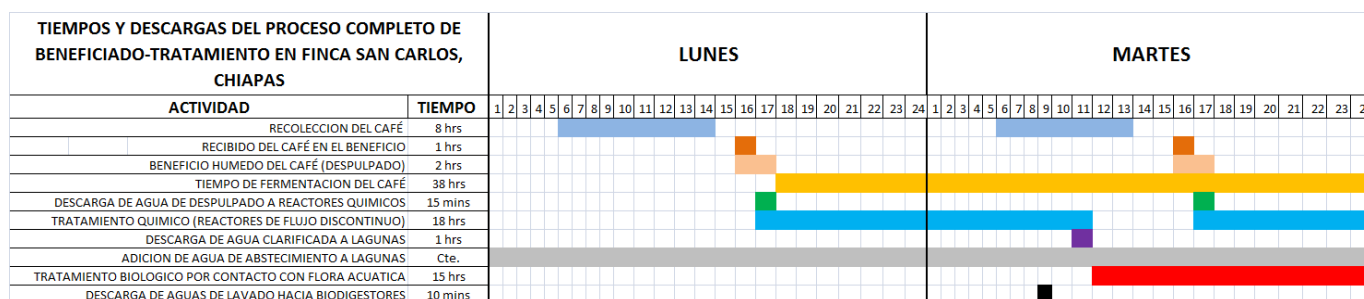
### Tiempos y duración de las descargas

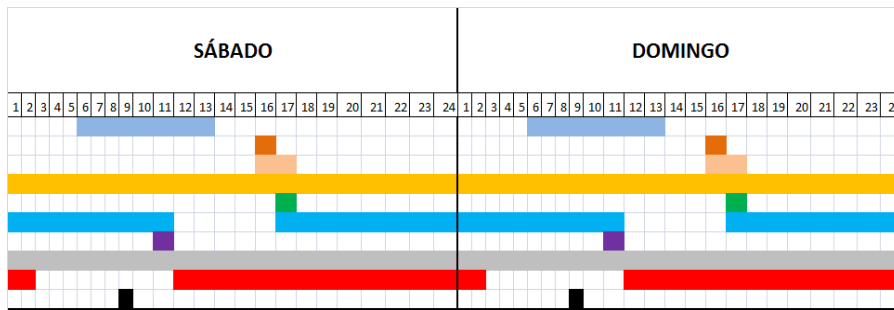
El agua residual se produce al ritmo de la recolección del café. En una línea de tiempo acotada a una semana se puede ver todo el proceso, desde la recolección hasta la salida final del agua tratada (Figura 6.2). Los tiempos de las diferentes partes del proceso de beneficiado y la duración de las descargas del agua residual de la planta de tratamiento se indican en la tabla 6.2

**Tabla 6.2** Tiempos del proceso de beneficiado y duración de las descargas de aguas residuales.

<b>TIEMPOS DEL PROCESO COMPLETO DE BENEFICIADO Y DURACIÓN DE LAS DESCARGAS DE AGUA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO.</b>	
<b>ACTIVIDAD</b>	<b>TIEMPO</b>
RECOLECCIÓN DEL CAFÉ	8 hrs
RECIBIDO DEL CAFÉ EN EL BENEFICIO	1 hrs
BENEFICIO HÚMEDO DEL CAFÉ (DESPULPADO)	2 hrs
TIEMPO DE FERMENTACIÓN DEL CAFÉ	38 hrs
DESCARGA DE AGUA DE DESPULPADO A REACTORES QUÍMICOS	15 min
TRATAMIENTO QUÍMICO (REACTORES DE FLUJO DISCONTINUO)	18 hrs
DESCARGA DE AGUA CLARIFICADA A LAGUNAS	1 hrs
ADICIÓN DE AGUA DE ABASTECIMIENTO A LAGUNAS	Cte.
TRATAMIENTO BIOLÓGICO POR CONTACTO CON FLORA ACUÁTICA	15 hrs
DESCARGA DE AGUAS DE LAVADO HACIA BIODIGESTORES	10 min

**Figura 6.2** Línea de tiempo de la duración de las etapas del proceso de beneficiado y de descarga de aguas residuales





En la línea de tiempo anterior se esquematizan las descargas de agua residual como eventos puntuales o instantáneos, ya que el volumen utilizado, aunque es variable, no excede de los 8 m<sup>3</sup> al día y se presenta en el momento indicado en la tabla.

Selección de procesos de tratamiento por disponibilidad de espacio y factor económico

Finca San Carlos está ubicada en una de las partes más elevadas de la del municipio de Tapachula y la topografía del terreno está compuesta principalmente por cerros y valles, en uno de los cuales se ubica el casco (se le denomina “casco” a la zona en la que están ubicadas las instalaciones de la finca; el centro de operaciones). La plantación se encuentra en las laderas de los cerros adyacentes al casco y pocas zonas de la misma son de fácil acceso, considerando además que el arroyo de la finca atraviesa justo por la mitad esta zona, la disponibilidad de espacio es mínima. Por otro lado, la orografía del terreno tampoco cuenta con superficies planas, volviéndose necesario el considerable movimiento de tierras para lograr espacios de ese tipo, que además encarecerían enormemente el proyecto; en un principio se tenía pensado construir reactores fijos de concreto armado para tratar las aguas residuales, pero la limitante de espacio era un gran problema.

Se optó entonces por dividir la planta de tratamiento en diferentes partes, adecuando las necesidades dimensionales de cada una de éstas a la disponibilidad de espacio con la que ya se contaba, o haciendo mínimas modificaciones. La propuesta para el tren de tratamiento fue utilizar tanques de

polietileno de alta densidad (llamados en adelante tanques de HDPA) armados con un esqueleto exterior de alambón galvanizado para el tratamiento secundario y terciario. Esta solución fue ideal para las condiciones de la finca ya que estos tanques son desarmables y constituyen una gran ventaja para las épocas del año en que no hay cosecha, y por ende no hay producción de agua residual, porque se pueden desarmar y guardar fácilmente.

Otra de las razones para seleccionar estos tanques fue el costo, ya que la inversión para construir tanques permanentes era muy elevada y no se contaba con el capital suficiente para llevarla a cabo. El monto invertido para la instalación y adecuación de los tanques de HDPA fue del 10% del costo estimado de haberse construido de concreto.

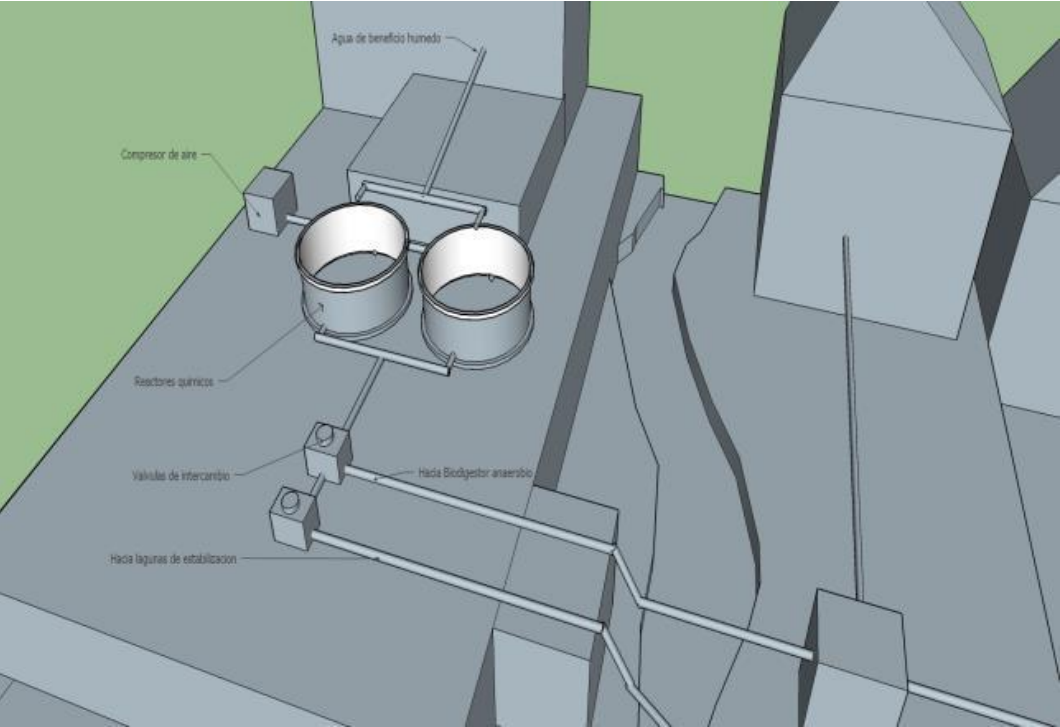
Los primeros dos tanques (figura 6.3), en los que se llevará a cabo la clarificación (tratamiento secundario), están ubicados en la parte más baja del beneficio húmedo para garantizar que toda el agua residual que se genere en las instalaciones escurra a ellos. Esta zona es un patio de secado para el café vano (siguiente paso en el proceso del beneficio del café, no compete al beneficio húmedo), por lo que colocar los tanques en ese lugar priva de espacio a la actividad que ahí se realiza.

Estos patios durante la época de plantación pueden ser ocupados para realizar otras labores, que se verían entorpecidas o simplemente no se podrían llevar a cabo si se tuvieran los tanques de tratamiento de concreto armado.

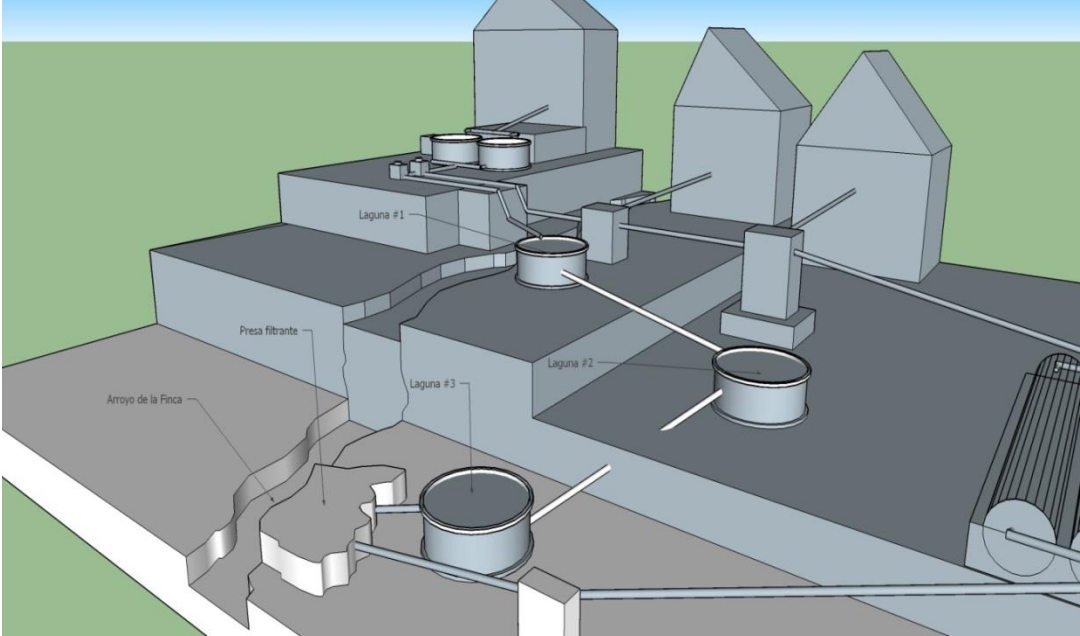
Los tres tanques siguientes (llamados en adelante Lagunas de Estabilización, figura 6.4) en los que se llevará a cabo el tratamiento terciario se encuentran en una zona más baja que aquella en la que se lleva a cabo el tratamiento secundario, y se aprovecha además la pendiente del terreno para que al colocarlos en serie haya un diferencial de altura entre uno y otro, favoreciendo el flujo en descarga libre del agua tratada y evitando así la necesidad de realizar cálculos y adecuar tuberías y válvulas en las que se considerarían pérdidas de fricción, entre otros aspectos hidráulicos.



**Figura 6.3** Tanques de tratamiento secundario (coagulación química)



**Figura 6.4** Tanques de tratamiento terciario



Por otro lado están los parámetros de selección (tabla 6.3) del método de tratamiento secundario; un sistema biológico no es posible debido a las variaciones de gastos y características de las descargas, así como su intermitencia en el tiempo, por lo que un sistema de coagulación química y precipitación por gravedad fue la opción más acertada. Para esto, la decisión de utilizar hidróxido de Calcio (Cal) como coagulante químico fue una de índole monetaria. La primera propuesta era la adición de sulfato de alúmina como coagulante pero la proyección de dosis por evento repercutía negativamente en el presupuesto destinado a la operación de la planta de tratamiento.

**Tabla 6.3** Conceptos que competen al tren de tratamiento, la propuesta de solución y las necesidades de espacio e inversión

<b>Tipo</b>	<b>Propuesta</b>	<b>Necesidad de espacio</b>	<b>Inversión necesaria</b>
<b>Reactores/Lagunas</b>	Tanque de concreto armado para reactores y lagunas.	Son permanentes y ocupan mucho espacio. No cumplen con las necesidades la finca.	Alto costo en materiales y movimiento de tierras para su correcta instalación
<b>Reactores/Lagunas</b>	Tanque de HDPA con armadura de alambón para reactores y lagunas.	Son de fácil instalación y de fácil desensamble.	Representan un 10% del valor de los tanques de concreto armado.
<b>Coagulante Químico</b>	Adición de alúmina como coagulante químico.	N/A	Alto costo por compra y dosis empleada.
<b>Coagulante Químico</b>	Adición de hidróxido de calcio como coagulante	N/A	Muy bajo costo de adquisición comparado con otros coagulantes.

## 6.2 Sistema de tratamiento

### 6.2.1 Reportes de laboratorio de muestras obtenidas en las múltiples descargas de Finca San Carlos

Se tomaron varias muestras del agua residual del beneficio de la finca, tanto del despulpado como del lavado, para analizarlas y conocer así los parámetros físico-químicos que se compararán con aquellos resultantes del agua tratada para determinar entonces, mediante esa evaluación, la efectividad de la planta de tratamiento. El agua residual que se analizó se obtuvo en eventos aleatorios en el proceso de beneficiado y no se consideró ningún aspecto de relevancia que estableciera alguna cuestión particular que definiera la toma de dichas muestras, salvo que éstas se tomaran justo a la mitad del tiempo que durará el proceso de despulpado y lavado, respectivamente.

#### El agua de despulpado

Como se ha mencionado en muchas ocasiones anteriores, la variación en las características del agua residual entre una descarga y otra puede ser notoria, como se muestra en las tablas 6.4 y 6.5; en ambas se refleja la caracterización del agua de despulpado en 2 eventos aleatorios diferentes.

**Tabla 6.4** Caracterización del agua de despulpado, evento 1

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máx. Perm.</b>	<b>Unidades</b>
Potencial de Hidrógeno (pH)	5.49	10	Unidades
Sólidos Suspendidos Totales	132.0	200.0	mg/L
Sólidos Sedimentables	4.0	2.0	mg/L
Grasas y Aceites	N.A.	25	mg/L
Materia Flotante	Ausente	Ausente	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	46.8	200.0	mg/L
Nitrógeno Total	16.8	60.0	mg/L
Fósforo Total	3.61	30.0	mg/L

**Nota** Fuente: Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente.

**Tabla 6.5** Caracterización del agua de despulpado, evento 2

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máx. Perm.</b>	<b>Unidades</b>
Potencial de Hidrógeno (pH)	3.45	10	Unidades
Sólidos Suspendidos Totales	328.0	200.0	mg/L
Sólidos Sedimentables	3.3	2.0	mg/L
Grasas y Aceites	80.0	25.0	mg/L
Materia Flotante	Ausente	Ausente	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	450.32	200.0	mg/L
Nitrógeno Total	27,2	60.0	mg/L
Fósforo Total	4,32	30.0	mg/L

**Nota** Fuente: Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente.

Puede observarse una clara diferencia en los parámetros de sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno en las dos tablas anteriores, resaltando que el agua residual cuyas características se expresan en la tabla 6.5 presenta, de forma global, una concentración mayor de contaminantes.

#### El agua de lavado

El agua de lavado presenta características físicas particulares; entre ellas cabe mencionar la considerable viscosidad que le otorga el alto contenido de sustancias coloidales procedentes del proceso de degradación del mucílago en la fermentación. La caracterización de dicha agua se muestra en la tabla 6.6.

**Tabla 6.6** Caracterización del agua de lavado

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máx. Perm.</b>	<b>Unidades</b>
Potencial de Hidrógeno (pH)	5.42	10	Unidades
Sólidos Suspendidos Totales	339.0	200.0	mg/L
Sólidos Sedimentables	60.0	2.0	mg/L
Materia Flotante	Ausente	Ausente	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	1050.0	200.0	mg/L
Nitrógeno Total	10,0	60.0	mg/L
Fósforo Total	30,0	30.0	mg/L

**Nota** Fuente: Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente.

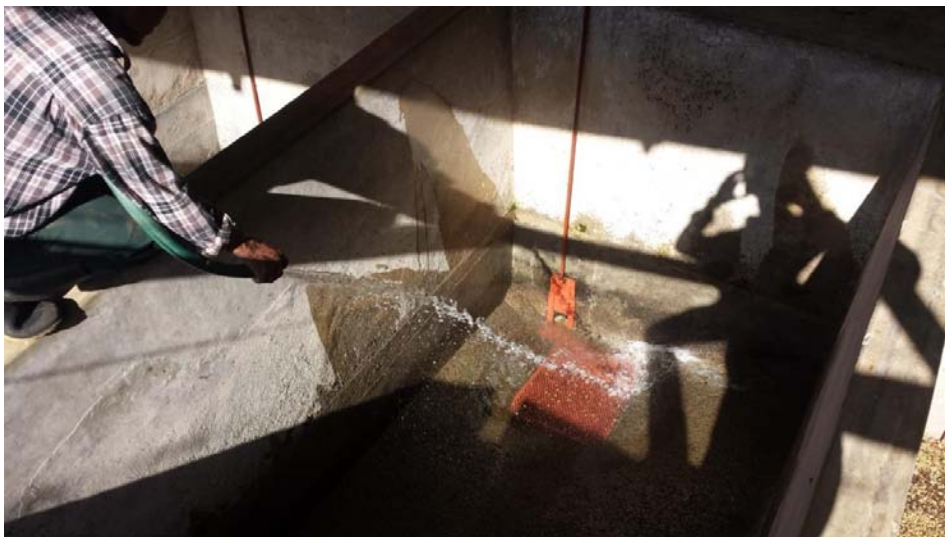
Otro aspecto igualmente importante de mencionar respecto a esta agua residual en particular es el aumento en los niveles de fósforo y la disminución en los de nitrógeno en comparación con el agua de despulpado, siendo esto consecuencia de las reacciones químicas que ocurren en la fermentación del grano.

## 6.2.2 Tratamiento primario

### Detalles generales del sistema

El agua utilizada para transporte del café durante el proceso de despulpado, al llegar al tanque de fermento se separa del grano de café por medio de placas de metal con orificios circulares de diámetro  $< 5\text{mm}$ , asemejando un tamiz, y cumpliendo así con la parte de tratamiento primario; previniendo la entrada de materia orgánica e inorgánica de dimensiones mayores al tamaño de los orificios al sistema de conducción y a la planta de tratamiento. Posterior a esto el agua es recolectada en los dos tanques (en adelante llamados Reactores) en los que se llevará a cabo el tratamiento secundario.

**Figura 6.5** Tamiz de drenado al fondo de los tanques de fermento



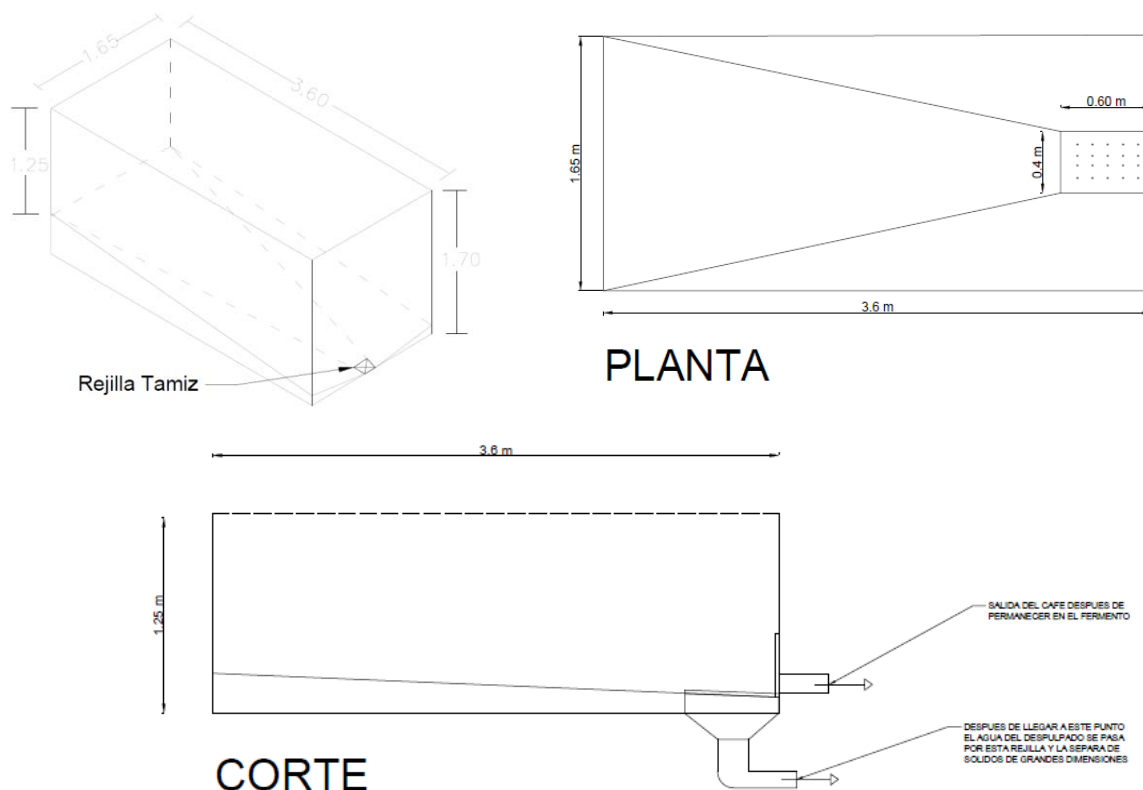
**Nota:** Compuerta de salida de café y reja-tamiz de drenado en los tanques de fermento. Limpieza de la rejilla. Fuente: Tanques de fermento [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

Toda partícula mayor a 5mm que queda atrapada en el tamiz y que es de naturaleza orgánica se desintegra en un 90% en el proceso de fermento, por lo que se elimina de esa forma al transferirse al agua de lavado en el proceso que compete a esa parte. Por otro lado es muy poco común que se presenten partículas inorgánicas, aunque puede darse el caso de residuos de bolsas de plástico o envolturas, y de ser así, éstas se remueven en el proceso de lavado del café.

### Esquematzación del sistema de tamizado en tanque de fermento

En la figura 6.6 se muestra un esquema del sistema de rejillas que funcionan como tamiz en el tratamiento primario. Ese esquema se repite en los 5 tanques de fermento en el beneficio.

**Figura 6.6** Esquema del sistema de rejillas para tratamiento primario en los tanques de fermento



### 6.2.3 Tratamiento secundario

Cuando el último saco de café recolectado ha terminado su trayecto en el proceso de beneficiado, la adición de agua al beneficio ya no es necesaria y se permite que el agua remanente dentro del mismo escurra hasta los reactores por las conducciones acopladas a la salida de los tanques de fermento, pasando por el tamiz antes mencionado. Cuando la descarga ha finalizado se cierra el reactor en las entradas y salidas de agua y se adicionan 5 kg de hidróxido de calcio aproximadamente, cantidad óptima de coagulante químico necesario para efectuar la reacción de forma apropiada. Esta medida fue obtenida de pruebas y ensayos experimentales realizados a pequeña escala (Figura 6.7) y en los mismos reactores, en escala 1:1 (Figura 6.8).

**Figura 6.7** Prueba de coagulación de agua de despulpado, antes y después de la adición de cal



**Nota:** Prueba de coagulación mediante adición de cal llevada a cabo por Samuel Benítez Flores. Izquierda: Agua de despulpado, sin tratamiento. Derecha: Agua clarificada, se observan los lodos al fondo. Fuente: Pruebas de coagulación [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

**Figura 6.8** Prueba de coagulación en escala 1:1



**Nota:** Prueba de coagulación en escala 1:1. Izquierda: agua clarificada dentro del tanque de coagulación. Derecha superior: agua residual sin tratamiento. Derecha inferior: Lodos residuales una vez evacuada el agua clarificada después de la coagulación. Fuente: Pruebas de coagulación [fotografía]. (2014). Archivo personal. Andreas Klein Schnippenkoetter, Finca San Carlos, Chiapas

Junto con el coagulante químico se pone en marcha un compresor de aire conectado a una tubería de PVC de  $\frac{3}{4}$  de pulgada que en su extremo tiene acoplada una manguera porosa (figura 6.9) que genera una aireación homogénea desde el fondo de los reactores, con esto solo se busca la mezcla gradual del coagulante y su completa dispersión en todo el volumen de agua a tratar.

La coagulación química se presenta a los pocos minutos de la adición del químico y aparecen los primeros flóculos de cal en la mezcla, estos se dejan precipitar y forman una interfaz gelatinosa de fangos en el fondo del reactor. Esta precipitación es lenta y toma alrededor de 12 horas en completarse. Por



experiencia se determinó un porcentaje de fangos que oscila entre un 5% y un 10% del volumen total del reactor y teniendo como respaldo el estudio estadístico de las diferentes pruebas realizadas se determinó que para fines teóricos estos porcentajes serían considerados máximos y mínimos para cualquier concentración de materia orgánica. Se considera variable la concentración de materia orgánica por una simple razón: si bien se puede procesar el mismo volumen de café en dos eventos aleatorios, la cantidad de agua utilizada en el proceso depende del criterio del operador en turno.

Transcurridas las 12 horas dentro del reactor químico el agua se ve clarificada y con un ligero color amarillo, esto es causado por los taninos disueltos en ella y que no son eliminados por el tratamiento químico.

**Figura 6.9** Manguera difusora para mezcla del coagulante en el agua.



**Nota:** Tubo con manguera difusora. Ésta se coloca al fondo del tanque como se muestra en la **Figura 6.12**. Fuente: Pruebas de coagulación [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

## Elección e instalación de los tanques de coagulación/sedimentación

Se consideraron 2 aspectos para elegir los tanques donde se lleva a cabo el proceso de coagulación y sedimentación;

1.- Por los horarios de las descargas y por los tiempos de duración del proceso de coagulación se requería de 2 tanques que pudieran operar de forma simultánea (figura 6.10) para el caso en el que los volúmenes de agua residual del proceso de despulpado excedieran los 8 m<sup>3</sup> (capacidad máxima establecida de cada tanque), por un lado, y que pueda llevarse a cabo el proceso de coagulación del agua de despulpado en uno de ellos mientras que en el otro se dispone del agua de lavado hacia el sistema de drenaje (el agua residual debe pasar a través de los tanques para entonces desviarla al drenaje de la Finca).

**Figura 6.10** Tanques de tratamiento secundario



**Nota:** Tanques de tratamiento secundario. Fuente: Tanques de coagulación [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

2.- Dado que se decidió usar una parte de uno de los patios de secado de la finca aledaños al beneficio para instalar ahí los tanques de coagulación y sedimentación, se optó por que estos fueran de HDPA, con su respectiva armadura de alambroón y desarmables, con la intención de retirarlos cuando haya concluido el tiempo de cosecha (y de generación de agua residual).

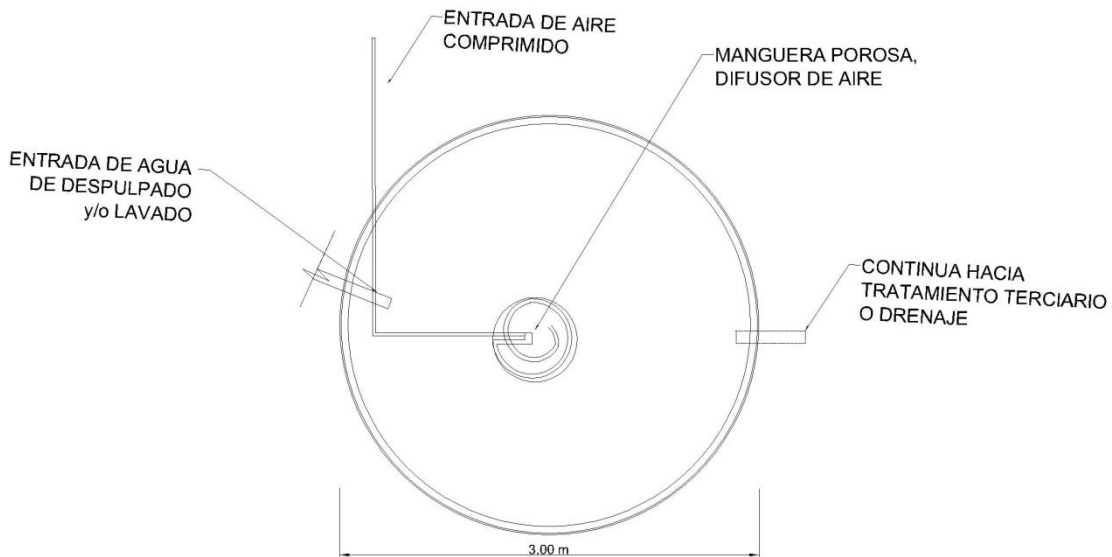
Estos dos tanques se conectaron en paralelo; ambos pueden llenarse y vaciarse de forma simultánea o individual y las entradas y salidas están interconectadas por lo que el flujo de agua residual se consigue abriendo o cerrando las válvulas respectivas en cada tanque. La entrada del agua es en descarga libre (figura 6.11). La salida se colocó en la parte inferior de cada tanque, con una válvula de cierre por la parte exterior y una boquilla en la parte interior en donde se coloca el tubo que funge como mecanismo para drenar el agua clarificada.

**Figura 6.11** Entrada de agua residual en descarga libre



**Nota:** Entrada de agua residual en descarga libre. El tubo superior desplaza el agua residual; el inferior (más delgado) es al que se conecta el sistema de difusión de aire para el mezclado del coagulante. Fuente: Tanques de coagulación [fotografía]. (2014). Archivo personal. Andreas Klein Schnippenkoetter, Finca San Carlos, Chiapas

**Figura 6.12** Vista en planta de uno de los dos tanques de coagulación - sedimentación

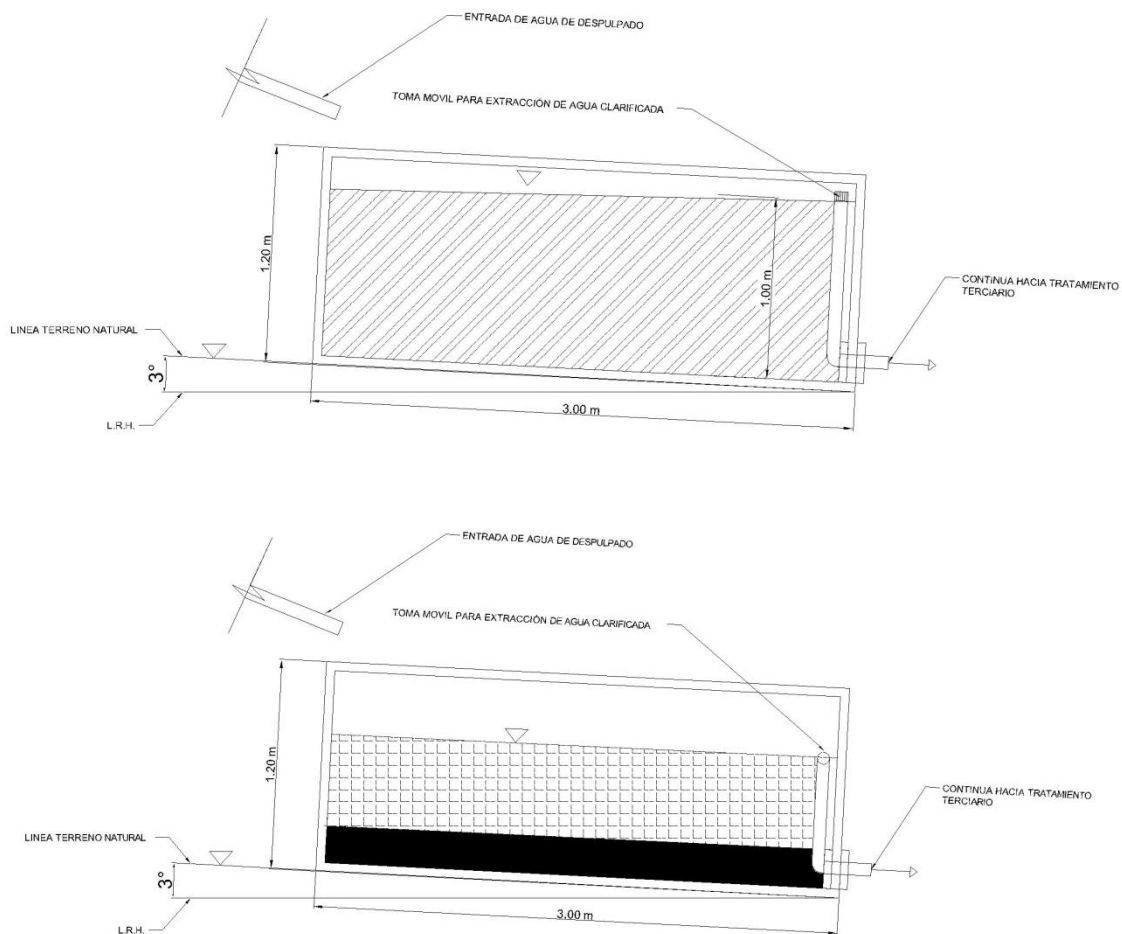


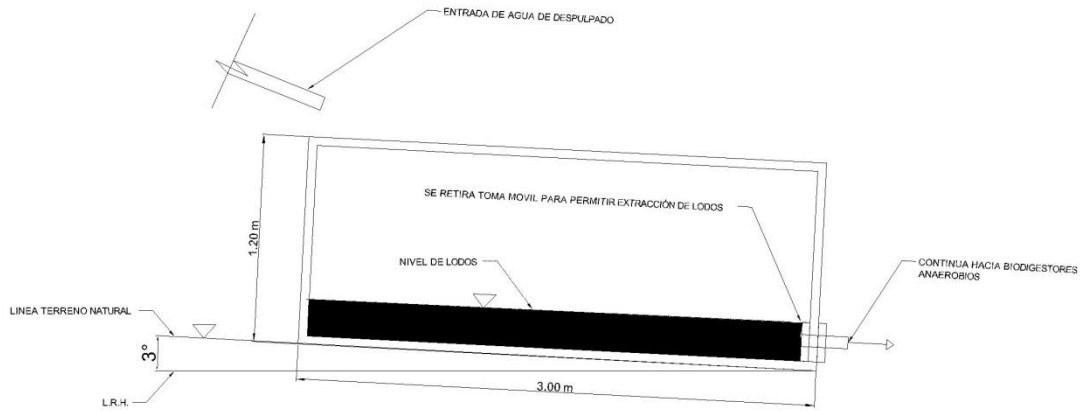
### Operación hidráulica de los tanques de coagulación / sedimentación

La operación hidráulica de los tanques de coagulación es muy sencilla; la entrada del agua residual es en descarga libre y el tiempo de la descarga es el mismo que dura el proceso de despulpado, que es cuando se está produciendo dicha agua residual. En primera instancia se coloca el tubo de dren de agua clarificada posición vertical, consistente en un tubo de PVC de 2" con un doble codo de 90°, conectándose uno de estos en el cople de salida ubicado en la parte inferior del tanque, se abre la válvula de entrada al tanque que se desea llenar mientras la del otro tanque permanece cerrada, salvo que se quieran llenar ambos a la vez, al tiempo que se cierra la válvula de salida. Una vez finalizado el llenado (cuando ha terminado el despulpado) y toda el agua residual ha escurrido al (los) tanque(s), se cierran las válvulas de entrada y se realiza el proceso de coagulación; propiamente el tratamiento secundario.

El procedimiento para evacuar el agua clarificada (figura 6.13), una vez terminado el proceso de coagulación – sedimentación, es manual; 1) Una vez sedimentados los lodos se abre la válvula de desvío del agua clarificada hacia el tratamiento terciario y manualmente se inclina el tubo de dren del agua clarificada con la intención de drenar dicha agua y asegurar la permanencia de los lodos dentro de los reactores, 2) una vez evacuada el agua clarificada se retira el tubo de PVC y los codos de la salida del tanque, se cierra la válvula de desvío al tratamiento terciario y se abre la que dirige los lodos al sistema de drenaje para su posterior tratamiento en los biodigestores instalados donde además tratan las demás aguas de desecho de la Finca; grises, negras y las del lavado del café.

**Figura 6.13** Etapas del proceso de tratamiento secundario





**Nota:** Esquema de las 3 etapas del tratamiento secundario. 1) Llenado de tanque y proceso de coagulación-sedimentación. 2) Dren del agua clarificada mediante el mecanismo manual de la tubería colocada en el cople de salida. 3) Evacuación de los lodos residuales. Fuente: Tratamiento secundario [Esquema]. (2015). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

En la conducción hidráulica a la salida de los reactores se tienen válvulas de cambio de dirección para poder mandar el agua clarificada a la siguiente parte del proceso de tratamiento (figura 6.14) y para disponer de los lodos residuales hacia el sistema de drenaje para posterior tratamiento anaerobio.

**Figura 6.14** Registros y válvulas de cambio de dirección de flujo de agua tratada



**Nota:** Válvula superior hacia tratamiento terciario, válvula inferior hacia sistema de drenaje. Fuente: Válvulas de dirección [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

## Elección del coagulante químico

Para efectuar la coagulación química, normalmente se agregan al agua y aguas residuales productos químicos formadores de flóculos, con el propósito de que engloben o se combinen con los sólidos sedimentables, pero en particular, con otros sólidos que no lo son o que sedimentan muy lentamente y con coloides, para formar agregados o flóculos que sedimentan rápidamente. Los coagulantes, en sí mismos, son solubles, pero son precipitados, por la transferencia de sus iones a las sustancias que se agregan o que se encuentran en las aguas o aguas residuales. En el tratamiento de las aguas residuales, la remoción de flóculos por sedimentación es, por lo común, una operación terminal (Fair, et al. 2008).

El coagulante químico seleccionado para darle tratamiento a esta agua residual es la cal común, esto por dos simples motivos:

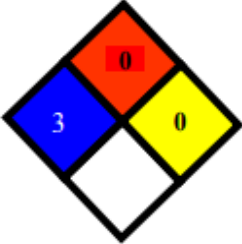
- 1.- Su fácil adquisición y abundancia en casa de materiales y diversas tiendas dedicadas a la construcción.
- 2.- El bajo costo de adquisición. Al tratarse un proceso de tratamiento discontinuo que solo se requiere durante la época de cosecha, además de que se lleva a cabo en reactores cerrados, el costo de operación sería muy elevado si se emplearan otros coagulantes químicos como el sulfato ferroso o de aluminio debido a que por la naturaleza del agua residual se necesitarían cantidades mayores a las comúnmente usadas en el tratamiento de éstas.

## Propiedades físicas y químicas de la cal

El hidróxido de calcio, di-hidróxido de calcio o cal hidratada, se obtiene, de manera natural por hidratación del óxido de calcio (cal viva). El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) presenta la siguiente información sobre la cal:

DATOS DE IDENTIFICACIÓN	
<b>Nombre químico (IUPAC):</b> Hidróxido de calcio	<b>No. CAS:</b> 1305-62-0
<b>Sinónimos:</b> Dihidróxido de calcio; Hidrato de calcio; Cal hidratada; Cal; Biocalc; Calvital; Kalkhydrate; Slaked lime	
<b>Nombre comercial, Formulación (%), Presentación:</b> <b>Para uso Agrícola:</b> Bertgil, 79.000, Polvo Humectable; Hidroxinor, 90.000, Polvo Técnico	
<b>Estructura química:</b>  $\text{HO}-\text{Ca}-\text{OH}$	<b>Fórmula química:</b> Ca(OH) <sub>2</sub>  <b>Peso molecular:</b> 74.10
<b>Tipo de plaguicida:</b> Fungicida	<b>Clasificación:</b> Sal inorgánica
<b>Uso:</b> Agrícola	
<b>Presentaciones comerciales:</b> <u>Agrícola:</u> Para aplicación al follaje: como polvo humectable en equivalentes en gramos de ingrediente activo (I.A./kg o L) de: 794 y como polvo técnico en equivalentes en gramos de ingrediente activo (I.A./kg o L) de: 900.	

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS
Cristales, gránulos suaves o polvo blanco, incoloro e inodoro; con sabor alcalino ligeramente amargo. Su punto de fusión es igual a 580 °C. Su densidad es igual a 2.24. Tiene un pH igual a 12.4. Es soluble en agua e insoluble en alcohol. Esta sustancia se descompone al alcanzar su punto de ebullición.

PELIGROSIDAD	
	<b>Salud (Azul): 3</b> - Una exposición corta podría causar serias lesiones temporales o residuales, aunque se proporcione un rápido tratamiento médico. <b>Inflamabilidad (Rojo): 0</b> - Materiales que no se incendiarán <b>Riesgo de Explosión (Amarillo): 0</b> - Normalmente estable, incluso bajo condiciones de incendio y no es reactiva con el agua.

DESTINO EN EL AMBIENTE
<b>Persistencia:</b> La cal hidratada no se degrada mediante un mecanismo oxidativo sino que se neutraliza por adsorción de dióxido de carbono atmosférico.

TOXICIDAD PARA LOS ORGANISMOS Y EL MEDIO AMBIENTE
<b>Tipo toxicológico:</b> IV Su toxicidad varía de ligera a prácticamente nula en peces.

**Nota** Fuente: Propiedades físicas y químicas de la Cal [Documento Digital]. (2015). Recuperado de [http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/pdf/cal\\_hidratada.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/sistemas/plaguicidas/pdf/cal_hidratada.pdf)

La fórmula de este compuesto se expresa a continuación:

<b>Fórmula semidesarrollada:</b>	Ca (OH) <sub>2</sub>
<b>Fórmula molecular:</b>	CaO <sub>2</sub> H <sub>2</sub>



Propiedades físicas básicas:

<b>Apariencia</b>	Polvo fino blanco
<b>Densidad</b>	2211kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa molar</b>	74,093 g/mol
<b>Punto de descomposición</b>	380 °C
<b>Estructura cristalina</b>	Hexagonal

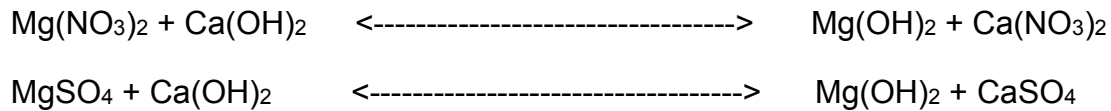
Propiedades químicas básicas:

<b>Alcalinidad</b>	-2.37pK <sub>b</sub>
<b>Solubilidad en H<sub>2</sub>O</b>	0.185g/100cm <sup>3</sup>
<b>Producto de solubilidad</b>	7.9x10 <sup>-6</sup>

### Uso de la cal en el tratamiento secundario de las aguas residuales

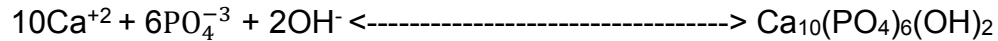
La cal se aplica comúnmente para alcanzar máxima absorción de impurezas en el proceso de floculación, se filtra entonces el agua para remover sólidos suspendidos mediante una coagulación química o floculación masiva. Este tratamiento se puede aplicar en una sola etapa en donde se efectúe una sola mezcla rápida del agua residual cruda con la cal empleándose para el efecto un agitador tipo turbina obteniéndose una floculación la cual se sedimenta para separar los lodos. En algunas plantas de tratamiento, el agua de drenaje cruda se trata inmediatamente con cal a un pH suficiente (>12) para facilitar la sedimentación primaria de materia orgánica y sólidos disueltos (esto es similar al tratamiento de suavización en el agua potable y es también efectivo en la remoción de fosfatos). Este proceso produce un alto volumen de lodo. Posteriormente el agua residual clarificada se airea para mediante una re-carbonatación ajustar el pH a 7-8 y llevarla a la siguiente etapa de tratamiento. La secuencia óptima para añadir el acondicionador se determina por prueba y error sobre todo cuando se emplean dos o más de ellos. La cal que se emplea proporciona control de pH, reducción de olores y desinfección. El carbonato de





La precipitación química del fósforo se consigue mediante la adición de sales de iones metálicos de valencia múltiple que forman precipitados de fosfatos poco solubles. Las sales más comunes son las de calcio, aluminio y hierro. La precipitación con calcio es muy diferente con respecto del proceso empleando hierro o aluminio:

Precipitación de fosfato con sal de calcio:



El calcio se suele añadir en forma de cal,  $\text{Ca(OH)}_2$ . Cuando se añade cal al agua reacciona con la alcalinidad natural para precipitar  $\text{CaCO}_3$ . Sin embargo, cuando el pH del agua residual alcanza valores por encima de 10, un exceso de iones calcio reaccionará con el fosfato, precipitando hidroxilapatita. (Suárez y Jácome, 2007)

### Descripción del proceso de floculación / sedimentación

El proceso es bastante simple ya que éste se lleva a cabo en reactores cerrados; los tanques comienzan a ser llenados con el agua residual con la válvula de salida cerrada hasta que alcanzan su máximo volumen, de ser el caso, interrumpiéndose entonces la entrada de agua por tratar. En este momento se adiciona la cantidad necesaria para comenzar la precipitación química (Entre 5-7 kg de cal aproximadamente) y se activa una turbina para soplar aire a presión por una manguera porosa sumergida en el tanque para garantizar un mezclado homogéneo y lento mediante una columna ascendente de aire-agua.

Cuando los primeros flóculos comienzan a aparecer se apaga la turbina y se suspende el mezclado para permitir la decantación por gravedad del conglomerado de sólidos y materia orgánica y evitar que los flóculos se rompan en partículas más pequeñas.

El manejo y la eliminación del lodo resultante de la coagulación química y la posterior sedimentación constituyen una de las mayores problemáticas para esta planta. El fango se produce en un gran volumen y alcanza a menudo entre un 5% y un 10% del volumen de agua residual tratada. Estos fangos son enviados a los biodigestores de la finca al terminar de evacuar el agua clarificada, donde se les da tratamiento biológico anaerobio para su posterior disposición.

#### **6.2.4 Tratamiento terciario**

##### Estabilización de pH y remoción de nutrientes

El agua clarificada proveniente del tratamiento secundario es conducida por gravedad a los tanques de tratamiento terciario, hechos con los mismos materiales que los reactores y con un volumen de 9 m<sup>3</sup> cada uno. Se tienen conectados en serie 3 de estos tanques (llamados en adelante Lagunas), llenos de agua y con la superficie cubierta en aproximadamente un 90 % de su extensión por lirios acuáticos de la especie Algarve (*Eichhornia Crassipes*). Este porcentaje de cobertura de superficie acuática se logra con entre 60 y 70 plantas.

Se tomó la decisión de plantar estas macrófitas en las lagunas para disminuir aún más los niveles de nutrientes presentes en el agua a pesar de que los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a muestras de agua residual tratada tomadas a la salida de los reactores tras el proceso de tratamiento secundario reportan una concentración de Nitrógeno de 25.99 mg/L y de Fósforo de 4.5 mg/L (valores aproximados), muy por debajo de los límites máximos

permisibles indicados en la NOM correspondiente, que establece como adecuada una concentración entre 40 y 60 mg/L y 10 y 30 mg/L respectivamente.

**Figura 6.15** Tanque #3 del tratamiento terciario cubierto con lirio acuático (Eichhornia Crassipes)



**Nota:** 3er tanque de tratamiento terciario cubierto en su superficie con lirio acuático para absorción de nutrientes y taninos. Puede observarse en primer plano la entrada en descarga libre del agua procedente de la laguna anterior, y al fondo el tubo vertical que mantiene el nivel de agua dentro del tanque. Fuente: Tratamiento terciario [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

Otra de las razones de utilizar los lirios acuáticos fue su alta tasa de absorción de los taninos disueltos, logrando con esto el control de la coloración del agua residual tratada.

Según estudios desarrollados en plantas piloto por la Universidad del Valle en Colombia, se llegó a la conclusión de que los estanques de Jacinto de agua son una técnica económicamente factible para tratar efluentes de agua residual por las siguientes razones:

- Son menos costosos que otras opciones de tratamiento.
- Gastos de operación y mantenimiento bajos. (energía y suministros)

- La operación y mantenimiento no requieren un trabajo permanente en la instalación.
- Los estanques soportan bien las variaciones de caudal.
- Facilitan el reciclaje y reutilización del agua.
- Proporcionan un hábitat para muchos organismos.

La siguiente tabla (Tabla 6.7) muestra los resultados de remoción para diferentes tipos de macrófitas flotantes, tomando muestras puntuales en el influente y en el efluente de la planta piloto del anterior estudio mencionado.

**Tabla 6.7** Resultados de eficiencia de remoción de DBO(%), N(%) y P(%) del estudio en planta piloto por la Universidad del Valle, Colombia.

PLANTA	TIEMPO DE RETENCION (días)	Demanda Bioquímica (mg/L)		Nitrogeno Total (mg/L)		Fosforo Total (mg/L)		Solidos Suspendidos Totales (mg/L)		Eficiencia de remoción DBO (%)	Eficiencia de remoción N (%)	Eficiencia de remoción P (%)
		Influente	Efluente	Influente	Efluente	Influente	Efluente	Influente	Efluente			
Salvinia	4	94	22	29	13	-	-	-	-	76.60	55.17	S/D
Pistia	4	94	18	29	8	-	-	-	-	80.85	72.41	S/D
Azólla	6.2	92	28	21	10	2	0.8	-	-	69.57	52.38	60.00
Lemna	6.2	92	27	21	7	2	0.8	-	-	70.65	66.67	60.00
Azólla	3.1	87	41	24	15	3	2.1	-	-	52.87	37.50	30.00
Lemna	3.1	87	34	24	16	3	1.9	-	-	60.92	33.33	36.67
Laguna	3	141	23	29	13	5	2.6	209	129	83.69	55.17	48.00
Jacinto	3	141	15	29	8	5	1.2	209	35	89.36	72.41	76.00
Laguna	1.5	120	36	24	17	4	2.2	96	200	70.00	29.17	45.00
Jacinto	1.5	120	16	24	14	4	1.5	96	32	86.67	41.67	62.50
Laguna	1	121	43	25	16	6	2.9	92	121	64.46	36.00	51.67
Jacinto	1	121	36	25	15	6	2.4	92	12	70.25	40.00	60.00

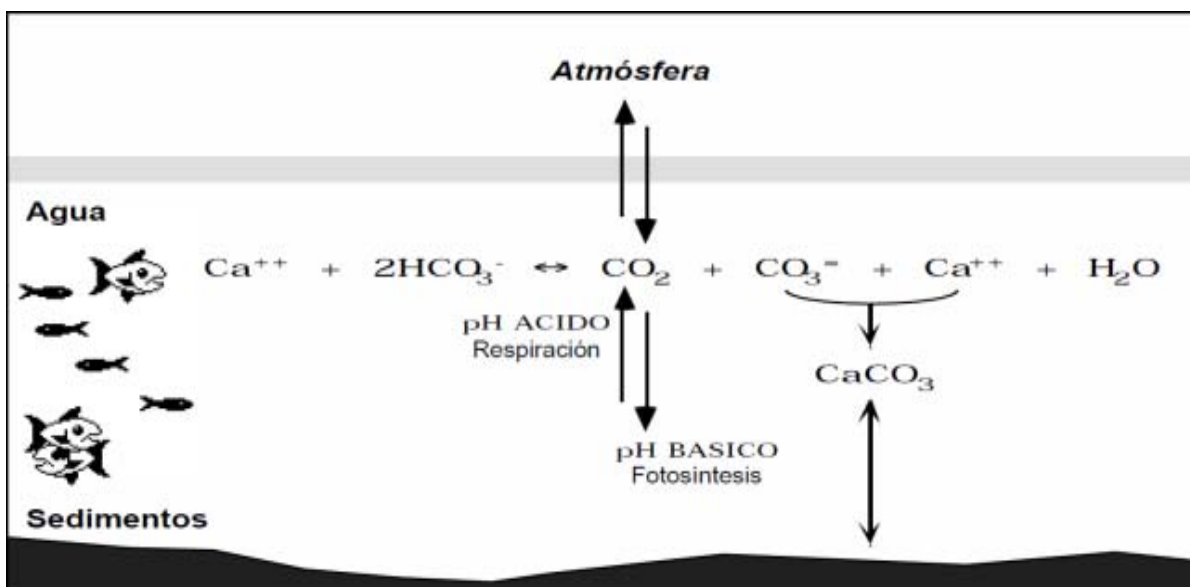
**Nota** Fuente: Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales. [Documento Digital]. (2015). Recuperado de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/viewFile/946/850>

El uso de macrófitas flotantes ha demostrado eficiencias de remoción significativamente altas en todos los constituyentes de las aguas residuales. Una cantidad importante de especies ha sido empleada en sistemas de tratamiento, y en ejercicios investigativos a escala real y a escala laboratorio, siendo el Jacinto de agua, la macrófita de mayor interés dada las características ya señaladas. Esta especie, de acuerdo con los reportes de la literatura, alcanza reducciones de DBO5 en el orden de 95%, y hasta 90,2% para la DQO. En el caso de los sólidos

suspendidos se registran disminuciones con valores que se encuentran en el rango de 21% y 91%. En cuanto al fósforo total y nitrógeno total, se alcanzaron máximas remociones de 91,7% y 98,5% respectivamente, siendo este último, el contaminante con mayor remoción. Los metales también han sido objeto de remoción, encontrándose porcentajes de máxima remoción desde 85% hasta 95% para el hierro, cobre, zinc, cadmio y cromo (Martelo & Lara, 2012).

Por otra parte, una característica del tratamiento secundario por coagulación química, y en específico con la adición de hidróxido de calcio, es el incremento en la escala de potencial de hidrógeno; como resultado se tiene agua tratada con baja concentración de materia orgánica disuelta y pocos sólidos totales, pero altamente alcalina. Para resolver este problema se colocó más de una laguna en el sistema para elevar el tiempo de retención de dicha agua tratada y así garantizar una interacción de la superficie líquida de los tanques con la atmósfera, cuya natural concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) acidifica el agua cuando entra contacto con ella, disminuyendo entonces el pH a valores entre 6 y 8 (Figura 6.16)

**Figura 6.16** Reabsorción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera; nivelación de pH



**Nota** Fuente: Manual del laboratorio de ecología microbiana de la Universidad de Puerto Rico. [Documento Digital]. (2014). Recuperado de <http://ocw.um.es/ciencias/ecologia/lectura-obligatoria-1/p1-intro.pdf>

El tiempo de retención se calcula de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec.6.1})$$

Donde:

$\Theta$ = Tiempo de retención (s)

V= Volumen de los tanques (L)

Q= Gasto del sistema (L/s)

Para fines del análisis de la operación de la planta en términos del tiempo de retención se fijó como gasto de entrada el que reporta la adición de agua de abastecimiento al sistema, en la ecuación 6.2 como Q1. Esto debido a que es el único gasto constante durante todo el proceso.

El gasto Q1 reportado es de 0.7 L/s y volumen total de los tres reactores es de 27000 L el tiempo de retención se calcula como:

$$\theta = \frac{27\,000[L]}{0.5[L/s]} = 54\,000s$$

$$54\,000\,s = \frac{1\,min}{60s} = \frac{1h}{60\,min} = \frac{54\,000}{3600} = 15\,h$$

El tiempo de retención estimado para la planta es de 15 horas, durante las cuales se garantiza el contacto directo con los lirios acuáticos que limpiarán el agua de nutrientes en exceso y coloración no deseada. Y también el contacto en la interfaz aire-agua promoviendo su acidificación natural.



## Operación hidráulica de los tanques de estabilización y remoción

Las tres lagunas están conectadas en serie y mantienen un nivel constante de agua; la primera recibe el agua clarificada proveniente del tratamiento secundario, a su vez que el gasto entrante, mismo que el saliente, pasa a la segunda laguna y sucesivamente a la tercera. Toda entrada de agua en las lagunas es en descarga libre (Figura 6.15) y las salidas se encuentran ubicadas en la parte inferior, como mostradas en la Figura 6.17.

**Figura 6.17** Válvulas de salida de las lagunas de estabilización



**Nota:** Válvulas y conexiones de salida de las lagunas de estabilización. La válvula superior es para drenar el agua a la siguiente laguna, la inferior es para mantenimiento y para drenar los posibles lodos o materia orgánica que pudiera sedimentarse. Fuente: Tratamiento terciario [fotografía]. (2014). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

Como las descargas del beneficio no son continuas en el tiempo y la producción de agua clarificada, por ende, tampoco lo es, se agregó una entrada de agua potable constante (misma que se usa a la entrada del beneficio), de

aproximadamente 0.7 L/s en la primera laguna de estabilización para garantizar que el agua no se quede estancada por la irregular adición de aguas tratadas. Este es un punto muy importante ya que si se dependiera únicamente de las descargas del beneficio para circular el agua de las lagunas no se lograría un flujo constante pues estaría detenida parcialmente en cada laguna entre una descarga y otra de agua clarificada de los reactores químicos.

Entonces al mantener una entrada constante de agua potable se garantiza:

1.- El movimiento constante de agua en las lagunas por diferencia de carga hidráulica en los tanques.

2.- La dilución del agua tratada químicamente.

$$(Q2 * \chi2) + (Q1 * \chi1) = (Q1 + Q2) * \chi m \quad (\text{Ec.6.2})$$

Donde:

Q2= Gasto de entrada de los reactores químicos (L/s)

$\chi2$ = Concentración de nutrientes en el agua clarificada (mg/L)

Q1= Gasto de entrada de la fuente de abastecimiento (L/s)

$\chi1$ = Concentración de nutrientes en el agua de abastecimiento (mg/L)

$\chi m$ = Concentración de la mezcla a la salida de la laguna #1

Con esta expresión podremos calcular la concentración de cualquier nutriente en exceso a la salida de la primer laguna para una descarga cualquiera.

La salida de cada laguna se sitúa en la parte inferior del tanque; por la parte interior un codo a 90° y un tubo de PVC completamente vertical de 1 metro de longitud x 2" de diámetro para mantener la carga constante en el tanque, de tal

suerte que el excedente de agua fluya a través de ese tubo. Por la parte exterior tiene acoplada una válvula para controlar el paso del agua a la siguiente laguna (Figura 6.16).

La salida de la tercera laguna es la que descarga directamente al arroyo que atraviesa la Finca, devolviendo entonces el agua tratada al medio del que fue tomada inicialmente antes del proceso de beneficiado.

## 7. Resultados de la operación de la planta

### 7.1 Resultados de los análisis del agua del efluente de la planta de tratamiento

Se hizo el análisis del efluente de la planta de tratamiento en dos puntos importantes, el primero corresponde al agua del efluente del tratamiento secundario y el segundo a aquella que fue sometida al tratamiento terciario. Los resultados de dicho análisis se muestran en las tablas 7.1 y 7.2 correspondientemente. Puede observarse un ligero aumento en la DBO en el tratamiento terciario, ocasionado por el desarrollo y crecimiento de los lirios plantados para la remoción de nutrientes y disminución del pH.

**Tabla 7.1** Análisis del agua después del tratamiento secundario

DETERMINACIÓN	RESULTADO
Temperatura	-
Potencial de hidrógeno****	9.5-10
DBO <sub>5</sub>	1 mg/L
Nitrógeno total	25.99 mg/L
Fósforo total	2.67 mg/L

**Nota** Fuente: Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente.

**Tabla 7.2** Análisis del agua después del tratamiento terciario

DETERMINACIÓN	RESULTADO
Temperatura	-
Potencial de hidrógeno****	7.9
DBO <sub>5</sub>	10 mg/L
Nitrógeno total	6.49 mg/L*
Fósforo total	1.0 mg/L*

**Nota** Fuente: Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente.

\* Los valores de nitrógeno total y fósforo total se calcularon mediante una aproximación sencilla basada en un promedio pesado con referencia a los resultados del estudio realizado por la Universidad del Valle, Colombia, respecto al uso de macrófitas flotantes para depuración de aguas residuales (Capítulo 6.2.4 Tratamiento Terciario, Tabla 6.7). Dicha aproximación se muestra en la siguiente tabla 7.3 y contempla los resultados de la planta de Finca San Carlos\*\*\* y los de las 3 pruebas que se hicieron con el Lirio Acuático (Jacinto, Eichhornia Crassipes) en tiempos de retención de 1, 1.5 y 3 días (24, 36 y 72 hrs)

**Tabla 7.3** Resultados de la aproximación para la eficiencia de remoción de Nitrógeno y Fósforo en el tratamiento terciario

Comparacion de remocion entre planta piloto y planta de Finca San Carlos			Nitrogeno total (mg/L)		Eficiencia %	Fosforo total (mg/L)		Eficiencia %
Prueba	Tr (hrs)	Volumen (L)	Influente	Efluente		Influente	Efluente	
Planta de la finca	15	9000	25.99	6.498	25	2.67	1.00	37.5
Planta piloto estudio 1	72	470	29	8	72.414	5	1.2	76
Planta piloto estudio 2	36	470	24	14	41.667	4	1.5	62.5
Planta piloto estudio 3	24	470	25	15	40	6	2.4	60

**Nota** Fuente: Aproximación de los resultados esperados de eficiencia de remoción de Nitrógeno y Fósforo. [Tabla]. Samuel Alejandro Benitez Flores. (2015).

En primera instancia se aproximó al resultado de la eficiencia con base en el tiempo de retención, resultante en 25%\*\* para el Nitrógeno y 37.5%\*\* para el Fósforo, posteriormente se calculó, respecto a dicho porcentaje, el valor esperado en el efluente.

\*\* Es importante mencionar que el resultado que se expresa como efluente, tanto para el Nitrógeno como para el Fósforo, es meramente una aproximación y los valores pueden variar considerablemente respecto a los que se obtuvieran de un análisis de caracterización.

\*\*\* La intención es demostrar que, dado estudios previos, dichas macrófitas efectivamente absorben en altos porcentajes los nutrientes presentes en el agua y que al implementarlos en el sistema del tratamiento terciario de Finca San Carlos se espera una disminución en dichos valores.

Comparativa de las características del agua del efluente y los límites máximos permisibles establecidos por la norma oficial mexicana de descarga de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996)

En la tabla 7.4 puede observarse la comparativa de los parámetros obtenidos mediante el análisis del efluente del tratamiento secundario y terciario con los límites máximos permisibles para contaminantes básicos establecidos por la Norma Oficial Mexicana para descargas a ríos para uso en riego agrícola.

**Tabla 7.4** Comparativa de los límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996 con las características del efluente del tratamiento secundario y terciario

Parámetro	Efluente Tratamiento Secundario	Efluente Tratamiento Terciario	NOM-001-SEMARNAT-1996
Temperatura (C°)	N.A.	N.A.	N.A.
pH	9.5	7.9	10
Grasas y Aceites (mg/L)	Ausente	Ausente	25
Materia Flotante	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables (mg/L)	0.0	0.0	2
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1.0	10.0	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	1.0	10.0	200
Nitrógeno Total (mg/L)	25.66	6.49 *	60
Fósforo Total (mg/L)	2.67	1.0 *	30

**Nota** Fuente: Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente. Los límites indicados en la columna NOM-001-SEMARNAT-1996 corresponden a los límites máximos permisibles publicados en CONAGUA (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. En *Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997* (pp. 7). Ciudad de México, México: SEMARNAT.

\* Resultados calculados mediante una aproximación sencilla. Tabla 7.3

## 7.2 Comparación de los análisis del agua del influente y del efluente de la planta de tratamiento

Esta comparación (Tabla 7.4) se hará con los resultados de la caracterización del efluente del tratamiento secundario y con los del agua de despulpado, evento 2 (Tabla 7.5), por ser los que presentan los valores más altos de Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Suspendidos Totales, Nitrógeno Total y Fósforo Total. Es importante reiterar que los valores del agua de influente de la planta siempre variarán, dependiendo esto de los volúmenes de café que se despulparán y de la cantidad de agua utilizada para el proceso.

**Tabla 7.5** Caracterización del agua de despulpado, evento 2

Parámetro	Resultado	Máx. Perm.	Unidades
Potencial de Hidrógeno (pH)	3.45	10	Unidades
Sólidos Suspendidos Totales	328.0	200.0	mg/L
Sólidos Sedimentables	3.3	2.0	mg/L
Grasas y Aceites	80.0	25.0	mg/L
Materia Flotante	Ausente	Ausente	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	450.32	200.0	mg/L
Nitrógeno Total	27,2	60.0	mg/L
Fósforo Total	4.32	30.0	mg/L

**Nota** Fuente: Copia de la tabla 6.4 de este mismo documento, capítulo 6.

Puede notarse que el pH es bajo, indicando que el agua residual es ácida, tiene un alto contenido de sólidos suspendidos totales y de sólidos sedimentables, ambos por encima de los máximos permisibles con valores excedentes en 128 y 1.3 mg/L respectivamente, de la misma forma que las grasas y aceites con 55 mg/L de excedencia y la DBO con 150.32 mg/L. El Nitrógeno Total y el Fósforo Total son los únicos parámetros que están en un rango óptimo, con, respectivamente, 32.6 y 25.68 mg/L por debajo de los valores máximos

permisibles.

El nitrógeno y el fósforo están íntimamente relacionados con la actividad bacteriana propia del proceso de fermentación, que empieza prácticamente en el proceso de despulpado, donde el gran contenido de azúcares de dicha agua residual y la temperatura de la misma favorecen y aceleran la actividad microbiológica por lo que en cuestión de un par de horas el agua de despulpado empieza a fermentarse rápidamente, presentándose importantes variaciones en dichos parámetros y en el pH.

**Tabla 7.6** Comparativa del agua del influente y el efluente de la planta de tratamiento (hasta tratamiento secundario).

Parámetro	Influente	Efluente	Diferencia
Temperatura (C°)	N.A.	N.A.	N.A.
pH	3,45	9.5	+ 6.05
Grasas y Aceites (mg/L)	80,0	Ausente	- 80.0
Materia Flotante	Ausente	Ausente	N.A.
Sólidos Sedimentables (mg/L)	3,3	0.0	- 3.3
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	328.0	1.0	- 327.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	450.32	1.0	- 449.32
Nitrógeno Total (mg/L)	27,2	25.66	- 4.44
Fósforo Total (mg/L)	4.32	2.67	- 1.65

**Nota Fuente:** Resultados del análisis fisicoquímico del agua residual llevado a cabo en laboratorio privado, en Tapachula Chiapas, mediante metodologías apegadas a la Normativa vigente.

### Determinación del porcentaje de efectividad de la planta

La eficiencia del proceso de precipitación química se ve reflejado en la remoción de los agentes contaminantes, calculada de la siguiente forma:



$$\eta = \frac{(S_o - S)}{S_o} * 100$$

Donde:

$\eta$ : Eficiencia de remoción del sistema (%)

S: Carga contaminante en la salida (mg/L)

$S_o$ : Carga contaminante de entrada (mg/L)

Eficiencia de remoción para la demanda bioquímica de oxígeno:

$$\eta, DBO = \frac{(450.32 - 1)}{450.32} * 100 = 99.77\%$$

Eficiencia de remoción para las grasas y aceites:

$$\eta, GyA = \frac{(80.0 - 0)}{80.0} * 100 = 100\%$$

Eficiencia de remoción para los sólidos suspendidos totales:

$$\eta, SST = \frac{(328.0 - 1)}{328.0} * 100 = 99.69\%$$

Eficiencia de remoción para los sólidos sedimentables:

$$\eta, SST = \frac{(3.3 - 0)}{3.3} * 100 = 100\%$$

Eficiencia de remoción para el nitrógeno total (hasta tratamiento secundario):

$$\eta, N = \frac{(27.2 - 25.99)}{27.2} * 100 = 4.44\%$$

Eficiencia de remoción para el nitrógeno total (hasta tratamiento terciario):

$$\eta, N = \frac{(27.2 - 6.49)}{27.2} * 100 = 76.14\%$$

Eficiencia de remoción para el fósforo total (hasta tratamiento secundario):

$$\eta, P = \frac{(4.32 - 2.67)}{4.32} * 100 = 38.19\%$$

Eficiencia de remoción para el fósforo total (hasta tratamiento terciario):

$$\eta, P = \frac{(4.32 - 1.0)}{4.32} * 100 = 76.85\%$$

Lo anterior deja en claro la alta eficiencia en remoción de materia orgánica.

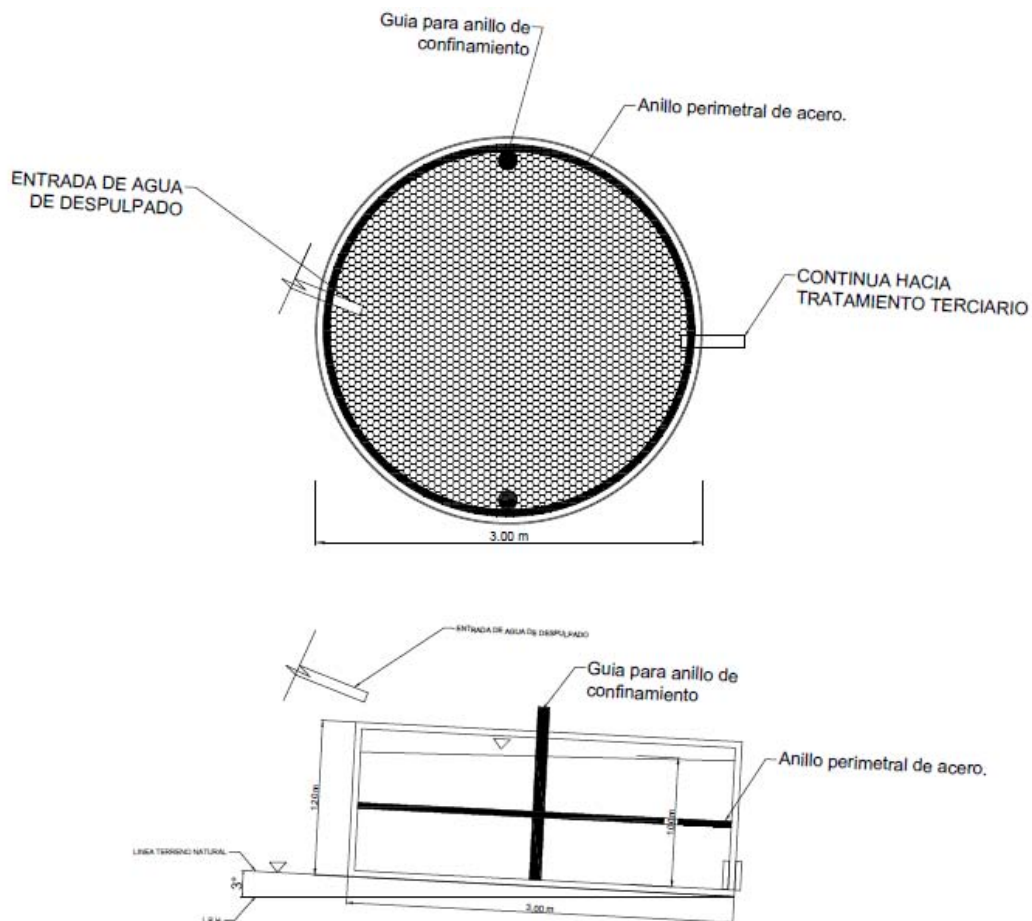
Al analizar los resultados se aprecia la efectividad de la adición del coagulante químico para eliminar la demanda bioquímica de oxígeno y los sólidos sedimentables y totales, pero se obtiene a expensas del incremento del potencial de hidrógeno y de una baja disminución de nitrógeno y fósforo que posteriormente se resuelve con el tratamiento terciario, como se expresa en los resultados anteriores.

## 8. Propuestas de mejora

### 8.1 Rejilla para confinar los lodos sedimentados en la evacuación del agua clarificada de los tanques

Una de las propuestas de mejora para facilitar el proceso de evacuación del agua clarificada de los reactores en el tratamiento secundario una vez que termina el proceso de coagulación-sedimentación es usar una rejilla para confinar los lodos sedimentados en el fondo de los tanques y evitar que estos puedan entrar en suspensión nuevamente en el evento de una alteración brusca que vuelva turbulento el flujo del agua que drena.

**Figura 8.1** Rejilla para confinar los lodos residuales en la evacuación del agua clarificada



**Nota:** Esquema del anillo confinador. Superior: Vista en planta. Inferior: Vista en corte lateral Fuente: Propuestas de mejora [Esquema]. (2015). Archivo personal. Samuel Benítez Flores, Finca San Carlos, Chiapas

Esta rejilla (Figura 8.1) consiste en un anillo metálico de 10cm de ancho con una malla tipo mosquitero que cubre toda su área en la parte superior y con un diámetro ligeramente menor al de los reactores (3m). Este anillo desliza por la parte interior de las paredes del tanque y, haciéndolo bajar manualmente mediante unos ganchos sencillos confinará a los lodos en el volumen que se establece entre la malla y el fondo del tanque. Este volumen, de aproximadamente 950L (0.95m<sup>3</sup>) corresponde al valor del volumen máximo estimado de lodos residuales, contemplados en 10% del volumen total del reactor, por lo que en todo momento el total de los lodos quedará confinado.

Una vez colocada la rejilla en el fondo del tanque, el agua clarificada puede entonces evacuarse únicamente abriendo la válvula de salida que se ubica en la parte inferior externa de los tanques, y ya no es necesario emplear el mecanismo manual explicado en el Capítulo 6. Operación hidráulica de los tanques de coagulación-sedimentación. De esta forma el proceso se agiliza de dos maneras, la primera es que ya no se requiere de una persona que manualmente de inclinación al tubo de dren de salida antes mencionado, y por otro el agua clarificada puede evacuarse más rápidamente al únicamente abrir la válvula de salida.

## **8.2 Filtro de carbón activado para remover color, olores y sabores**

Otra propuesta de mejora es la instalación de un filtro de carbón activado al final del tratamiento terciario para que el agua tratada, una vez finalizado todo el proceso, pueda mejorar su calidad aún más dadas condiciones que pudieran alterarla en alguna parte del proceso y que los tiempos de retención en el tratamiento terciario no sean suficientes para que pueda estabilizarse como en un principio estaba planeado, como una medida preventiva.

La intención de este filtro de carbón activado es, además de lo anterior, eliminar cualquier olor o sabor extraño que pudiera tener el agua que no haya sido removido en el tratamiento terciario.

La reducción del color, sabores y olores del agua por adsorción de las sustancias contaminantes sobre carbón activado es probablemente la aplicación directa más importante de la adsorción en tratamiento de aguas. Las columnas o lechos de carbón activado granular se emplean, 1) para concentrar los contaminantes orgánicos del agua para propósitos de su análisis, ó 2) para la remoción de contaminantes. Algo de la remoción de las sustancias productoras de color y de otros contaminantes durante la coagulación puede ser el resultado de la adsorción.

...

El carbón granular puede reemplazar a otros materiales filtrantes en estructuras semejantes a los filtros rápidos de la actualidad. De hecho, los lechos de carbón activado granular se pueden comportar ya sea como filtros o como adsorbentes [...] Para adsorción, la velocidad de flujo por pie cúbico más que por pie cuadrado de lecho es, lógicamente, el parámetro importante en la práctica. Los tamaños de los granos de carbón varían de 0.2 a 4mm o 14/40 mallas, y se obtienen velocidades de un valor cercano a 0.5 gpm por pie cúbico. (0.053 lpm/m<sup>3</sup>), cuando los lechos de 5 a 10 pies de profundidad (1.52 a 3.05 m) filtran agua a velocidades de 5 a 10 gpm por pie cuadrado (1.76 a 3.53 lpm/m<sup>3</sup>). Los tiempos de contacto correspondientes son de, aproximadamente, 1.7 min y pueden obtenerse rendimientos de colección del 50 al 90% de los materiales extractables del carbón por cloroformo (CCE). (Fair et al. 2008)

Con base en lo anterior, se propone entonces un filtro de carbón activado con las siguientes características:

Tiempo de contacto  $T_c = 1.7$  min

Gasto máximo  $G_m = 1.8$  lpm

Par asegurar que con un gasto máximo de 1.8 lpm se cuente con un tiempo de contacto de 1.7 min, de deberá contar con un volumen de carbón activado granular de  $1 \text{ m}^3$ .

Acorde a la profundidad sugerida en la cita anterior, deberá ser de 5 pies (1.5 m aprox)

$$\text{Vol (V)} = \text{Área(A)} * \text{Altura (h)}$$

$$A = \frac{V}{h}$$

$$A = \frac{1 \text{ m}^3}{1.5 \text{ m}} = 0.66 \text{ m}^2$$

Proponiendo un tanque circular, éste deberá ser de diámetro D:

$$A = \pi * r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.66 \text{ m}^2}{\pi}} = 0.22 \text{ m}$$

$$D = 2r = 2(0.22 \text{ m}) = 0.44 \text{ m} \cong 0.5 \text{ m}$$

Entonces para una altura de 1.5 m, el diámetro del tanque deberá ser de 0.5 m.

## Conclusiones y Recomendaciones

Con los resultados presentados no solo se cumplen los objetivos propuestos por el cliente y la administración de la finca de reducir las emisiones contaminantes sino que también cumplimos el objetivo de este trabajo satisfactoriamente al reportar niveles de agentes contaminantes menores a los estipulados en la Norma Oficial Mexicana (NOM) vigente.

Los resultados de los análisis físico-químicos que se realizaron a las muestras de agua del efluente de la planta de tratamiento que se instaló en Finca San Carlos, Chiapas, demuestran que el proceso de tratamiento al que son sometidas las aguas residuales del proceso de beneficiado del café es efectivo en una medida considerable. Hablar de tasas de remoción de 99.77% para la DBO<sub>5</sub>, 100% para grasas y aceites, 99.69% para sólidos suspendidos totales, 100% para sólidos sedimentables, 76.14% para nitrógeno total y 76.85% para fósforo total dejan en claro que el sistema es eficiente para fines de remoción de contaminantes. Lo anterior resulta en el cumplimiento de uno de las principales premisas que la Red de Agricultura Sustentable (RAS) establece dentro de sus lineamientos de certificación Rainforest Alliance y que se volvió uno de los principales objetivos en torno al cual se ideó y desarrolló el proyecto de la planta de tratamiento; que las descargas de aguas residuales del proceso agroindustrial específico del beneficiado húmedo del café se encuentren dentro de los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana vigente en materia de descargas de aguas residuales a cuerpos de aguas naturales.

La elección de la cal común como agente coagulante para sedimentar las sustancias orgánicas contaminantes presentes resulta igualmente efectiva para las características físicas y químicas que el agua residual adquiere en su paso a través del proceso del beneficiado del café y es uno de los principales factores de la eficiencia general del sistema de tratamiento; su bajo costo, disponibilidad y facilidad de uso permiten, en conjunto, una operación sencilla que no requiere de personal capacitado, instalaciones especiales o sistemas técnicos complejos como

en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, ya que no se lidia con sustancias tóxicas, metales pesados ni organismos patógenos peligrosos.

La operación de la planta de tratamiento resulta sencilla y eficiente; requiere un mínimo de energía, se adaptó a las condiciones del terreno y a la falta de espacio en terrenos planos, se aprovechó la gravedad para desplazar el agua a través del sistema, sin la necesidad de instalar bombas y ductos especiales y las descargas libres en la entrada a todos los tanques, tanto del tratamiento secundario como terciario, facilitaron el cálculo y la subsiguiente operación hidráulica al suprimir la necesidad de considerar pérdidas por fricción, cambio de dirección, válvulas y demás en el estudio hidráulico de las conducciones.

El aspecto económico se consideró y respetó; el diseño de la planta de tratamiento de Finca San Carlos se planeó para que su construcción resultara rápida y de bajo costo, lo que se obtuvo al final al optar por tanques desmontables de fácil armado y cuyos requerimientos de mantenimiento son mínimos porque los materiales de los que están hechos, polietileno de alta densidad y malla electro-soldada galvanizada son durables y resistentes a los agentes naturales, además de que no representan un impacto negativo para el ambiente en el que se encuentran; no reaccionan con el agua residual ni son fuente de residuos tóxicos. Las conducciones, muchas de ellas enterradas, disminuyen el impacto visual al no estar expuestas, lo que también se resume en una disminución en el mantenimiento preventivo que pudiera requerir el sistema.

Diseñada para operar durante la época de cosecha, que resulta entre los meses de noviembre y febrero, las instalaciones de la planta de tratamiento y la forma en que están distribuidos los tanques, así como la forma en que están conectados permiten que sean empleados en otras épocas del año para el cultivo de peces comestibles o para el almacenamiento de agua, esto debido a que las sustancias presentes en el agua residual con las que éstos tanques están en contacto cuando son empleados para tratamiento no son tóxicas ni dejan residuos que pudieran resultar dañinos o peligrosos para otros usos a los que se puedan destinar. Lo anterior habla de un aspecto fundamental de sustentabilidad y de integración que



permite, en un futuro cercano, un mejor aprovechamiento de los recursos en aras de propiciar un impulso al desarrollo social y al cuidado del medio ambiente.

Como recomendaciones, quedan las siguientes:

- La planta opera en un rango establecido de concentración de agentes contaminantes, por lo que para su óptimo funcionamiento deberá tratar de cumplirse con esa condición.
- Realizar un estudio más cercano al tratamiento anaerobio de los lodos residuales del tratamiento y al agua de despulpado que actualmente se resuelve con biodigestores instalados para tal fin. Esto para buscar opciones de mejora y de aprovechamiento a los subproductos de este proceso, como el gas metano generado.
- Implementar el sistema de filtrado que se propone en este proyecto, para mejorar aún más la calidad del agua y asegurarse que en todo momento se cumpla con los límites permisibles de contaminantes establecidos por la norma oficial mexicana.
- Implementar el sistema de rejilla para la retención de los lodos sedimentados, esto para acelerar el proceso del tratamiento secundario al acortar los tiempos de vaciado del agua tratada.
- Realizar un estudio de los posibles aumentos en los caudales de aguas residuales en el eventual incremento de la producción de café en los años por venir, previendo la ampliación de la planta de tratamiento siguiendo el mismo esquema bajo el cual se ideó e instaló.
- Buscar nuevas opciones de agentes floculantes que mejoren y que hagan al proceso de tratamiento más eficiente.

## Bibliografía.

- ALPIZAR, J., M.: (1998). Descontaminación de las aguas residuales del beneficiado del café en Costa Rica. En Edgar L. Ibarra (Ed.) del libro *“Seminario Regional de Consulta sobre Situación Actual del Beneficiado de Café: Revisión y Avances Tecnológicos del Proceso” Memoria. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, Diciembre 1998.* (pp. 88-109) Tegucigalpa, Honduras: IICA-PROMCAFFE.
- ANACAFÉ (2014). *Remoción del Mucílago*. Página Web [en línea]. Consulta: 10 julio 2014. Disponible en: [http://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=BeneficiadoHumedo\\_Mucilago](http://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=BeneficiadoHumedo_Mucilago)
- ANFACAL (2015). Folletos sobre usos ecológicos de la cal. Publicación [En Línea]. [Consulta: 8 abril 2015]. Disponible en: [http://anfocal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Usos\\_Ecologicos/Tratamiento\\_de\\_Aguas/USOS\\_DE\\_CAL\\_EN\\_TRATAMIENTOS\\_DE\\_AGUA.pdf](http://anfocal.org/media/Biblioteca_Digital/Usos_Ecologicos/Tratamiento_de_Aguas/USOS_DE_CAL_EN_TRATAMIENTOS_DE_AGUA.pdf)
- ARCILA, F. (1979). Perjuicios causados por los residuos del beneficio del café. En Héctor F. Ospina (Ed.) del libro *Avances Técnicos de Cenicafé. Números: 1 al 113. Tomo 1.* (pp. 201-202). Chinchiná, Caldas, Colombia: Colorgráficas LTDA. Manizales
- BEBIN, J. (1986). La depuración biológica del agua. *Mundo Científico, Volumen 8 N° 78.* (pp. 276-283). Barcelona, España.
- BELLO, R. (2002). Cap 5.2 Impacto ambiental del beneficiado húmedo del café. En Jürgen Pohlan (Ed.) del libro. *México y la Cafeticultura Chiapaneca* (pp. 311-320). Aachen, Alemania: Shaker Verlag GmbH.
- BELLO M., R.; Calvo B., L.; Sánchez V., J. E.; Lau C., G. y Cuevas G., R. (1995). Diagnóstico de la contaminación en las aguas residuales de los beneficios húmedos de café en el Soconusco, Chiapas, México. En Edgar L. Ibarra (Ed.) del libro *Memorias XVI Simposio Latinoamericano de Caficultura. 25-*

29 Octubre, 1993; *Managua, Nicaragua. Vol 2.* Tegucigalpa, Honduras: Concafe-IICA-PROMECAFE.

CERVANTES, S. M. (1998). Nuevas tendencias de producción en beneficios cafetaleros. En Rodolfo Valadez (Ed.) del libro *El café de México, una producción de altura* (p. 13). México: Confederación Mexicana de Productores de Café.

CONAGUA (2011). Capítulo 2. Situación de los Recursos Hídricos. En *Estadísticas del Agua en México, Edición 2011* (pp. 18-40). (1ª Ed.) Ciudad de México, México: SEMARNAT.

CONAGUA (2011). Capítulo 4. Infraestructura Hidráulica. En *Estadísticas del Agua en México, Edición 2011* (pp. 76). (1ª Ed.) Ciudad de México, México: SEMARNAT.

CONAGUA (2013). *Manual de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Utilizados en Japón* (pp. 3). (Edición 2013). Ciudad de México, México: SEMARNAT.

CONAGUA (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. En *Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997* (pp. 7). Ciudad de México, México: SEMARNAT.

DE LA VEGA, M. Y. (2012). *Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. (1ª Ed.). Ciudad de México, México: SEDESOL.

ELÍAS, L. G. (1978). Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. En J.E. Braham y R. Bressani (Ed.) del libro *Pulpa de café: composición, tecnología y utilización* (pp 19-29). Bogotá, Colombia: CIID.

FAIR, GORDON, M., et al (2008). Cap 21-4. Coagulación química. *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales, Volumen 2. Purificación de aguas y*

*tratamiento y remoción de aguas residuales* (pp. 74). (4° Ed.). México: LIMUSA

FAIR, GORDON, M., et al (2008). Cap 26-19. Adsorción de colores y sabores. *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales, Volumen 2. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales* (pp. 212 - 215). (4° Ed.). México: LIMUSA

FAIR, GORDON, M., et al (2008). Cap. 32-19 Eutroficación del los lagos. *Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales, Volumen 2. Purificación de agua y remoción de aguas residuales* (pp. 475-476). (4° Ed.). México: LIMUSA

GARCÍA G., L. F. (2000). *Evaluación de la contaminación de un río por aguas residuales de beneficio húmedo de café*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapas.

LARDÉ, G. (1998). Situación tecnológica y ambiental del beneficiado del café en El Salvador. En Edgar L. Ibarra (Ed.) del libro "*Seminario Regional de Consulta sobre Situación Actual del Beneficiado de Café: Revisión y Avances Tecnológicos del Proceso*" Memoria. CICAFFE, Heredia, Costa Rica, Diciembre 1998. (pp. 24-66) Tegucigalpa, Honduras: IICA-PROMCAFFE.

LARDÉ, G. y Saravia, L. A. (1997). Infiltración y evaporación de agua del lavado del café en el beneficio El 77, Chalchuapa, El Salvador. En Jorge Echeverri y Luis Zamora (Ed.) del libro *Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura. Costa Rica. 1997*. (pp. 415-418) San José, Costa Rica: Editorama.

MARTELO, J. y Lara, J. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de las aguas residuales; una revisión del estado del arte. Publicación [En Línea]. Actualizada: 30 abril 2012. [Consulta: 10 marzo 2015]. Disponible en:

- METCALF & Eddy (2006). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento y reutilización. México: McGrawHill.
- MONTILLA P., J. (2006) *Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café*. Tesis de licenciatura. Universidad de Caldas (Colombia).
- PUERTA, 2012. *Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café, Avances Técnicos, Cenicafé* (p. 12). N° 402. Colombia: CENICAFÉ
- PUERTA, Q.G.I. y RODRÍGUEZ, V.N. (2001). *Buenas prácticas de manufactura, programa de saneamiento y Plan HACCP para el proceso del café en la finca*. Tesis de Especialización. Universidad de Caldas.
- RAINFOREST ALLIANCE (2012). *Manual de certificación de RainforestAlliance, Agricultura Sostenible. RA-Cert Febrero 2012*. Obtenido el 09 de febrero de 2015, de: [http://www.rainforest-alliance.org/sites/default/files/site-documents/agriculture/documents/ra-cert-sustainable\\_agriculture\\_certification\\_manual\\_es.pdf](http://www.rainforest-alliance.org/sites/default/files/site-documents/agriculture/documents/ra-cert-sustainable_agriculture_certification_manual_es.pdf)
- RAS (2010). *Norma para Agricultura Sostenible. Julio de 2010 (versión 3)*. Obtenido el 09 de febrero de 2015, de: [http://www.san.ag/biblioteca/docs/SAN-S-1-1.2S\\_Norma\\_para\\_Agricultura\\_Sostenible.pdf](http://www.san.ag/biblioteca/docs/SAN-S-1-1.2S_Norma_para_Agricultura_Sostenible.pdf)
- RODRIGUEZ, N. (2009). *Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas*. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Valencia.
- RAMOS OSORIO, S, 2010. Fuente: Sergio Ramos Osorio. 6° Encuentro de Playas Limpias, 2010. Ponencia. Normatividad y Tratamiento de Aguas Residuales. Ixtapa, Zihuatanejo, Guerrero, 2010.

- SUÁREZ, J. y Jácome, A. (2007). Eliminación de fósforo en los procesos de depuración de aguas residuales. Publicación [En Línea]. Actualizada: 30 abril 2012. [Consulta: 13 marzo 2015]. Disponible en: [ftp://ceres.udc.es/Master\\_en\\_Ingenieria\\_del\\_Agua/master%20antiguo\\_antes%20del%202012/Segundo\\_Curso/Tramientos\\_Avanzados\\_del\\_Agua/master\\_\\_\\_TEMA\\_N\\_\\_\\_ELIMINACION\\_D\\_E\\_FOSFORO.pdf](ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Segundo_Curso/Tramientos_Avanzados_del_Agua/master___TEMA_N___ELIMINACION_D_E_FOSFORO.pdf)
- WASSER, R. (1997). Reactor anaerobio para el tratamiento de las aguas residuales del beneficio, San Juanillo, Naranjo, Costa Rica. En Jorge Echeverri y Luis Zamora (Ed.) del libro *Memorias XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura. Costa Rica. 1997.* (pp. 429-431) San José, Costa Rica: Editorama.
- ZOKOLOV, M. (2002). Cap 5.3 Contaminación ambiental por las aguas residuales del procesamiento húmedo del café: prevención y tratamiento. En Jürgen Pohlen (Ed.) del libro *México y la Caficultura Chiapaneca* (pp. 321-328). Aachen, Alemania: Shaker Verlag GmbH.

## Anexos



**LABORATORIO AGROANALITICO TERRA**  
**17 CALLE ORIENTE # 13 A ENTRE 7a y 9a NORTE**  
**TAPACHULA CHIAPAS, MEXICO C.P 30700**  
**TEL: 9621425547**  
**CORREO: calfaroes72@hotmail.com**

28-03-2014

ALFREDO KLEIN  
CONOCIDO  
TAPACHULA CHIAPAS.

### ANALISIS QUIMICO DE AGUA

ELEMENTO	UNIDAD	RESULTADO	RANGOS OPTIMOS
N	mg/L	25.99	40 – 60
P-PO <sub>4</sub>	mg/L	2.67	20 – 30
D.Q.O	mg/L	5.00	SIN DATOS
D.B.O <sub>5</sub>	mg/L	1.00	150- 200

Fuente:

NOM-001-ECOL-1996, QUE ESTABLECE LOS LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.

NMX-AA-028-SCFI-2001 - DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES (DBO<sub>5</sub>) Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-028-1981)

NMX-AA-026-SCFI-2010.- MEDICION DE NITROGENO TOTAL KJELDAHL EN AGUAS NATURALES RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS-METODO DE PRUEBA(CANCELA A LA NMX-AA-026-SCFI-2001.

NMX-AA-029-SCFI-2001.- DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-AA-029-1981)

Atentamente

Q.F.B CARLOS ARTURO ALFARO ESTUDILLO



**LABORATORIO AGROANALITICO TERRA**  
**17 CALLE ORIENTE # 13 A ENTRE 7a y 9a NORTE**  
**TAPACHULA CHIAPAS, MEXICO C.P 30700**  
**TEL: 9621425547**  
**CORREO: callareos72@hotmail.com**

Nombre. DIRECCIÓN:	ALFREDO KLEIN CONOCIDO TAPACHULA CHIAPAS
ATENCIÓN:	

ANÁLISIS SOLICITADO:	MICROBIOLOGICO	ORDEN DE TRABAJO:	81 0314 AM
TIPO DE MUESTRA:	AGUA DE ABASTECIMIENTO	TIPO DE ENVASE:	ENVASE PET
LUGAR DE MUESTREO:	NO ESPECIFICA	CANTIDAD MUESTRA	500 mL
PUNTO DE MUESTREO:	NO ESPECIFICA	LACRE:	NO REQUIERE
RESPONSABLE MUESTREO:	NO ESPECIFICA	HORA DE MUESTREO:	NO ESPECIFICA
FECHA DE MUESTREO:	11-03-2014	HORA DE ENTRADA:	9:00 A.M
FECHA DE ENTRADA:	11-03-2014	FECHA DE SALIDA:	26-03-2014

DETERMINACIONES	RESULTADOS	LÍMITES PERMISIBLES DE LA NORMA APLICADA.	NORMA MEXICANA UTILIZADAS
ORGANISMOS COLIFORMES FECALES	2 UFC/100 ml	0 UFC 0 NMP /100 mL	NOM-127-SSA1-1994 NOM-201-SSA1-2002

**REFERENCIA**

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

ESTE INFORME DE PRUEBAS SOLO AFECTA LA MUESTRA SOMETIDA A PRUEBA.

ESPERANDO QUE LOS RESULTADOS LE SEAN DE UTILIDAD, QUEDAMOS DE USTED.

atentamente

\_\_\_\_\_  
 Q.F.B CARLOS ARTURO ALFARO ESTUDILLO