

**UNIVERSIDAD NACIONAL
JOSE FAUSTINO SANCHEZ CARRION**



FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

TESIS

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN LA COMUNIDAD CAMPESINA SAN JUAN DE
CHURIN – 2019**

PRESENTADO POR:

BACH. TIFANY NAYLEA TENA TRUJILLO

BACH. ANGGI ESTEFANY GARAY ANASTACIO

PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ASESOR:

ING. SANCHEZ GUZMAN JORGE ANTONIO

HUACHO-2019

DEDICATORIAS

El presente Proyecto de Tesis “Diseño De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales En La Comunidad Campesina San Juan De Churin – 2019” se la dedico principalmente a Dios, ya que me enseña a ser perseverante en todo lo que hago.

A mis padres a quienes va mi admiración y respeto:

Roberto Tena Jacinto
Sonia Luz Trujillo Cruz

A mi hermano querido,
Jair Tena Trujillo

A mi compañero de vida,
Jhon Sánchez Arroyo

A mi amado hijo,
Joaquín Sánchez Tena

Naylea Tena



Dedico esta tesis a Dios, a mi familia y amigos por el apoyo moral en todo momento, estos meses de incansable trabajo quizás no habrían rendido fruto si no fuera por ellos.

Anggi Garay



AGRADECIMIENTO

Agradecemos con aprecio infinito a:

Nuestros padres, por el apoyo incondicional que nos han brindado, tanto económica, personal, emocional y espiritualmente para hacer posible este trabajo de investigación.

Nuestros hermanos por convertirse en cómplices de nuestros sueños y anhelos, y aun del desarrollo de este proyecto.

Nuestros compañeros y amigos, protagonistas de cada uno de nuestros logros personales y por ser coadjutor de nuestro crecimiento profesional.

Nuestros profesores, por poner en nuestras manos las herramientas y recursos para crecer en lo personal, profesional e intelectualmente, y ser guía en cada una de nuestras aventuras en el mundo de saber.

A nuestra alma mater, la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, por acogernos en sus distintas aulas y permitirnos formar parte de ella.

Las autoras

INDICE

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO I..... | 10 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 10 |
| 1.1 Descripción de la realidad problemática..... | 10 |
| 1.2 Formulación del problema..... | 11 |
| 1.2.1 Problema general..... | 11 |
| 1.2.2 Problemas específicos..... | 11 |
| 1.3 Objetivos de la investigación..... | 11 |
| 1.3.1 Objetivos generales..... | 11 |
| 1.3.2 Objetivo específicos..... | 11 |
| 1.4 Justificación de la investigación..... | 12 |
| 1.5 Delimitaciones del estudio..... | 13 |
| CAPITULO II..... | 16 |
| MARCO TEORICO..... | 16 |
| 2.1 Antecedentes de la investigación..... | 16 |
| 2.1.1 Internacionales..... | 16 |
| 2.1.2 Nacionales..... | 19 |
| 2.2 Bases teóricas..... | 22 |
| 2.2.1 Diseño De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales..... | 22 |
| 2.2.1.1 Naturaleza de las aguas residuales..... | 22 |
| 2.2.1.2 Pretratamiento..... | 42 |
| 2.2.1.3 Tratamiento primario..... | 59 |
| 2.2.1.4 Fundamentos del tratamiento biológico..... | 74 |
| 2.2.1.5 Tratamiento secundario o biológico..... | 93 |
| 2.2.1.6 Tratamiento terciario y reúso de aguas residuales regeneradas..... | 121 |
| 2.3 Definiciones conceptuales..... | 135 |

| | |
|---|-----|
| CAPITULO III | 136 |
| METODOLOGÍA..... | 136 |
| 3.1 Estimación del caudal de diseño | 136 |
| 3.1.1. Caudal residual doméstico | 137 |
| 3.1.2. Agua residual doméstica | 144 |
| CAPITULO IV | 148 |
| RESULTADOS | 148 |
| 4.1 Resultados | 148 |
| 4.1.1 Análisis de Resultados | 148 |
| CAPITULO V..... | 151 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 151 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 151 |
| 5.2 RECOMENDACIONES..... | 151 |
| REFERENCIAS | 152 |
| Fuentes Bibliográficas | 152 |
| ANEXOS | 154 |



RESUMEN

El agua es un elemento natural indispensable para los seres vivos; en los últimos años nos vemos ante una escasez que se hace cada vez más notoria, y todo es debido a que hemos sobre explotado las fuentes de abastecimiento tanto subterráneas como superficiales, y ya no son suficientes para sustentar a la población; de ahí la importancia de reciclar el agua y someterla a un previo tratamiento específico para su reúso. El reusar el agua ya tratada disminuye las demandas de volúmenes de las poblaciones hacia las fuentes de abastecimiento antes mencionadas.

Recientemente se han desarrollado numerosos sistemas de tratamiento de aguas residuales, dependiendo del origen y características de estas. Existen sistemas para el tratamiento de aguas residuales tanto domésticas como industriales.

En esta tesis se plantea un diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales convencional, por tratarse de una pequeña comunidad la zona en la que se pretende emplear el tratamiento de aguas residuales.

Con este trabajo se espera lograr un aporte más a las alternativas para la mejora de la calidad de vida en la población.

PALABRAS CLAVES: Aguas residuales, Tratamiento de aguas residuales.

SUMMARY

Water is an indispensable natural element for living beings; In recent years, we have seen a shortage that is becoming more and more noticeable, and all this is due to the fact that we have over-exploited both subterranean and superficial sources of supply, and are no longer sufficient to sustain the population; hence the importance of recycling water and subjecting it to a specific prior treatment for reuse. Reusing treated water decreases the volume demands of the populations towards the aforementioned sources of supply.

Recently, numerous wastewater treatment systems have been developed, depending on the origin and characteristics of these. There are systems for the treatment of domestic and industrial wastewater.

In this thesis, a design of a conventional wastewater treatment plant is proposed, since it is a small community in the area where the wastewater treatment is intended.

With this work we hope to achieve a more contribution to the alternatives for improving the quality of life in the population.

KEYWORDS: Wastewater, Wastewater treatment.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

Actualmente en la comunidad campesina San Juan de Churín las aguas residuales son vertidas directamente al río Huaura, sin ningún tipo de tratamiento. El crecimiento poblacional en la comunidad campesina San Juan de Churín durante los últimos años ha ocasionado que se genere un mayor volumen de aguas negras. Las descargas de estas aguas residuales vienen deteriorando la flora y fauna del lugar, generando a su vez olores desagradables, sedimentos de lodos, impactos visuales negativos y proliferación de vectores contaminantes que atentan contra la salud pública de las en las zonas aledañas de este punto de descarga.

Además, estas aguas residuales mezcladas con las aguas del río son utilizadas en las zonas bajas para riego de alfalfa, maíz, manzana, durazno, y otros cultivos, y que posteriormente se comercializa en el mercado de la comunidad campesina. No se realiza ningún tipo de control de calidad de estos productos, por lo tanto, podrían provocar enfermedades en la población.

También en el mencionado río se realiza la pesca de truchas los cuales son consumidos por los pobladores.

Esto se convierte en una problemática también al no ser atendido por las autoridades y la población, desatando así, una serie de componentes que son peligrosos para la salud y el medio ambiente.

Para evitar la problemática mencionada se planteará el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para obtener el líquido vital que se usaría en actividades que no demanden el uso de agua potable, como sería el caso de riegos en cultivos de frutas, alfalfa, papa, entre otros productos que son consumidos por la población. Se pretende la conservación de los recursos naturales, minimizar la contaminación ambiental, y alcanzar un bienestar social.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general.

- ¿Cuál es el impacto del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín?

1.2.2 Problemas específicos.

- ¿Cómo es la naturaleza de las aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019?
- ¿Cómo es el pre-tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?
- ¿Cómo es el tratamiento primario de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?
- ¿Cuáles son los fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?
- ¿Cómo es el tratamiento secundario o biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?
- ¿Cómo es el tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivos generales

- Describir el impacto del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.

1.3.2 Objetivo específicos

- Describir cómo es la naturaleza de las aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.
- Describir cómo es el tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.
- Describir cómo es el tratamiento primario de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.

- Describir cuáles son los fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.
- Describir cómo es el tratamiento secundario ó biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.
- Describir cómo es el tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas en la comunidad campesina San Juan de Churín – 2019.

1.4 Justificación de la investigación

Justificación por su conveniencia

Las poblaciones actuales, para mejorar su calidad de vida y conservar el medio ambiente deben tener como prioridad la creación de plantas de tratamiento de aguas residuales, no solamente como un aspecto estructural, sino como una conciencia transparente del impacto que causa el vertimiento de aguas servidas a los ríos, y por tanto al medio ambiente, a los recursos y a la sociedad en general.

Justificación practica

La responsabilidad social sobre el medio ambiente es un aspecto que hoy en día influye mucho en el desarrollo social por lo que el diseño para una posterior creación de una planta de tratamiento de aguas residuales sería un bien para el medio ambiente por ende a la población.

Justificación teórica.

Los avances sobre el tema de plantas de tratamiento de aguas residuales proponen como meta la reutilización de agua en usos que no demanden agua potable tales como riego de cultivos, riego de jardines, y también sería un gran avance y desarrollo social. Frente a la complejidad de los retos que la globalidad impone sobre la creación de plantas de tratamiento de aguas residuales corresponde la responsabilidad de la sociedad en la comprensión de sus necesidades, problemas y desafíos presentes y futuros para afrontarlos de manera eficaz;

Justificación Metodológica.

Mediante la realización de la presente investigación acerca del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, se busca depurar las aguas servidas que son vertidas en el río, para luego ser usados en el riego de cultivos

1.5 Delimitaciones del estudio

Justificación por su conveniencia

Las poblaciones actuales, para mejorar su calidad de vida y conservar el medio ambiente deben tener como prioridad la creación de plantas de tratamiento de aguas residuales, no solamente como un aspecto estructural, sino como una conciencia transparente del impacto que causa el vertimiento de aguas servidas a los ríos, y por tanto al medio ambiente, a los recursos y a la sociedad en general.

Justificación practica

La responsabilidad social sobre el medio ambiente es un aspecto que hoy en día influye mucho en el desarrollo social por lo que el diseño para una posterior creación de una planta de tratamiento de aguas residuales sería un bien para el medio ambiente por ende a la población.

Justificación teórica.

Los avances sobre el tema de plantas de tratamiento de aguas residuales proponen como meta la reutilización de agua en usos que no demanden agua potable tales como riego de cultivos, riego de jardines, y también sería un gran avance y desarrollo social. Frente a la complejidad de los retos que la globalidad impone sobre la creación de plantas de tratamiento de aguas residuales corresponde la responsabilidad de la sociedad en la comprensión de sus necesidades, problemas y desafíos presentes y futuros para afrontarlos de manera eficaz;

Justificación Metodológica.

Mediante la realización de la presente investigación acerca del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, se busca depurar las aguas servidas que son vertidas en el río, para luego ser usados en el riego de cultivos.

A. Ubicación Geográfica del lugar a estudiar:

Se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas 76° 52' 25.31" de longitud Oeste y los 10° 48' 35.66" de latitud sur y a una altitud de 2258 m.s.n.m.

Datos de ubigeo:

- Distrito : PACHANGARA
- Provincia : OYON
- Departamento : LIMA
- Población Censada (2007) : 1889 hab.



B. Vías de acceso

La accesibilidad a la zona es mediante transporte interprovincial e Interdistrital que recorren desde la Ciudad de Lima a la Zona Norte del País.

Se tiene que ir por la Panamericana Norte hasta el kilómetro 103, luego se debe tomar el desvío hacia el este en dirección a Sayán. Se continua por unos 45 km de carretera asfaltada. Finalmente, de Sayán se recorre 59 kilómetros de carretera asfaltada. En total es un trayecto de 207 km partiendo desde Lima.

C. Clima

El clima en Churín se conoce como un clima de estepa local. Hay pocas precipitaciones durante todo el año. La clasificación del clima de Köppen-Geiger es BSk. La temperatura media anual en Churín se encuentra a 14.5 °C. La precipitación es de 296 mm al año.

D. Hidrografía

Con respecto a la hidrografía de la provincia de Oyón, abarca la parte alta de la cuenca hidrográfica del río Huaura, el cual pertenece a la vertiente del pacífico y que tiene sus inicios en la laguna de Surasaca, estando formado en su inicio por los ríos Surasaca y Quichas. Su curso es alimentado con las lluvias y con los deshielos de los nevados, presentando varias lagunas.

El río Huaura tiene dos claros y definidos formadores que aportan casi igual cantidad de caudal. El río Churín y el río Checras. El río Churín proviene de los glaciares de Raura (La laguna turquesa de Huascacocha (4,600 m.s.n.m.) en la provincia de Oyón) y el río Checras de los nevados de Janquil. El principal afluente del río Churín es el río Oyón, que nace en la laguna de Patón y un grupo de lagunillas como Jatuncocha, Luychucocha, Yuracocha, que se ubican al pie del nevado Jancacoto.

Oyón posee las siguientes lagunas: Las de Cochaquillo, que tienen una capacidad de almacenamiento de 28 millones de m³ de agua, la de Surasaca, 17 millones de m³, la de Mancacocha, 600 mil m³ y la de Goyllarcocha, 500 mil m³.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Internacionales.

Arredondo , (2013). En su tesis titulado “Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la zona de Amanalco de Becerra, Estado de Mexico”, realizado en la Universidad Nacional Autonoma de Mexico para obtener en titulo profesional de Ingeniero Civil.

En este proyecto se realizo una propuesta de planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Amanalco, Estado de Mexico, con el objetivo de limpiar el rio y enviar mejor agua a la presa de Valle de Bravo. Por esta razon debemos aprovechar el agua que usamos y reutilizarla.

Se propone, dado a las circunstancias conectar las casas al sistema de alcantarillado, ya que a pesar de que existe un alcantarillado y las conexiones domesticas, no estan conectadas. En caso que esto ocurriera se deberia hacer un muestreo directamente de la recarga y generar nuevamente los calculos, dado que las dimensiones en los contactores biologicos rotativos cambiarian considerablemente. Por esta razon se debe considerar esta propuesta antes de la elaboracion de este proyecto.

El sistema de contactores rotativos es un sistema poco implementado en Mexico, pues solo existen 4 plantas de tratamiento de aguas residuales con este metodo y se tiene poca informacion sobre esto.

Es un sistema muy completo y con poca demanda de atencion, pues los mantenimientos son simples y poco costosos respecto a otros como lodos activados. La desventaja de este sistema que la inversion es muy alta para la compra de contactores, pero por la parte constructiva es muy poco. La instalacion de los contactores es sencilla y poco costosa.

Una gran ventaja que se tiene en estos equipos en su instalacion es el espacio, ya que a pesar de que se requieren varios contactores el espacio de puede aprovechar sin causar molestias en la poblacion, ademas que los olores producidos por la planta no son tan molestos como en otros sistemas de tratamiento, pues se mantiene cerrado para prolongar la vida de la c de microorganismos.

Gordillo, (2011). En su proyecto de tesis denominado “.Diseño de los sistemas de alcantarillado sanitario, pluvial y tratamiento de aguas servidas del barrio el Paraiso del Distrito Metropolitano de Quito” realizado en la Universidad Catolica Del Ecuador para la obtencion de titulo profesional de Ingeniero Civil, nos dice que en su pais, la falta de infraestructura en los servicios basicos como el manejo de excretas y la dotacion de agua potable para ciertos sectores rurales les produce un retraso en el desarrollo social e impide que el Ecuador salga del subdesarrollo.

La falta de sistemas hidraulicos que se encarguen de una rapida y seguro recoleccion, transporte, tratamiento y disposicion final de las aguas residuales es uno de los objetivos para dotar de infraestructura a la comunidad y de esa manera evitar enfermedades y contaminar el medio ambiente. se a observado que a lo largo del tiempo a aumentado en volumen de excretas y a disminuido porcentualmente la cobertura de servicios basicos apropiados debido al aumento de la población.

En los paises en desarrollo, son varias las explicaciones por falta de atencion con sistemas adecuados de alcantarillado sanitario. En este caso, el elevado costo para su construccion, operaci3n, mantenimiento y la falta de recursos para el sector saneamiento basico dificultan su inmediata solucion.

Una de las poblaciones del canton Quito es el barrio “El Paraiso” de la parroquia pacto carece de alcantarillado la cual hace dificil el desarrollo integral de su poblacion.

Es por esto que este trabajo esta para atender la demanda de servicios de saneamiento y salud publica con el dise1o del alcantarillado sanitario, pluvial y de la planta de tratamiento de aguas del barrio ya mencionado, por viabilidad tecnica y economica de soluciones que reduzcan los costos pero que mantengan su eficacia, con el fin de mejorar la calidad de vida de los pobladores. Para efecto y como sera demostrado en el presente trabajo, es necesario aplicar tecnicas modernas de dise1o y garantizar la sostenibilidad de los sistemas.

Domínguez, (2015). Es su tesis titulada “ Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas para poblaciones entre 20 y 25 mil habitantes” que se realizó en la Universidad Carlos III de Madrid para obtener el grado en Ingeniera en Tecnologías Industriales, en su proyecto define el diseño de una estación depuradora de aguas servidas de una sola etapa. Se inicia de una población cualquiera de mediano tamaño en España, y se toman datos de contaminación estandar. De esas condiciones iniciales de expone un sistema de lodos activados con oxidación prolongada que prescinde de la decantación primaria y la digestión de lodos.

Las instalaciones incluidas en esta tesis son aquellos que nos van a permitir un tratamiento de las aguas servidas urbanas, con el fin de llegar a un tratamiento completo de todos los vertidos producidos, de manera que se llegue al grado de depuración necesaria, hasta cumplir los límites que fija la Directiva 91/271/CEE, sobre tratamientos de aguas residuales urbanas.

Al principio se expone la configuración típica de una EDAR, y se propone, dado el tamaño de la planta, eliminar el tratamiento primario y la digestión de lodos.

Se toman unos datos de partida a partir de un estudio de estaciones depuradoras de similar tamaño en España. Se establecen las características finales del agua depurada, de acuerdo a la Directiva 91/271/CEE, y se establecen las características del lodo.

Luego se plantean varias configuraciones tradicionales de EDARs posibles, con las que se va a comparar la solución propuesta. Estas alternativas tradicionales tienen gran parte del proceso en común y solo se van a diferenciar en el tratamiento secundario y el tipo de digestión de lodos. Luego se explica la solución propuesta, sus características y funcionamiento.

Finalmente para comprobar la eficacia de la planta, se realiza ingeniería básica, que cuenta con el diagrama de procesos de la planta; como ingeniería de detalle de los equipos principales. El diseño y dimensionamiento de la estación está adecuada a la norma ATV- Estandar A131.

2.1.2 Nacionales.

Torre, (2018). En su tesis “Diseño y Análisis Ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz”. Su estudio lo realizó en la universidad Pontificia Universidad Católica del Perú, para obtener el título profesional de Ingeniero Civil. Se planteó el diseño y análisis ambiental de una planta de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Huaraz, como primera medida para mejorar los estándares de calidad del río Santa; y por ende los estándares de calidad de vida de la población que utiliza sus aguas. Asimismo, la planta permite aprovechar los recursos procedentes del tratamiento de las aguas residuales; tales como fertilizantes, biogas, entre otros.

Para llevar a cabo su estudio, se combinaron herramientas de diseño y gestión ambiental. Por un lado, para su diseño usó el software BioWin 5 en la versión estudiante, en el cual se puede modelar diferentes trenes de tratamiento y estimar la calidad del agua para cada uno. También es factible estimar la cantidad de recursos que se derivan del tratamiento de aguas residuales. Para el análisis ambiental siguió el lineamiento del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para el cual usó el software Simapro. La metodología que se propuso le permitió analizar y comparar, de manera rigurosa los impactos que se generaron por la implementación de la PTAR y por la ausencia de la misma.

Los resultados de dicho diseño indicaron que se cumplió satisfactoriamente con lo estipulado por la normativa peruana para la calidad de los efluentes de una PTAR (MINAM, 2010), y parcialmente lo estipulado por las normativas europeas (EC, 1998; ECC, 1991). Esto debido a la limitación de BioWin versión estudiante para el modelamiento de la recirculación del licor mezclado y permeado, lo cual derivó en la insuficiente eliminación de nutrientes, N y P. Los resultados del análisis ambiental indicaron que se reducen los niveles de eutrofización a más de 50% a lo largo de todo el año; y que estos prácticamente permanecen constantes durante el mismo.

La implementación de esta planta de tratamiento es una primera medida para mitigar los impactos ambientales producidos por el vertimiento sin control de aguas negras al río. Esperando que en un futuro se implementen plantas complementarias para atender las necesidades de la Provincia de Huaraz. Asimismo, que se tomen medidas para descontaminar el río Santa, el cual presenta una concentración de metales pesados como consecuencia de los pasivos mineros.

Paz & Ruiz, (2017). En su tesis titulada “Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales para el distrito de Santiago de Chuco”, que se realizo en la Universidad Nacional de Trujillo para obtener el titulo profesional de Ingeniero Ambiental.

Realizaron el diseño de una planta de tratamiento de las aguas residuales municipales del Distrito de Santiago de Chuco, usando el metodo de diseño según en RNE, D.S. N° 011-2006-VIVIENDA, norma OS.090 Plantas de tratamiento de aguas residuales y el reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamiento basico, RAS-2000.

Iniciaron con la recoleccion de informacion bibliografica necesaria, proyeccion de poblacion, entre otros. Seguidamente se realizo la medicion de caudales para determinar los protocolos de muestreo, luego se hixo la caracterizacion de aguas residuales cuyos resultados son referenciales.

De acuerdo a los estudios realizados, se determino el tipo de tratamiento, que es por lodos activados; luego, en los libros de excel se procedio a dimencionar cada una de las unidades fisicas como son: canal de llegada, desarenador y rejillas como pretratamiento, sedimentador primario como tratamiento primario; y el sistema de lodos activos y lecho de secado como tratamientos secundarios; tambien fueron dibujados en el programa AutoCad. Se sugirio tambien la ubicación del proyecto en base al reglamento tecnico del sector de agua potable y saneamiento basico. La eficiencia de depuracion de la planta de tratamiento diseñada les permite remover alrededor de 88% de solidos sedimentables, 90% de solidos suspendidos, 91% de acietes y grasas, 93% de DBO₅, Y 94% de DQO, cumpliendo de esta manera con los estandares de calidad dispuestos por la normativa ambiental peruana.

Se recomienda realizar mas estudios e investigaciones para adecuar los modelos de diseño a las condiciones del lugar y analizar los comportamientos con otros factores que puedan variar las eficiencias, como la vegetacion , tipos de suelos, entre otros. Tambien es muy importante que exista una buena fase de operación y mantenimiento para que no se presenten algun tipo de inconvenientes, se bedo hacer varios estudios tecnicos y economicos para la instalacion de los equipos complementarios para este sistema., ademas se debe hacer un analisis para el reuso de los residuos obtenidos.

Dueñas, (2015). En su tesis “ Evaluacion y propuestas de mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales en el centro poblado de Quiquijana, Distrito de Quiquijana, Provincia de Quispicanchis, Region Cusco” que se realizo en la Universidad Catolica de Santa Maria para obtener el titulo profesional de Ingeniero Civil.

Nos dice que el centro poblado de Quiquijana cuenta con un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilizacion, la cual tiene 10 años y aun esta en funcionamiento, esta resulta ideal para realizar un estudio de evaluacion de su funcionamiento y eficiencia, ya que existen dudas sobre su funcionamiento en zonas de altura como Quiquijana.

El principal objetivo de esta tesis es evaluar la eficiencia y el funcionamiento de la actual planta de tratamiento de aguas residuales y plantear una mejor alternativa para su mejoramiento tecnica, economica y ambientalmente, de manera que se cumpla con los limites maximos permisibles establecidos según las normas. Las lagunas de estabilizacion, resultan un buen sistema de tratamiento de aguas residuales para pequeñas poblaciones como Quiquijana, por su simplicidad, un tratamiento completo a las aguas residuales y por la facil remocion y dispocision de lodos que se hace en seco, sin estar en contacto directo con el lodo humedo.

La PTAR actual cuenta solamente con una laguna lo cual esta en contraposicion con la norma del RNE OS-090, que regula el diseño de este tipo de estructuras, que indican como minimo dos unidades en paralelo para que nos permina una adecuada operación y mantenimiento, principalmente en la remocion de lodos.

Por ende se recomienda la construccion de dos lagunas facultativas seguida de una de maduracion, que nos permitira lograr una mejor cantidad del efluente, que inclusive superaria a los parametros establecidos en el DS 003-2010-MINAN, y que pueden aprovecharse para el riego de vegetales ya que se removera el 100% de huevos de helmintos, 3 a 4 ciclos logaritmicos de coliformes termotolerantes, y se lograra una concentracion promedio de $DBO_5 \leq 50 \text{mg/l}$ y solidos suspendidos $SS \leq 75 \text{mg/l}$.

2.2 Bases teóricas.

2.2.1 Diseño De Una Planta De Tratamiento De Aguas Residuales

Según Lozano, (2012) en su libro titulado “Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales nos dice que:

Debido al crecimiento de las industrias, crecimiento poblacional, así como la llegada de nuevas tecnologías, sustancias químicas, ha aumentado considerablemente el aporte y el nivel contaminante de los vertidos líquidos, de los cuales la mayoría sin algún tipo de tratamiento al ecosistema acuático. Por esta razón, tiene el objetivo de dar a conocer de manera práctica y sencilla los criterios fundamentales que nos permitan un adecuado dimensionamiento de los sistemas que más se usan para la depuración de aguas residuales en el ámbito rural, urbano e industrial. (p. 19-20)

2.2.1.1 Naturaleza de las aguas residuales.

“Lozano, (2012) nos menciona que en este capítulo nos presentará los datos de partida más importantes para establecer, estructurar y definir el planteamiento de un plan de depuración, que podamos aplicar a las descargas líquidas de urbanizaciones e industrias. (p.25)

2.2.1.1.1 Origen y características de las aguas residuales

Actualmente, la humanidad en todos los niveles viene mostrando una creciente preocupación por la conservación del entorno. Algunos mercados europeos han bloqueado su dinámica transnacional a muchas industrias contaminadoras, obligándolos a adoptar estrategias o políticas de producción más limpia (PML), buenas prácticas de manufactura (BPM) y mejores tecnologías disponibles (BTA, por sus siglas en inglés), entre otras medidas enmarcadas en Planes de Mejoramiento Continuo y de Responsabilidad Socioambiental Empresarial.

A. Contaminación hídrica

Desafortunadamente, las aguas residuales al igual que los residuos sólidos son un producto inevitable de la actividad humana. Antiguamente, diferentes civilizaciones usaron la capacidad de autodepuración de las

aguas. Sin embargo, la densificación actual de las ciudades y el crecimiento poblacional e industrial, entre otros aspectos, ha ocasionado que esta capacidad limitada de auto purificación del agua haya sido excedida. Por esta razón, se hace necesario asistir a la naturaleza mediante la instalación de plantas de tratamiento de las aguas residuales.

Se considera como contaminación hídrica, la presencia de formas de energía, elementos compuestos (orgánicos o inorgánicos) que disueltos, dispersos o suspendidos tienen una concentración tal que limita cualquier tipo de uso ya sea para consumo humano, uso agrícola, pecuario, industrial, recreativo, etc.

B. Origen de las aguas residuales

Las aguas residuales tienen diversos orígenes que determinan sus diferentes características, las cuales pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Agua Residual Doméstica (ARD): vienen a ser los residuos de viviendas, zonas residenciales, establecimientos comerciales o institucionales. Además, estas se subdividen en:
 - Aguas negras: son las aguas que transportan heces y orina, provenientes del inodoro.
 - Aguas grises: son las aguas jabonosas que también pueden contener grasas, provenientes de las duchas, tinas, lavaplatos, lavamanos, lavadora y lavadero.
- Agua Residual Municipal o Urbana (ARU): son los residuos líquidos de un conglomerado urbano; esta incluye actividades domésticas e industriales y son transportadas por una red de alcantarillado.
- Agua Residual Industrial (ARI): son los residuos líquidos provenientes de procesos productivos industriales, que incluso pueden tener origen agrícola o pecuario.

C. Características fisicoquímicas de las aguas residuales

Una completa caracterización de las aguas residuales que pretenden ser tratadas, es primordial para asegurar la eficacia de la depuración. El fracaso de la mayor parte de depuradoras se debe a una mala caracterización de las aguas, ya que impide seleccionar correctamente los tratamientos y aplicar criterios adecuados para su diseño.

- **Materia orgánica:** es la fracción más relevante de los elementos contaminantes es las aguas residuales domésticas y municipales debido a que es la causante de agotamiento de oxígeno de los cuerpos de agua. Está formada principalmente por CHONS (Carbono, Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre) constituyendo las proteínas (restos de origen vegetal y animal), los carbohidratos (restos de origen vegetal), los aceites y grasas (residuos de cocina e industrial) y los surfactantes (detergentes).

Tabla 1: tipo de materia orgánica. Lozano, (2012)

| Tipo de materia orgánica | Tipo de descomposición | |
|--------------------------|---|--|
| | Aeróbica | Anaeróbica |
| Nitrogenada | Nitratos(NO_3^-) anhídrido carbónico (CO_2), agua (H_2O), sulfatos (SO_4^{2-}) | Mercaptanos, escatol, ácido sulfhídrico (H_2S), cadaverina y putrescina |
| Carbonácea | Anhídrido carbónico (CO_2), agua (H_2O) | Anhídrido carbónico (CO_2), gas metano (CH_4), gas hidrogeno (H_2), ácidos, alcoholes y otros |

- **Oxígeno disuelto:** Es un parámetro fundamental en los ecosistemas acuáticos y su valor debería estar por encima de los 4mg/L para asegurar la supervivencia de la mayor parte de los organismos superiores. Se usa como indicador de la contaminación o de la salud de los cuerpos hídricos. Para el correcto funcionamiento de los tratamientos aerobios

de las aguas residuales, es necesario asegurar una concentración mínima de 1mg/L.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** esta es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, determinada por el consumo de oxígeno que hacen los microorganismos para degradar los compuestos biodegradables. Se evalúa analíticamente incubando una muestra con microorganismos por 5 días a 20 °C, después de un tiempo se lee la concentración final de oxígeno y se compara con la inicial; esta prueba es conocida como DBO₅ o DBO estándar. También se hacen, eventualmente, pruebas a 7 días (DBO₇) y a 20 días (DBO última – DBO_u o total – DBO_t). para las aguas residuales domésticas, se estima que:

$$DBO_5 \approx 0.75 DBO_u$$

Una curva característica de la DBO evidencia que a los 5 días se ha degradado cerca del 70% de la materia orgánica y que a partir del día 10 está curva se hace asíntota, como se muestra en la siguiente ilustración.

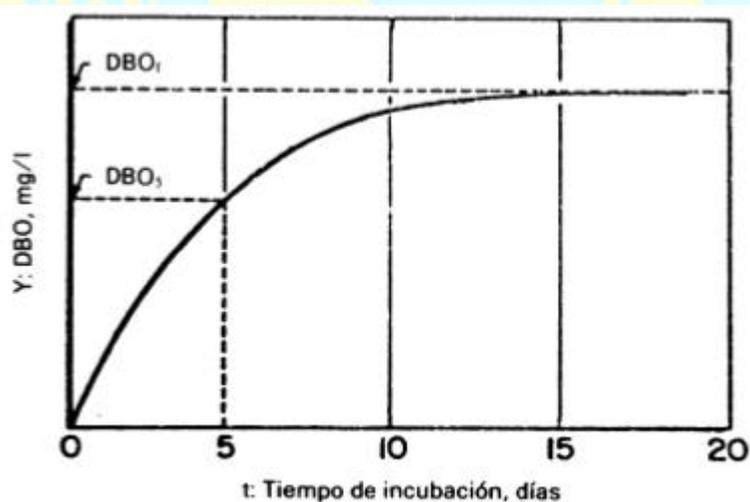


Ilustración 1: Curva característica de la DBO. Ramalho, (1996).

- **Demanda química de oxígeno (DQO):** también es una medida indirecta de la cantidad de materia orgánica contenida en una muestra. A diferencia de la DBO, para esta prueba se usa un oxidante más fuerte (dicromato de potasio – K₂Cr₂O₇) en un medio ácido (ácido sulfúrico –

H₂SO₄) en lugar de microorganismos. En el control de la depuradora se prefiere el DQO sobre la DBO ya que se obtiene en 3 horas y con un error mucho menor que la DBO que se obtiene en 5 días.

Para estimar la biodegradabilidad de un vertido se usa la relación entre la DQO y la DBO:

$DQO/DBO \geq 5$ (No biodegradable)

$DQO/DBO \leq 1.7$ (Muy biodegradable)

- **Sólidos:** a menudo la materia orgánica se presenta en sólidos. Estos sólidos pueden ser suspendidos (SS), disueltos (SD), volátiles (SV), orgánicos o fijos (SF) que suele ser inorgánico. Parte de los sólidos suspendidos pueden ser sedimentables (SSed).



Ilustración 2: Clasificación de los sólidos en las aguas. Collazos, (2008)

- **Potencial de hidrógeno (pH):** es relevante en el control de los procesos biológicos del tratamiento de las aguas residuales (TAR). La mayoría de los microorganismos responsables de la depuración de las aguas residuales se desarrollan en un rango de pH óptimo entre 6,5 y 8,5 unidades.

- **Nitrógeno:** es el componente principal de las proteínas y es un nutriente esencial para las algas y bacterias que intervienen en la depuración del agua residual. Puede presentarse en forma de nitrógeno orgánico (presente en las proteínas), nitrógeno amoniacal² (producto de la descomposición del nitrógeno orgánico)³ y formas oxidadas como nitritos y nitratos. Valores excesivamente altos de nitrógeno amoniacal (>1500 mg/L) se consideran inhibitorios para los microorganismos responsables del TAR.
- **Fósforo:** es, junto con el nitrógeno, un nutriente esencial para el crecimiento de los microorganismos. No obstante, valores elevados pueden causar problemas de hipereutrofización en los cuerpos de agua lóticos (e.g. lagos, embalses, lagunas).

D. Características microbiológicas de las aguas residuales

El vertido de aguas residuales aporta una gran cantidad de materia orgánica que sirve para alimentar hongos y bacterias encargados de la mayor parte de su descomposición.

- **Bacterias:** son los principales encargados de la degradación y estabilización de la materia orgánica que se encuentra en las aguas residuales. Su crecimiento óptimo ocurre a un pH entre 6,5 y 7,5.
- **Hongos:** se encuentran mayormente en aguas residuales de origen industrial, debido a que soportan bien valores de pH bajos y escasez de nutrientes.
- **Protozoos:** particularmente los ciliados, se alimentan de bacterias y materia orgánica, ayudando a la mejora de la calidad microbiológica de los efluentes de las PTAR.
- **Actinomicetos:** son bacterias filamentosas conocidas por causar problemas en reactores de lodos activados, ocasionando la aparición de espumas y pérdida de sedimentabilidad del lodo, hinchamiento, aumentando los sólidos del efluente y la disminución de la eficacia del TAR. Uno de los actinomicetos más frecuente en los reactores es la Nocardia.

2.2.1.1.2 Carga contaminante y habitantes equivalentes

No es posible determinar con precisión los valores “estándar” para las aguas residuales según su origen, sea doméstico, urbano o industrial. Los hábitos alimenticios, la calidad de vida o la pobreza, hace que varíe las características físicoquímicas y microbiológicas de los efluentes domésticos. En las ciudades, los vertidos de las actividades económicas e industriales hacen variar los parámetros; incluso, dos industrias de igual naturaleza que manejen un proceso productivo similar, pueden generar aguas servidas de características diferentes.

A. Carga contaminante

Aunque la concentración de un parámetro específico nos dice mucho de las características contaminantes de un vertido, en el diseño de las unidades de tratamiento de las aguas residuales y aún en los procesos de control de la contaminación hídrica (aunque todavía no se use como criterio sancionatorio) es mucho más significativo el concepto de carga contaminante, la cual involucra también la valoración del caudal vertido.

Por ejemplo, la empresa “Flor” puede tener un vertido con una concentración de DQO aparentemente baja (e.g. 20 mg/L) pero descarga un caudal excesivamente alto (e.g. 400 L/s) en el río. De otro lado, la industria “Alicia” puede descargar un caudal muy pequeño (e.g. 0,1 L/s) pero con unos niveles de concentración de DQO, significativamente altos (e.g. 80000 mg/L) al río. ¿qué empresa contamina más?

Si juzgamos estos vertidos según la concentración de DQO, podríamos sostener que la empresa “Alicia”, con 80000 mg/L de DQO es mucho más contaminante que “Flor” que vierte sólo 20 mg/L. Nada más falso. La contaminación de un vertido o la cantidad de materia orgánica aportada por un vertido, no sólo es función de su concentración medida en DQO (u otro parámetro análogo) sino también de su caudal, debido a que la inclusión de esta última variable, permite valorar dicho aporte en el tiempo.

Entonces, la carga contaminante es la concentración (del parámetro medido en la descarga) por el caudal vertido. Se expresa frecuentemente en kg/d y debe entenderse como una masa de contaminantes aportada en una unidad de tiempo.

$$\text{Carga Contaminante} = \text{Concentración} * \text{Caudal} * 0,0864$$

Donde,

Carga contaminante (en kg/d)

Concentración (en mg/L)

Caudal (en L/s)

El valor 0,0864 es un factor de conversión para pasar de mg/s a kg/d, que se explica a continuación:

$$1 \frac{mg}{s} \cdot \frac{86400 s}{1d} \cdot \frac{1kg}{1000000mg} = \frac{86400}{1000000} = 0.0864 \frac{kg}{d}$$

Si retomamos el ejemplo de las industrias “Flor” y “Alicia”, tenemos que:

| Nombre de la industria | Concentración de DQO (mg/L) | Caudal vertido (L/s) | Carga contaminante (kg/d) |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| Flor | 20 | 400 | 20*400*0,0864 = 691,2 kg/d (DQO) |
| Alicia | 80000 | 0.1 | 80000*0,1*0,0864 = 691,2 kg/d (DQO) |

Como se puede ver, ambas industrias aportan la misma cantidad de contaminación al río.

Los parámetros más usados para estimar la carga contaminante a nivel mundial son: DBO5, DQO, SST (Sólidos Suspendidos Totales), N (Nitrógeno) y P (Fósforo). No obstante, de ser conveniente para un estudio específico, pueden emplearse otros parámetros distintos. En Colombia, los parámetros más usados son DBO5 y SST.

B. Habitantes equivalentes

De la misma forma, considerando que no existen dos industrias iguales y con el fin de ponderar la carga contaminante de un vertido industrial tomando como referente del aporte del mismo contaminante a nivel doméstico, se ha adoptado el concepto de habitantes-equivalentes (h-eq).

Una vez se tenga estimada la carga contaminante del vertido industrial, el número de habitantes equivalentes se determina dividiendo la carga, por el aporte que hace un habitante, es decir, una persona, por día, para el mismo parámetro.

$$\text{Habitantes equivalentes (h-eq)} = \text{Carga contaminante} / \text{Carga por persona}$$

A continuación, tenemos los valores de los límites máximos permisibles según decreto supremo N. 003-2010-MINAM

| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
|--|------------|-----------|
| ACEITES Y GRASAS | mg/L | 20 |
| COLIFORMES TERMOTOLERANTES | NMP/100 mL | 10.000 |
| DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO EN 5 DÍAS (DBO5) | mg/L | 1001) |
| DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) | mg/L | 2001) |
| PH | | 6,5 – 8,5 |
| SÓLIDOS TOTALES EN SUSPENSIÓN | mL/L2) | 150 |
| TEMPERATURA | °C | < 35 |

Tabla 2: Tabla LMP de efluentes para su vertimiento a un cuerpo de agua Sunass & Cooperracion Alemana, (2015)

2.2.1.1.3 Esquema de depuración

La depuración de las aguas residuales, a cualquier escala, tiene como objetivo principal la protección de la salud pública y la conservación de la calidad hidrobiológica de los ecosistemas acuáticos.

El diseño de una depuradora dependerá, inicialmente, del origen de agua a tratar, de las características fisicoquímicas del efluente y del cumplimiento de la legislación vigente.

A. ¿Qué es una depuradora?

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) o Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), es un conjunto de procesos y operaciones dirigidas a la depuración de las aguas residuales antes de su vertido al cuerpo receptor, mitigando el daño al medio acuático

De esta manera, la depuración de las aguas residuales busca eliminar o disminuir la concentración de sustancias o elementos contaminantes que afectan la calidad del agua o fuente receptora para un uso específico.

B. Operaciones y procesos unitarios de una depuradora

Debemos recordar que la diferencia entre operaciones unitarias y procesos unitarios radica en que las primeras (operaciones unitarias) hacen referencia a unidades y procedimientos en donde prevalecen mecanismos de tipo físico en las que no se presentan cambios a nivel químico (e.g. una rejilla de retención de sólidos, un desarenador) mientras que los procesos unitarios involucran reacciones químicas o bioquímicas y cambios a nivel molecular (e.g. una unidad de coagulación y floculación, un reactor biológico, una torre de adsorción, una cámara de desinfección).

De esta manera, los contaminantes de las aguas residuales pueden ser eliminados o reducidos mediante la aplicación de uno o más fenómenos de tipo:

- Físico (operaciones unitarias de separación física)
- Químico (procesos unitarios de transformación química)
- Biológico (procesos unitarios de transformación bioquímica)

En los procesos unitarios de transformación bioquímica o reactores biológicos, la degradación, reducción o eliminación de contaminantes se consigue por la intervención de microorganismos que aprovechan la materia orgánica soluble e insoluble para alimentarse, generar nuevos compuestos, gases y energía, así como también para multiplicarse, generando nuevas células (síntesis celular).

Estos procesos biológicos pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Procesos Aerobios
 - En presencia del oxígeno libre generado por algas o alimentado por dispositivos mecánicos.
- Procesos Anaerobios
 - En ausencia de oxígeno libre

Estos procesos y operaciones unitarias intervienen en diferentes etapas de la depuración de las aguas residuales. El esquema de depuración se representa en la Ilustración:

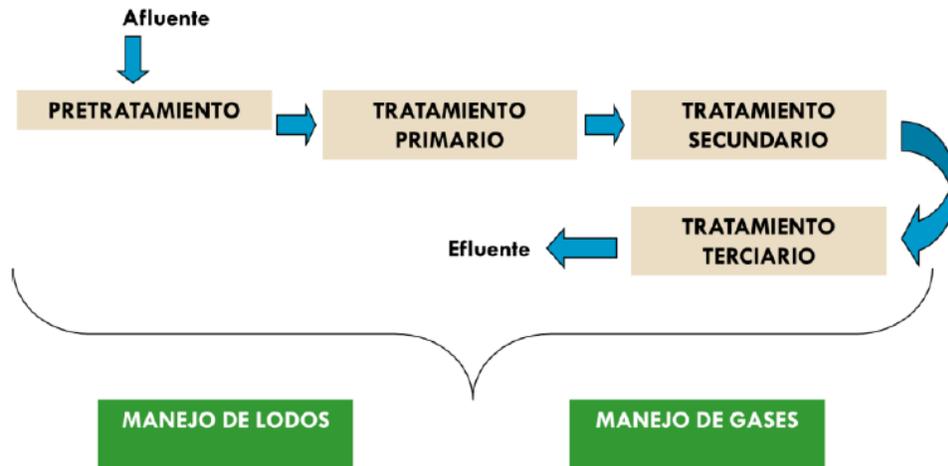


Ilustración 3: Esquema del tratamiento de las aguas residuales Lozano, (2012)

Esta clasificación, mundialmente aceptada, corresponde al grado de depuración obtenida, como se muestra en la Tabla.

Tabla 3: Características de las etapas de la depuración de aguas residuales Lozano, (2012)

| Etapa | Objetivo | Unidades más representativas | Tipo de fenómenos principales involucrados | Niveles de eficiencia |
|----------------|---|---|--|---|
| Pretratamiento | Remover sólidos gruesos para evitar atascos, abrasión y daños a tuberías, bombas, equipos y a otros elementos de la depuradora. | -Pozo de gruesos -Rejillas -Desarenador -Desengrasador -Tanque de Igualación u homogenización (efluentes industriales, especialmente) | Físicos. Químicos (neutralización). | No se considera que se logren remociones significativas en DBO y SST. |
| | Remover la mayor parte de la materia orgánica | -Tanque de neutralización | Físicos. | DBO: hasta 50% (hasta 80% con |

| | | | | |
|------------------------|--|---|----------------------------------|--|
| Tratamiento Primario | suspendida decantable. | (efluentes industriales, especialmente) -Decantadores primarios (por gravedad o asistidos | Químicos (decantación asistida). | decantación asistida) SST: hasta 70% (hasta 85% con decantación asistida) |
| Tratamiento Secundario | Remover materia orgánica soluble y suspendida. Eliminar patógenos y otros elementos contaminantes. | químicamente) -DAF (unidades de flotación por aire disuelto. Usadas para efluentes industriales, especialmente) | Biológicos. | DBO: hasta un 92% SST: hasta un 90 % |
| Tratamiento Terciario | Pulimento en la reducción de la materia orgánica. Eliminación de contaminantes específicos (e.g. nitratos, patógenos, metales, pesticidas, disruptores endocrinos). | -Tamices (efluentes industriales, especialmente) -Reactores biológicos aerobios (e.g. lodos activados, filtros percoladores, biodiscos, humedales, lagunas) -Reactores biológicos anaerobios (e.g. UASB, RAP, EGSB) | Químicos. Biológicos. | Eficiencias variables de remoción, dependiendo del tipo de contaminante |

C. Manejo de gases

Algunas unidades de tratamiento pueden liberar olores molestos (especialmente las anaerobias), los cuales pueden ser tratados en biofiltros. Estas unidades constan de un lecho de soporte (compuesto frecuentemente de compost maduro o turba) sobre el cual se adhieren microorganismos que, mediante procesos

oxidativos, degradan las sustancias que producen los malos olores. La aspersión permanente de agua sobre el lecho, facilita la fijación y degradación de los compuestos oloroso; las unidades que usan este sistema de aspersión, se conocen como biolavadores (biotrickling). Buena parte del éxito del proceso depende del mantener unos niveles de humedad aceptables en el medio de soporte (50 a 60%).

Los gases (biogás) producto de la descomposición anaerobia de los lodos o de la materia orgánica en reactores biológicos, pueden ser empleados como combustible para la generación de energía y para elevar las temperaturas de los digestores de lodos, con lo que se acelera el proceso de estabilización de los biosólidos. No obstante, en la mayoría de las depuradoras colombianas, este gas no se aprovecha y es quemado en unas estructuras diseñadas para este propósito, llamadas “quemadores”.

D. Manejo de lodos

El objetivo de la línea de lodos es tratar los subproductos sólidos (fangos) originados en la línea de agua de la depuradora. El volumen de estos lodos o biosólidos debe ser reducido para facilitar su manejo (Espesamiento), ser estabilizados para evitar fermentaciones y crecimiento de organismos patógenos (Digestión) y deshidratarse para conseguir una buena textura que facilite su manejo y transporte hacia su uso o disposición final (Deshidratación).

Los biosólidos de una depuradora pueden usarse, siempre que estén libres de patógenos, metales y otros elementos tóxicos y peligrosos, como acondicionadores de suelo en campañas de reforestación o recuperación de áreas degradadas. Por la experiencia del autor, esta condición sólo se da en lodos de depuradoras que manejen aguas residuales domésticas. Cuando se mezclan efluentes de tipo industrial, como ocurre en la mayoría de depuradoras de aguas residuales municipales, esta condición rara vez se puede asegurar, razón por la cual son dispuestos en un relleno sanitario.

2.2.1.1.4 Consideraciones preliminares y criterios de selección

A. ¿Por qué tratar las aguas residuales?

El tratamiento de agua residual se justifica con diferentes razones para cada sector social:

- ❖ Razones para la industria:
 - Recuperar productos.
 - Mostrar una imagen amigable con el ambiente.
 - Cumplimiento de estándares internacionales que garantizan participación en mercados.
- ❖ Razones estatales:
 - Protección de los recursos naturales.
 - Protección de las redes de alcantarillado y del correcto funcionamiento de la PTAR municipal.
- ❖ Razones sociales:
 - Protección de la salud pública.

Entre los principales impactos negativos de las aguas servidas, se encuentran:

- a) Restricciones de los usos múltiples del agua.
- b) Abatimiento del oxígeno disuelto en el agua.
- c) Muerte de peces.
- d) Olores ofensivos.
- e) Desequilibrios en la cadena trófica.
- f) Disminución de los procesos fotosintéticos.
- g) Aporte de organismos patógenos.
- h) Afectación de la calidad visible del agua y el paisaje.
- i) Hipereutrofización

B. Sustancias inhibidoras

Antes del tratamiento secundario (biológico) es necesario verificar y controlar los niveles de algunas sustancias que interfieren con la actividad biológica en

estos reactores y que, consecuentemente, afectarán las eficiencias de estas unidades. Los niveles máximos recomendados se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 4: Niveles máximos recomendados de algunos compuestos antes de entrar al reactor biológico. Balda, (2002)

| COMPUESTO | NIVEL MÁXIMO RECOMENDADO |
|--------------------------|---------------------------------|
| Productos alcalinizantes | 10 ppm |
| Productos ácidos | 10 ppm |
| Ácido nítrico | 50 ppm |
| Cloro libre | 10 ppm |
| Formaldehído | 7 ppm |
| Fosfatos | 100 ppm |
| Peróxido de hidrógeno | 10 ppm |
| Nitrógeno amoniacal | 250 ppm |

C. Caracterización mínima de aguas residuales

Las de aguas residuales, sean domésticas, urbanas o industriales, deben considerar los siguientes parámetros:

- Caudal (incluyendo los caudales punta y mínimos).
- Temperatura
- pH
- Sólidos sedimentables
- DBO5 total y disuelta
- DQO total y disuelta
- Sólidos Totales (suspendidos y disueltos)
- Nitrógeno Total Kjeldahl – NTK
- Fosfatos
- Grasas y Aceites
- Sulfatos
- Presencia de agentes de limpieza (tipo, volumen empleado, frecuencia de uso)

D. Datos adicionales

Además de una buena caracterización deben evaluarse también los aspectos que se plantean en la siguiente tabla:

Tabla 5: Información adicional a la caracterización de las aguas que debe ser evaluada antes del diseño de un sistema de depuración de aguas residuales. Lozano, (2012)

| CIUDADES Y PUEBLOS | INDUSTRIAS |
|--|--|
| Proyección de la población. | Procesos industriales involucrados. |
| Actividades económicas principales, cuyos efluentes puedan influir en las características del agua residual. | Materias primas o productos tóxicos que puedan presentarse en el efluente. |
| | Indicadores de producción (productos generados por la industria) |
| | Diagrama de flujo de proceso |
| EFICIENCIAS REQUERIDAS PARA LOS PARÁMETROS EXIGIDOS POR LA AUTORIDAD AMBIENTAL | |
| Caudales punta y su composición | |
| Área disponible para el sistema de tratamiento | |
| Dinero disponible para invertir en la depuradora | |

E. Otros criterios de selección

Las unidades que se emplearán en la depuradora, además de lo mencionado antes, considerará los siguientes aspectos:

- Ubicación
- Costos de inversión y operación
- Necesidad de personal (cualificado y no cualificado) comparado con la disponibilidad local.
- Otras condiciones particulares:
 - Clima
 - Tamaño de la población servida ó habitantes equivalentes
 - Nivel socioeconómico de los usuarios
 - Estabilidad geológica

- Dirección de los vientos
- Consideraciones ambientales
- Facilidades para la disposición de subproductos

F. Cálculo de la población

La consideración de la población futura es un punto elemental para garantizar el correcto funcionamiento de una depuradora de aguas residuales domésticas o urbanas, hasta culminar su periodo de diseño. El periodo de diseño es el tiempo de vida útil de las estructuras, equipos e instalaciones de la depuradora en los que se cumple un punto de equilibrio entre la inversión inicial y el lucro efectivo (no cesante) de la misma. En estos tiempos, debido a la diferencia de elementos de cada planta de tratamiento, se toma un periodo único de diseño entre 25 y 30 años, como base para el cálculo de la población futura.

Los métodos más usados para el cálculo de la población futura, son:

- Comparación gráfica de las poblaciones
- Método aritmético lineal
- Método geométrico o exponencial
- Método logarítmico
- Método Pearl o curva logística

Para periodos de diseño de hasta 25 años, puede emplearse el método más rápido sin llegar a un error cuantioso.

2.2.1.1.5 Cálculos hidráulicos

A. Línea piezométrica

En algunos textos especializados se define a la línea piezométrica como la línea imaginaria que une los puntos hasta donde podría ascender el agua si se insertaran pequeños tubos verticales (piezométricos) en distintos puntos de una tubería o canal abierto, pero existe una imprecisión en esta definición debido a que es observable en un laboratorio.

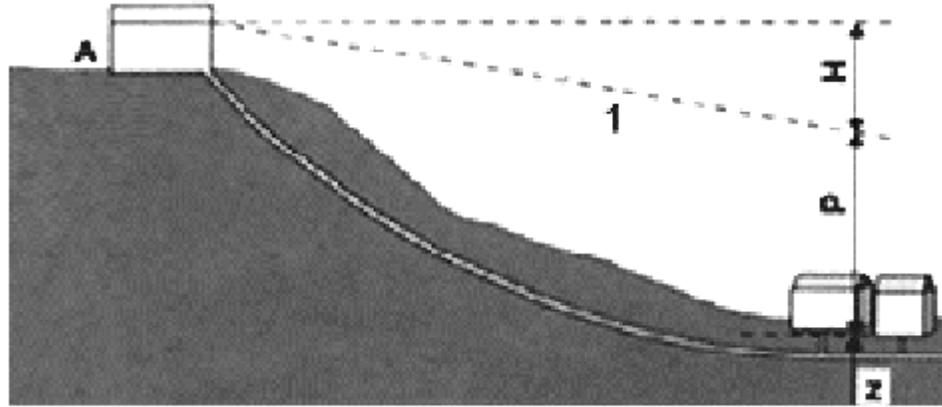


Ilustración 4: Línea piezométrica. Tomada de: <http://saint-gobain-canalizacao.com.br>

La línea piezométrica (1) muestra la presión hidrostática disponible en cada punto de la tubería tendida entre el tanque elevado (punto A) y las viviendas ubicadas en la falda de la montaña mientras el agua se encuentra en movimiento (Línea Dinámica). La diferencia “H” entre la línea de presión dinámica para un caudal determinado y la línea de presión estática (la horizontal proyectada desde el nivel del agua del tanque elevado (punto A), se conoce como pérdida de carga o pérdida de presión para ese caudal. Esta gráfica sugiere que la vivienda cuenta con un dispositivo de control (e.g. una válvula) a la salida. De lo contrario, el sistema consume toda la altura. Esta pérdida de carga o de presión, se produce por accidentes (singularidades) en la línea de conducción (e.g. cambios de dirección, estrechamientos, válvulas, orificios, accesorios) y la fricción del fluido con las paredes de la tubería o del canal. Las cotas de línea piezométrica y de los niveles de agua en la depuradora, se expresan en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y las pérdidas en metro columna de agua (m.c.a.).

B. Pérdida de carga en tuberías

La expresión de Darcy-Weisbach para el cálculo de pérdidas, expresada en función de caudal:

$$h_f = 0.0826 \times f \times \frac{L}{D^5} \times Q^2$$

Donde:

H_f : pérdida de carga (m.c.a./m)

f : coeficiente de fricción (adimensional)

L : longitud de la tubería

D : diámetro de la tubería (m)

Q : caudal (m³/s)

El coeficiente de fricción puede calcularse así:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{K}{3.7 \times D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

K : rugosidad absoluta

Re : número de Reynolds

El número de Reynolds se calcula así:

$$Re = \frac{V \times D}{\nu}$$

V : velocidad del fluido

ν : viscosidad cinemática (m²/s)

La rugosidad absoluta se puede obtener de la siguiente tabla:

Tabla 6: Rugosidad absoluta de los materiales. Lozano, (2012)

| MATERIAL | RUGOSIDAD ABSOLUTA |
|-------------------|---------------------------|
| polietileno | 0.002 |
| PVC | 0.2 |
| Aluminio | 0.015 – 0.06 |
| Acero galvanizado | 0.07 – 0.15 |

| | |
|------------------------------------|-------------|
| Hormigón liso | 0.3 – 0.8 |
| Hormigón rugoso | 3 – 9 |
| Hormigón armado | 2.5 |
| Fibro cemento nuevo | 0.05 – 0.10 |
| Fibro cemento con años de servicio | 0.60 |

Pueden usarse otras expresiones como la fórmula de Hazen-Willims.

C. Pérdida de carga en canales

Para la pérdida de carga en canales, se usa la expresión de Manning

$$V = \frac{(R_h)^{2/3}}{n} \times S^{0.5}$$

Donde:

V: velocidad del fluido

R_h: radio hidráulico

n: número de rugosidad de Manning

S: pendiente o pérdida de carga

El radio hidráulico es el cociente entre el área de la sección y su perímetro mojado (A/P), el cual depende de la forma del canal.

D. Pérdida de carga en orificios

Un orificio es una abertura sumergida en la pared de un tanque, depósito o estructuras similares. La pérdida en esta singularidad puede calcularse así:

$$Q = K \times A \times \sqrt{2 \times g \times h}$$

Donde:

Q: caudal que pasa por el orificio (m³/s)

K: constante (toma un valor medio de 0.62)

A: área del orificio (m²)

g: aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

h: pérdida de carga en el orificio (m.c.a.)

E. Pérdida de carga en accidentes o singularidades

La pérdida de carga de una singularidad (e.g. accesorio, dispositivo de control) puede calcularse con la siguiente expresión:

$$h = K \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

Donde:

h: pérdida de carga en la singularidad (m.c.a.)

K: constante que depende de la singularidad

V: velocidad del fluido (m/s)

g: aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Tabla 7: Valores de la constante K para diferentes tipos de singularidades. Lozano, (2012)

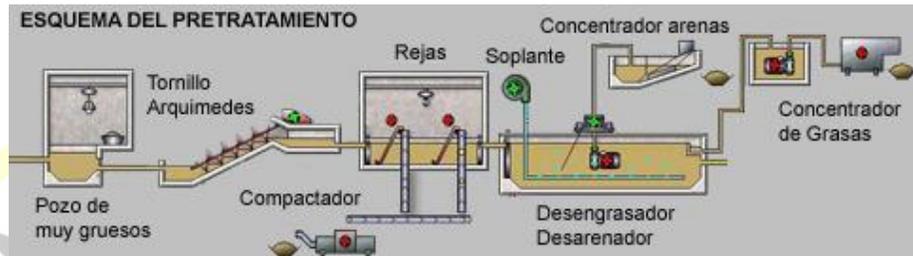
| SINGULARIDAD | K |
|-------------------------------|-------------|
| Contracción brusca | 0.5 – 1.5 |
| Expansión brusca | 0.5 – 1.1 |
| Codo 45° | 0.15 – 0.19 |
| Codo 90° | 0.26 – 0.33 |
| Válvula de compuerta | 0.15 – 0.30 |
| Válvula de retención | 1.5 – 2.9 |
| Compuerta de un canal abierto | 0.2 – 0.3 |

2.2.1.2 Pretratamiento

Lozano, (2012). Nos dice que el pretratamiento desempeña un papel relevante en la medida en que elimina elementos que puedan causar deficiencias en el tratamiento, y además protege los equipos, partes y unidades de la depuradora, de daños que puedan ser perjudiciales para el funcionamiento de la planta y el sistema de evacuación y

transporte de aguas residuales. Así también los objetivos principales del pretratamiento son: eliminar material grueso y eliminar arenas. (p.46)

Ilustración 5: Esquema del pretratamiento. Imagen tomada de: http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Pretratamiento



2.2.1.2.1 Caudales de diseño y canal de entrada

El flujo de aguas residuales domésticas y urbanas, dependerá especialmente de:

- Número de habitantes
- Consumo de agua potable (dotación)
- Coeficiente de retorno (usualmente entre 0,70 y 0,85).
- Caudales de infiltración
- Conexiones erradas
- Aportes institucionales, comerciales e industriales

El caudal medio diario (L/s) aportado a un sistema de tratamiento será:

$$Q_{md} = Q_{dom} + Q_{ind} + Q_{com} + Q_{ins}$$

Donde:

Q_{md}: caudal medio diario de aguas residuales (L/s)

Q_{md}: aporte de aguas residuales de origen doméstico (L/s)

Q_{md}: aporte de aguas residuales de origen industrial (L/s)

Q_{md}: aporte de aguas residuales de origen comercial (L/s)

Q_{md}: aporte de aguas residuales de origen institucional (L/s)

A. Aporte doméstico

El caudal doméstico resulta del aporte de aguas residuales derivado de las actividades humanas (vida hogareña) en las zonas residenciales. Se calcula a partir del consumo de agua potable por persona (dotación), considerando que ésta -en su mayor porcentaje- es retornada al alcantarillado (entre un 70 y 85%, que corresponde al coeficiente de retorno sanitario) y el número de habitantes.

El caudal doméstico se puede calcular así:

$$Q_{dom} = \frac{d \times P \times C_R}{86400}$$

Donde:

Q_{dom}: corresponde al aporte de aguas residuales de las actividades domésticas (L/s).

d: dotación o cantidad de agua potable consumida por habitante y por día (L/hab*d).

P: número de habitantes proyectado para el periodo de diseño asignado.

CR: coeficiente de retorno sanitario (entre 0,70 y 0,85, pero usualmente corresponde se utiliza 0,80).

Tabla 8: Valores de consumo doméstico e industrial por ciudades.

| DOTACION | BOGOTÁ D.C. | MEDELLÍN | MANIZALES | PEREIRA |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------|----------------|
| Doméstica (L/hab*d) | 126 | 150 | 124 | 160 |
| Industrial (m ³ /mes) | 587 | 203 | 319 | 279 |

Valores de la Contraloría General de la República, 2000. Tomados de:
http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000088/lecciones/seccion4/capitulo05/04_05_01.htm

B. Aporte industrial

Pueden tomarse unos valores de aporte de aguas residuales industriales de entre 0,4 a 1,5 L/s por hectárea de suelo de uso industrial, dependiendo del nivel de industrialización de la población (mayores valores para ciudades con mayores industrias).

C. Aporte comercial e institucional

Puede estimarse un valor de 0,5 L/s por hectárea de suelos de uso comercial e institucional.

D. Aportes adicionales

Las conexiones erradas (drenajes de aguas lluvias conectados a la red sanitaria en zonas donde hay alcantarillado separado), pueden aumentar el flujo de aguas residuales, unos 0,2 L/s*ha.

De igual manera, en época de invierno, si se tiene una red de alcantarillado unitario (llamado también “combinado”), el aporte de aguas lluvias puede llegar a unos 2 L/s*ha.

E. Caudales de diseño

Una vez calculado el caudal medio diario “Qmd” con la suma de los aportes de aguas a la red de alcantarillado, deben considerarse el caudal mínimo y el caudal punta que puede llegar, en un momento determinado, al sistema de depuración. Las oscilaciones abruptas de caudal pueden causar deficiencia del tratamiento y fallas a nivel hidráulico en las unidades. Por esta razón, debe preverse y evaluarse el funcionamiento de cada unidad y componente de la depuradora con cada uno de estos caudales (mínimo, medio y punta).

A continuación, se presentan algunos parámetros para la estimación de caudales de diseño:

Tabla 9: Fórmulas empíricas para el cálculo de los caudales mínimo y punta para diferentes tamaños de población. Lozano, (2012)

| TAMAÑO DE LA POBLACIÓN | CAUDAL MÍNIMO “Q _{min} ” | CAUDAL PUNTA “Q _p ” |
|-----------------------------------|--|--------------------------------|
| Pequeña (<20.000 h-eq) | $0.30 \times Q_{md}$ | $5 \times Q_{md}$ |
| Mediana (20.000 a 60.000 h-eq) | $0.45 \times Q_{md}$ | $3 \times Q_{md}$ |
| Grande (>60.000 h-eq) | $0.60 \times Q_{md}$ | $2 \times Q_{md}$ |
| Cualquier tamaño de población | $Q_p = Q_{md} \times \left(1.2 + \frac{2.6}{(Q_{md})^{0.25}}\right)$ | |

F. Canal de entrada la depuradora

La entrada de aguas residuales a la depuradora, por lo general se hace mediante un canal de sección rectangular. Dependiendo de las condiciones topográficas, este canal se proyectará antes del pozo de muy gruesos o después de este, siempre anterior a la unidad de desbaste.

Este canal que se diseña con la fórmula de Manning, deberá tener un ancho y profundidad mínimo, con un área vertical útil, mayor o igual a las dimensiones del colector de aguas residuales que conduce el caudal a la depuradora. Los criterios básicos de diseño se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 10: Criterios de diseño para el canal de entrada. Lozano, (2012)

| PARÁMETRO | VALOR O RANGO |
|--|---|
| Altura mínima de lámina de agua | 0.3 m (a caudal medio) |
| Velocidad de flujo en el canal | 0.6 a 1.0 m/s (a caudal medio) |
| Borde libre (por encima del caudal punta al final del periodo de diseño) | 0.3 a 0.4 m |
| Coefficiente de rugosidad de Manning | 0.014 (independientemente del material de construcción) |



Ilustración 6: Canal de ingreso a una PTAR. Foto: William Antonio Lozano-Rivas.

2.2.1.2.2 Pozo de muy gruesos

Se diseña especialmente para aguas residuales urbanas en donde se espera la circulación de una gran cantidad de arenas y sólidos de gran tamaño que viajan por el alcantarillado (e.g. juguetes, pedazos de madera, trapos, muebles).

Su fondo por lo regular es troncopiramidal invertido (en forma de tolva) para impedir la acumulación de sólidos en las paredes laterales y facilitar la extracción del material retenido, mediante el accionar de una cuchara bivalva anfibia, operada por un motor electrohidráulico. Los sólidos se extraen constantemente, se dejan escurrir y se depositan en contenedores. Este material es incinerado o dispuesto, posteriormente, en un relleno sanitario.

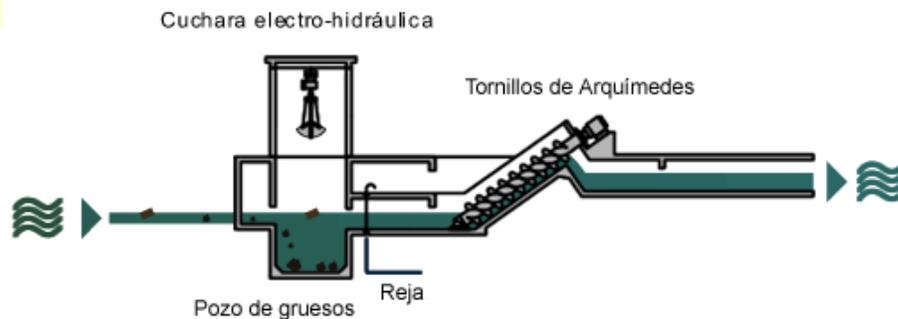


Ilustración 7: Pozo de muy gruesos. Tomada de:
<http://www.consorcioaa.com/cmscaa/export/sites/default/imgs/1.entrada.gif>

Los criterios de diseño para el pozo de muy gruesos se presentan a continuación:

Ilustración 8: Criterios de diseño para el pozo de muy gruesos. Lozano, (2012)

| PARAMETRO | VALOR O RANGO |
|---|------------------------------|
| Carga superficial ($m^3/m^2 \cdot h$) | <300 (a caudal punta) |
| Tiempo de retención hidráulica (s) | 30 a 60 (a caudal punta) |
| Profundidad del pozo (m) | >2 |
| Velocidad de paso (m/s) | 0.50 a 0.65 (a caudal punta) |
| Inclinación de las paredes | >70° |



Ilustración 9: Contenedor para el depósito del material extraído del pozo de muy gruesos. Al fondo, cuchara bivalva. Imagen tomada de: <http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/obrallegada/17.jpg>

2.2.1.2.3 Desbaste

Los elementos flotantes como plásticos, trozos de madera y ramas, entre otros, deben ser retirados en el desbaste. Esta unidad no es prescindible en ninguna depuradora y es independiente de la existencia o no, del pozo de muy gruesos.

El desbaste se conoce también como cribado y se hace, por lo general, mediante la instalación de rejillas metálicas de diferentes características de diseño y operación, dependiendo del tipo de agua a tratar.

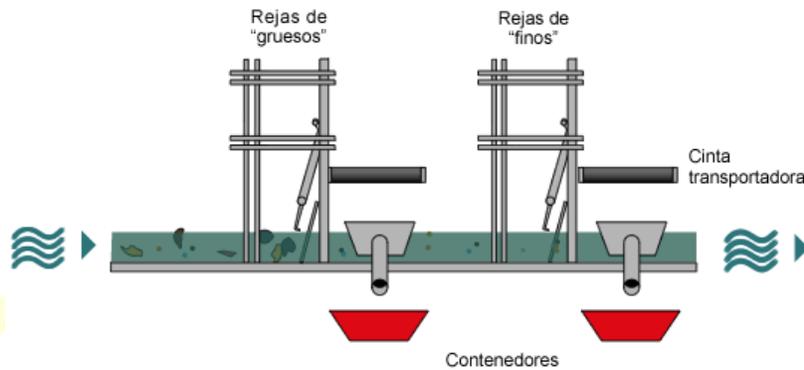


Ilustración 10: Corte de un sistema de desbaste usando rejillas (una gruesa y otra fina) de limpieza mecánica. Imagen tomada de:

<http://www.consorticioaa.com/cmscaa/export/sites/default/imgs/2.desbaste.gif>

A. Clasificación de las rejillas de desbaste

Las rejillas pueden clasificarse según:

- Su limpieza
 - Manual
 - Mecánica
- Su separación entre barrotes
 - Fina: entre 0,5 y 1,5 cm de separación
 - Media: entre 1,5 y 5,0 cm de separación
 - Gruesa: mayor a 5,0 cm de separación
- Su inclinación
 - Verticales: a 90° respecto de la horizontal
 - Inclinados: entre 60 y 80° respecto de la horizontal

El tamaño de los barrotes usados en las rejillas, está relacionado con el tamaño de los sólidos que se pretende retener, con el fin de que sean lo suficientemente fuertes para que no se deformen. Para rejillas gruesas se usan barrotes de entre ½ y 1 pulgada (1,3 a 2,5 cm) de diámetro (o de ancho) y para las finas, de entre ¼ y ½ pulgada (0,6 a 1,3 cm).

B. Rejillas de limpieza manual

Se instalan en depuradoras pequeñas y son inclinadas (usualmente a 60° respecto de la horizontal) para agilizar las labores de limpieza del operario, quien retira los sólidos retenidos en la rejilla con ayuda de un rastrillo u otra herramienta similar dentada y los dispone temporalmente en una lámina perforada o canastilla, conocida como depósito escurridor, para eliminar el agua. Posteriormente, estos desechos se trasladan para incineración o a un relleno sanitario.



*Ilustración 11: Rejilla media con lámina perforada para escurrimiento del material extraído.
Foto: William Antonio Lozano-Rivas.*



*Ilustración 12: Operario retirando manualmente los sólidos retenidos en la rejilla. No cuenta con una canastilla o lámina de escurrimiento. Imagen tomada de:
<http://www.huber.de/typo3temp/pics/84ea1074e6.jpg?PHPSESSID=9e770a877a3fbf5149553f1525633a7d>*

C. Rejillas de limpieza mecánica

Llamadas también rejillas de limpieza automática; éstas por lo regular se instalan en depuradoras grandes cuyos grandes caudales arrastran colosales cantidades de materiales gruesos de forma permanente, que no podrían ser evacuados manualmente. Estas rejillas suelen ser verticales, con inclinaciones que varían entre los 80 y 90° respecto de la horizontal.

Los mecanismos de limpieza son variables dependiendo del fabricante; los más usuales son los de barras dentadas o los de peines giratorios.



Ilustración 13: Rejilla de limpieza mecánica con peine giratorio. Imagen tomada de: <http://www.interempresas.net/Química/FeriaVirtual/Producto-Reja-de-desbaste-37170.html>

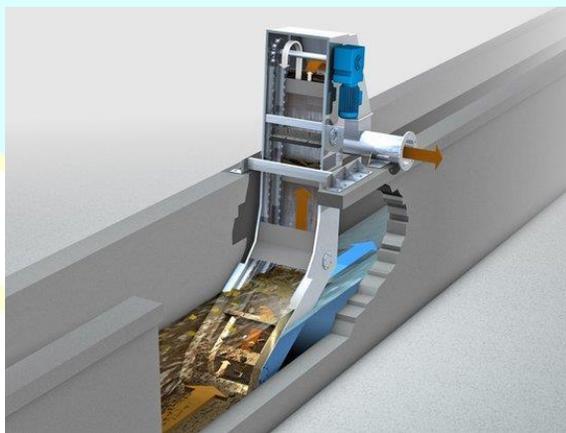


Ilustración 14: Rejilla de limpieza mecánica. Imagen tomada de: <http://www.huber.de/typo3temp/pics/3f0746d8ed.jpg?PHPSESSID=0221c611312d1533052042da3ab52ed4>

D. Diseño de desbaste

Los criterios de diseño de las rejillas se centran en las velocidades de paso del flujo de aguas residuales, a través de ellas. Esta velocidad no debe ser tan baja que provoque la sedimentación de sólidos en el canal ni tan alta que genere la salida de sólidos ya retenidos por los barrotes de la reja.

Tabla 11: Criterios de diseño de las rejillas de desbaste. Lozano, (2012)

| PARÁMETRO | VALOR O RANGO |
|---|--------------------------|
| Velocidad mínima de paso | 0.6 m/s (a caudal medio) |
| Velocidad máxima de paso | 1.4 m/s (a caudal punta) |
| Grado de colmatación entre intervalos de limpieza | 30% |
| Pérdida de carga máxima admisible | 15 cm (a caudal medio) |

Una vez se tengan definidas las dimensiones del canal de desbaste, el área del canal en la zona de la rejilla se puede calcular con la siguiente expresión:

$$A_R = B_C \times \frac{L}{L + b} \times \left(1 - \frac{G}{100}\right)$$

Donde:

A_R : área útil del canal en la zona de la rejilla (m^2)

B_C : ancho del canal (m)

L: luz o espacio entre barrotes (m)

b: ancho de los barrotes (m)

G: grado de colmatación (usualmente se adopta un valor de 30%)

Debido a que los barrotes disminuyen el área útil del canal, haciendo que acreciente la velocidad del flujo entre la rejilla, se hace necesario, en ocasiones, aumentar el ancho del canal en la zona donde está ubicada la criba, o la profundidad

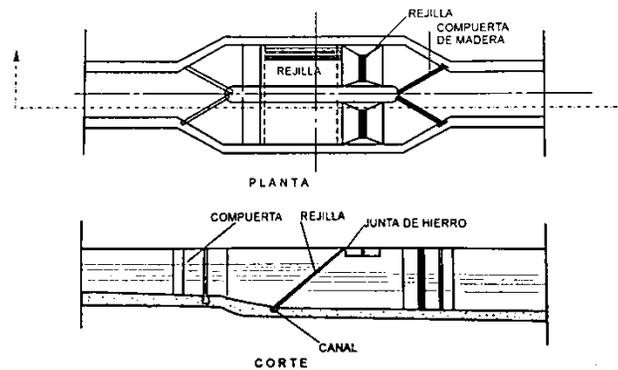


Ilustración 15: Zona de rejillas. Romero Rojas, (1999)

Para estimar el ancho o la profundidad en la zona de la rejilla, se emplea la siguiente expresión:

$$P = Q \times \frac{b + L}{\left(1 - \frac{G}{100}\right) \times V_p \times L \times B_c}$$

Donde:

P: profundidad en la zona de rejillas (m)

Q: caudal de aguas residuales (m³/s)

V_p: velocidad de paso entre la rejilla (m/s)

La pérdida de carga generada por la rejilla (diferencia de altura de la lámina de agua antes y después del paso por la rejilla se puede calcular con esta expresión propuesta por Lozano-Rivas:

$$\Delta H = \frac{V_p^2}{9.1}$$

Donde:

ΔH: pérdida de carga generada por la rejilla (m)

V_p: velocidad de paso del agua a través de la rejilla (m/s)

El número de barrotes se puede calcular con la siguiente expresión:

$$N = \frac{B_R - L}{b + L}$$

Donde:

N: número de barrotes

BR: ancho del canal en la zona de rejilla (m)

L: luz o espacio entre barrotes (m)

b: ancho de los barrotes (m)

Tabla 12: Cantidad de sólidos retenidos por las rejillas. Lozano, (2012)

| TIPO DE REJILLA | CANTIDAD DE SOLIDOS RETENIDOS |
|-----------------|----------------------------------|
| Fina | 5 a 12 mL/d*hab |
| Gruesa | 12 a 25 mL/d*hab |

2.2.1.2.4 Desarenador

En el desarenador se remueven las partículas de arena y similares, que tienen un peso específico de cercano a 2,65 g/cm y tamaños superiores a los 0,15 mm de diámetro (e.g. cáscaras, semillas). Este tipo de partículas frecuentemente se encuentran en las aguas residuales urbanas y muy rara vez en las de tipo industrial, causan abrasión y daños en las tuberías y en otros equipos de la depuradora.

Los desarenadores consisten en un ensanchamiento del canal de pretratamiento, en donde la velocidad del agua disminuye lo suficiente para permitir la sedimentación de las partículas discretas, pero no, para que se presente asentamiento de la materia orgánica. Su diseño está soportado, entonces, en las velocidades de sedimentación de las partículas que quieren removerse, las cuales son explicadas mediante las fórmulas de Stokes (flujo laminar), Newton (flujo turbulento) y Allen (régimen transitorio).

Tabla 13: Velocidades de sedimentación para diferentes tamaños de arenas a una temperatura de 16 °C y una eliminación cercana al 90% (Moreno López, 2009-2010).

| DIAMETRO DE PARTÍCULA | VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN |
|-----------------------|----------------------------|
| 0.15 mm | 40 a 50 m/h |
| 0.20 mm | 65 a 75 m/h |
| 0.25 mm | 85 a 95 m/h |
| 0.30 mm | 105 a 120 m/h |

El contenido de materia orgánica en las arenas extraídas varía entre el 3 y el 5%.



Ilustración 16: Canales desarenadores. Imagen tomada de: <http://www.flickr.com/photos/gepadi/2109061728/in/photostream/>

Tabla 14: Criterios de diseño de los desarenadores. Lozano, (2012).

| PARÁMETRO | VALOR O RANGO |
|--------------------------------------|--|
| Carga superficial | 40 a 70 m ³ /m ² *h (a caudal punta) |
| Tiempo de retención hidráulica (TRH) | 100 a 300 s (a caudal punta) Más frecuentemente = 180s |
| Velocidad longitudinal | 0.20 a 0.40 m/s (a caudal punta) |

| | |
|----------------------------|--|
| Longitud | 10 a 30 veces la altura de la lámina de agua |
| Altura mínima de la unidad | 1.0 m |
| Altura máxima de la unidad | 2.5 m |

La cantidad de arena removida por estas unidades oscila entre 5 y 40 mL por m³ de agua residual tratada para alcantarillados sanitarios, con valores típicos cercanos a los 20 mL/m³.

Si la red es combinada, estos valores podrían ascender en épocas de invierno, a 200 mL/m³.

2.2.1.2.5 Desarenador – Desengrasador

El desarenador-desengrasador es una variante del desarenador convencional, usado en grandes instalaciones depuradoras. En este tipo de canales aireados además de remover las arenas y otras partículas de peso específico similar, se quitarán también grasas, aceites, espumas y otro material flotante que pueden causar interferencia en los tratamientos posteriores y que, incluso, (como en el caso de las grasas) podrían promover la aparición organismos filamentosos causantes del bulking en los reactores biológicos.

En este tipo de unidades se diferencian básicamente tres zonas, además de las de entrada y salida:

- Zona de desengrasado
- Zona de desarenado
- Zona de extracción de arenas

En la zona de desengrasado, un baffle disipa la energía generada por los difusores aireadores, permitiendo el ascenso, sin turbulencias, de grasas desemulsionadas, aceites y otros flotantes adheridos a las microburbujas de aire producidas por los difusores. Un dispositivo desnatador, montado sobre un puente grúa, se moviliza permanentemente por esta zona retirando los flotantes que se van acumulando.

El fondo inclinado de esta zona (45° de pendiente) permite además que las arenas afectadas por la turbulencia de la aireación, rueden libres hasta el fondo de la unidad en donde está la zona de extracción de arenas.



Ilustración 17: Desarenador-desengrasador. Imagen tomada de: <http://www.vlcc ciudad.com/las-depuradoras-generan-679-toneladas-de-fangos/>

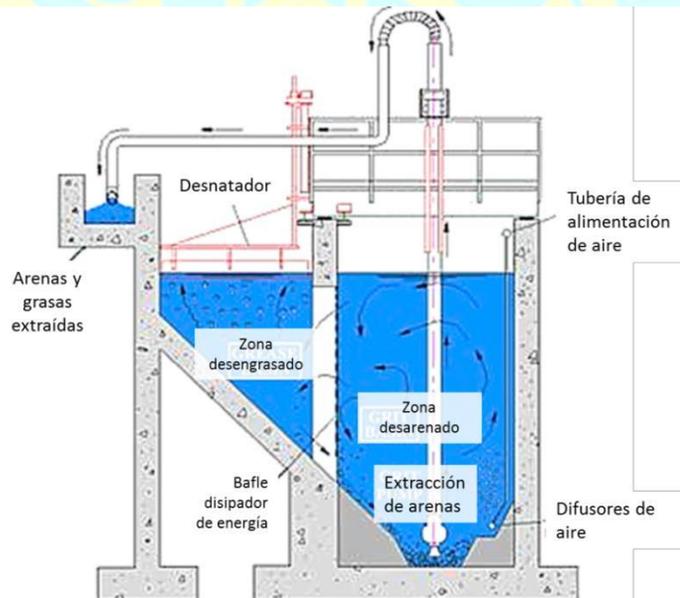


Ilustración 18: Corte de un desarenador-desengrasador. Imagen tomada de: http://wastewatertreatmentplant.wikispaces.com/file/view/Grift-chamber_clip_image002_0000.jpg/105369573/Grift-chamber_clip_image002_0000.jpg modificada por el autor.



Ilustración 19: Desarenador-desengrasador vacío. A la derecha se aprecia la zona de desarenado y de extracción de arenas. Además el tubo de alimentación de aire anclado al muro (arriba) y los difusores de aire (abajo). En la izquierda está la zona de desnatado. Al fondo de la fotografía, en azul, el puente grúa al que se ancla el desnatador y el tubo de succión de arenas. Imagen tomada de: http://usuarios.arsystel.com/raulh/edar_pinedo/1124.jpg

Los criterios de diseño del desarenador-desengrasador se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla 15: Criterios de diseño para desarenadores-desengrasadores. Lozano, (2012)

| PARAMETRO | VALOR O RANGO |
|--------------------------------------|---|
| Carga superficial | < 40 m ³ /m ² *h (a caudal punta) |
| Tiempo de retención hidráulica (TRH) | 12 a 16 min (a caudal medio) |
| Caudal tratado por unidad | 0.2 a 0.4 m ³ /s (a caudal medio) |
| Velocidad horizontal | 0.02 a 0.07 m/s (a caudal punta) |
| Relación longitud/ancho | 3/1 a 10/1 |
| Profundidad | 2 a 5 m |
| Relación profundidad-ancho | 1/1 a 3/1 |
| Longitud | 7.5 a 25 m |
| Ancho | 3 a 8 m |
| Suministro de aire | 0.5 a 2.0 m ³ /h*m ³ de tanque |
| Profundidad de los difusores | 0.5 a 0.9 m respecto del fondo del tanque |

En la zona de desarenado, se ubica también el suministro de aire a través de unos difusores de poro fino, los cuales están a profundidad, en la pared opuesta a la zona de desengrasado. Estos difusores provocan un movimiento de tipo helicoidal al interior de la unidad y el aire insuflado reduce los olores y ayuda en la limpieza de las arenas extraídas.

Así mismo, en el fondo de esta zona, se ubica el tubo extractor de arenas, el cual está montado sobre un puente grúa que se moviliza lentamente por toda la longitud del canal, succionando el material decantado.

Los materiales extraídos, tanto flotantes como arenas, son trasladados temporalmente a un contenedor para ser luego incinerados o dispuestos en un relleno sanitario.

2.2.1.3 Tratamiento primario

Lozano, (2012). Nos dice que esta etapa tiene como objetivo eliminar, por efecto de la gravedad, los sólidos suspendidos de las aguas residuales; se consigue bien sea de manera libre, o asistida con químicos que juntan las partículas (floculantes) para que ganen peso y decanten con mayor velocidad. (p.68)

Estos sólidos suspendidos eliminados son, en su mayoría, materia orgánica, por lo cual se presenta una reducción importante en la concentración de DBO (demanda biológica de oxígeno) del efluente. Las operaciones unitarias más comunmente empleadas para el tratamiento primario de las aguas residuales urbanas, son:

- Decantadores.
- Tamices (usados, generalmente, para aguas residuales industriales).
- Unidades de decantación asistida químicamente.

2.2.1.3.1 Fundamentos de la decantación primaria

Algunas partículas presentes en las aguas residuales, por su baja densidad y poco tamaño, no alcanzan a ser retiradas en el tratamiento primario. La mayor parte de estas partículas (50 a 70%) corresponden a materia orgánica en suspensión, que debe ser eliminada en tanques con velocidades muy

bajas, tiempos largos de retención y flujos laminares que den lugar a la decantación de estas partículas por efecto de la gravedad.

A. Tipos de sedimentación

La sedimentación se presenta de diferentes formas dependiendo de factores como, la temperatura, del tipo de partículas presentes, su concentración en el agua, el tipo de sedimentador y la zona de la unidad en donde ocurre ese fenómeno. Estos tipos de sedimentación pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Tabla 16: Tipos de sedimentación. Lozano, (2012).

| TIPO DE SEDIMENTACIÓN | CARACTERÍSTICAS DE LOS SÓLIDOS | CARACTERÍSTICAS DE LA SEDIMENTACIÓN | TIPOS DE UNIDADES DE TRATAMIENTO |
|---------------------------------|--|---|---|
| I De partículas discretas | Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas | Cada partícula sedimenta de forma independiente sin interacción entre ellas ni con el fluido que las contiene | Desarenadores, dársenas de sedimentación o presedimentadores |
| II De partículas floculentas | Partículas (coloides) floculentas o aglomerables | Las partículas se van aglomerando formando coágulos o flóculos de mayor tamaño y peso | Sedimentadores de agua potable (con coagulación-floculación previas) y decantadores de aguas residuales |
| III Zonal o interferida | Suspensiones de sólidos aglomerables de concentración intermedia | La sedimentación es interferida dada la cercanía entre partículas y se comportan como un bloque | Sedimentadores y decantadores de flujo ascendente y de manto de lodos |

| | | | |
|--|---|--|--|
| <p style="text-align: center;">IV Por compresión</p> | <p style="text-align: center;">Suspensiones de alta concentración</p> | <p>Las partículas están en contacto íntimo entre ellas y su peso forma una masa compactada en el fondo de las unidades</p> | <p>Compactación de lodos en sedimentadores y en unidades de espesamiento de aguas residuales</p> |
|--|---|--|--|

Los decantadores son unidades grandes, debido a los altos tiempos de retención hidráulica que emplean. Después del proceso de decantación, queda como producto agua residual clarificada y un lodo o fango primario.

En casos excepcionales, la decantación primaria es el único proceso de depuración que se le realiza al agua, siempre y cuando la legislación lo permita y el efluente cumpla con los niveles de remoción establecidos. Sin embargo, la práctica muestra que, aunque un tratamiento primario logre cumplir con la normativa ambiental, la calidad del efluente podrá causar impactos relevantes a los ecosistemas hídricos. Por esta razón, el tratamiento primario suele ser parte de un proceso más extenso, acompañado, al menos, de tratamientos biológicos que reduzcan los niveles de carga contaminante.

Los decantadores que se usan en el tratamiento de las aguas residuales pueden clasificarse en:

- Circulares: el agua ingresa ascendiendo por el centro y es recogida en un canal perimetral.
- Rectangulares: el agua ingresa por un extremo y es extraída por el opuesto.

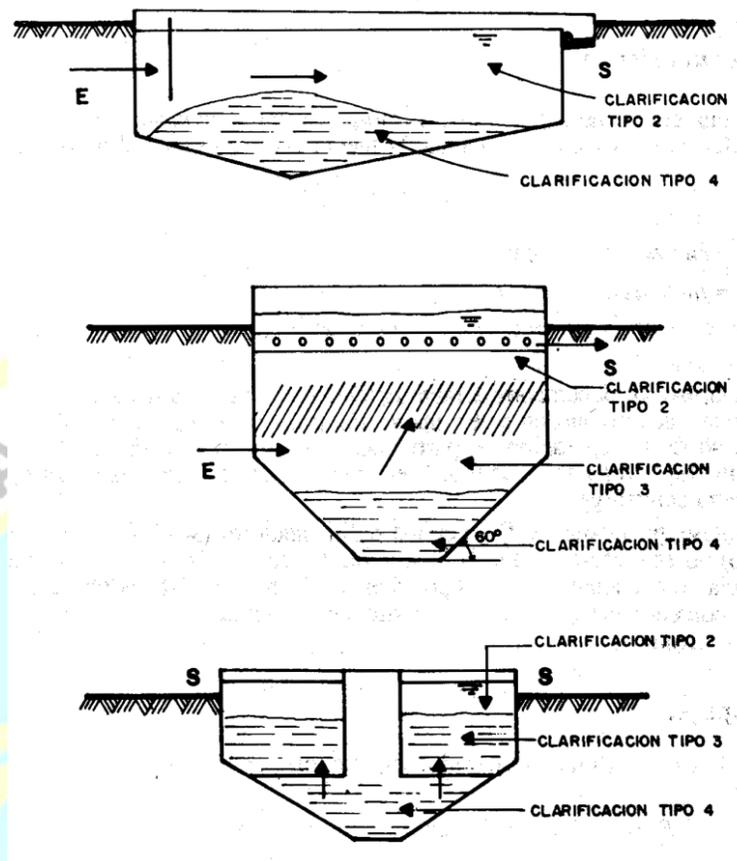


Ilustración 20: Tipos de sedimentación para diferentes unidades. Arboleda Valencia, (2000).

B. Decantadores circulares

Los decantadores circulares son de mayor uso, debido a que facilitan las labores de mantenimiento y purga de fangos. Tienen un diámetro que oscila entre los 10 y los 60 m. El agua ingresa mediante una campana deflectora ubicada en el centro de la unidad que obliga a que lo haga por la parte baja y, además, funciona como atenuadora de la energía de flujo, eliminando turbulencias que pueden afectar la decantación de las partículas.

El agua es recogida por un canal perimetral dentado, para asegurar una salida homogénea del efluente clarificado en cada metro lineal de la periferia del tanque. Adicionalmente, se coloca, también, antes de la salida del agua, una

lámina o pared deflectora que evita que salga la porción más superficial del agua, la cual acarrea sólidos, espumas y otros objetos flotantes.

El sistema de barrido de fangos se realiza a través de un puente móvil que se moviliza lentamente por todo el decantador y que tiene en su fondo unas rasquetas que empujan los lodos hacia la poceta de fangos, la cual se encuentra ubicada en el centro del tanque circular. Además, este mismo puente tiene en su superficie una lámina, conocida como desnatador, que arrastra el material flotante hasta la tolva de grasas o colector de espumas.

C. Decantadores rectangulares

Son mucho menos utilizados que los circulares. El ingreso del agua residual se hace por medio de un vertedero con un deflector frontal que permite el ingreso por la parte baja de la unidad y aplaca la energía del flujo. Para la salida del efluente, en el extremo opuesto, se emplea un vertedero dentado. Los lodos y las natas son empujados por unas rasquetas adosadas a un puente móvil que se mueve a lo largo de la unidad. Otra opción es el uso de rasquetas movidas por una cadena sinfín.

2.2.1.3.2 Tamices

Por el tamaño de las aberturas que manejan este tipo de unidades, no es conveniente su uso con aguas residuales brutas que traen consigo gran cantidad de elementos gruesos y/o arenas. Aunque varios autores clasifican los tamices como unidades de pretratamiento, los pequeños tamaños de poro que manejan estas unidades permiten la eliminación de una parte importante de materia orgánica suspendida; por esta razón, el autor considera que los tamices pueden ser clasificados, también, como una unidad de tratamiento primario, útil en la depuración de aguas residuales de tipo industrial.

Los tamices manejan tamaños de abertura entre 0,2 y 3 mm. Están hechos de un tejido de hilos de acero inoxidable, cuya disposición asegura una

superficie que prácticamente no se obstruye y que tiene un alto poder de filtrabilidad. Los tamices pueden clasificarse en:

- Estáticos
- Giratorios

Los tamices pueden sustituir los decantadores primarios en aguas residuales industriales de procesos como:

- Industria de alimentos en general.
- Industrias de lácteos.
- Ingenios azucareros.
- Destilerías.
- Industrias de bebidas no alcohólicas.
- Frigoríficos.
- Industria de papel.

A. Tamiz estático

Los más utilizados son los curvos. Comúnmente posee una inclinación de unos 25° respecto de la vertical. El agua ingresa por la parte superior y, mientras los sólidos quedan atrapados en la superficie, el agua se cuela atravesando el tamiz, para ser recogida por la parte baja. El material detenido se va deslizando, por la acción del agua y del nuevo material retenido, hacia el extremo inferior, en donde cae a una tolva.

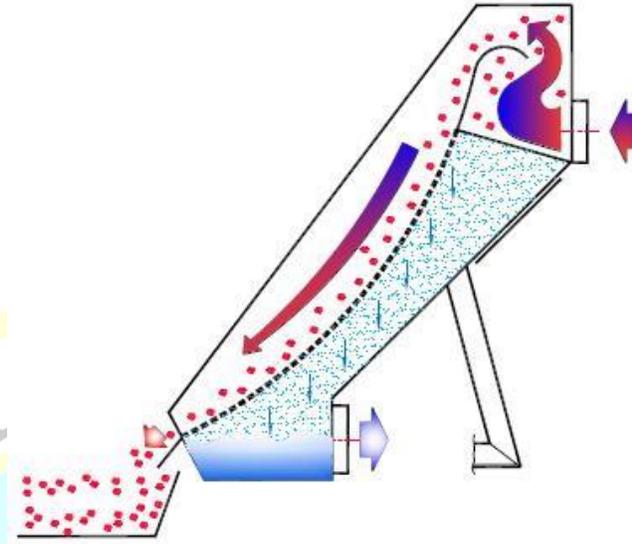


Ilustración 21: Corte de un tamiz estático. Imagen tomada de:
http://www.vismec.co.th/images/sub_1224054424/STATICcapture1.jpg



Ilustración 22: Tamiz estático. Imagen tomada de:
[http://www.plantasdetratamiento.com.mx/userfiles/image/pre4\(1\).jpg](http://www.plantasdetratamiento.com.mx/userfiles/image/pre4(1).jpg)

B. Tamiz rotatorio

Este tipo de tamices poseen un tambor filtrante y un cuerpo de filtro, en acero inoxidable, sobre el cual se monta el tambor. Dispone de una rasqueta que elimina los sólidos retenidos en la superficie del tambor.

Los tamices rotatorios tienen una mayor capacidad de tratamiento por metro lineal, que los tamices estáticos (cerca de unas 2,5 veces más), pero corren con la desventaja de ocasionar un mayor gasto energético y más desgaste de las piezas.



Ilustración 23: Tamiz rotatorio. Imagen tomada de: <http://www.aguamarket.com/sql/productos/fotos/TR%206100%20funcionando.jpg>

C. Selección del tamiz

La selección de este tipo de unidades se hace a partir de las diferentes alternativas que ofrecen los fabricantes y de las características propias del diseño del tamiz. Y para tener una referencia se plantea unos valores indicativos de la capacidad de tamizado de estas unidades, en las siguientes tablas:

Tabla 17: Capacidad de trabajo de los tamices estáticos. Lozano, (2012).

| ABERTURA DE TAMIZ (mm) | CAUDAL TRATADO POR METRO LINEAL (m³/h) |
|-----------------------------------|--|
| 0.15 | 15 |
| 0.25 | 20 |
| 0.50 | 40 |
| 0.75 | 50 |

| | |
|------|-----|
| 1.00 | 60 |
| 1.50 | 75 |
| 2.00 | 90 |
| 2.50 | 100 |
| 3.00 | 110 |

Tabla 18: Capacidad de trabajo de los tamices rotatorios. Lozano, (2012).

| ABERTURA DE TAMIZ (mm) | CAUDAL TRATADO POR METRO LINEAL (m³/h) |
|-----------------------------------|--|
| 0.15 | 30 |
| 0.25 | 50 |
| 0.50 | 90 |
| 0.75 | 120 |
| 1.00 | 145 |
| 1.50 | 180 |
| 2.00 | 210 |
| 2.50 | 240 |

2.2.1.3.3 Decantador primario

Estas unidades pueden alcanzar niveles de remoción de entre 25 y 40% para DBO y entre 50 y 70% para SST. Los decantadores primarios se componen de:

- Tanque decantador.
- Estructuras de entrada y salida del agua.
- Puente (móvil) del decantador.
- Dispositivos de eliminación y extracción de flotantes.
- Dispositivos de extracción de fangos.

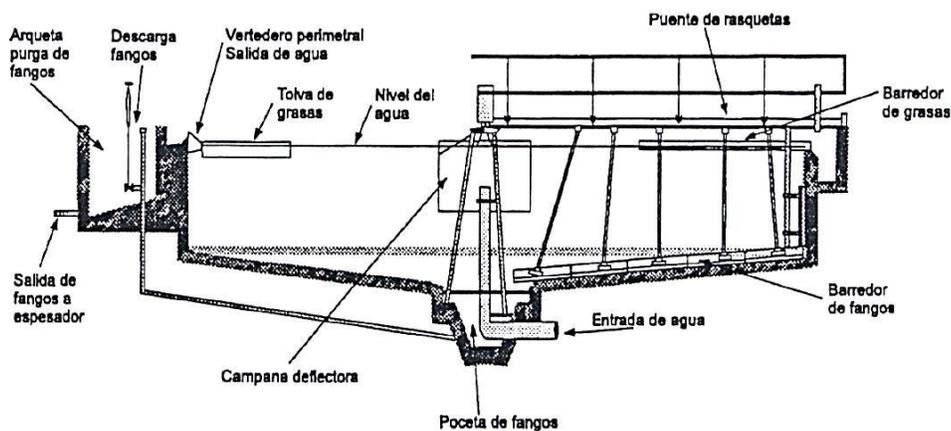


Ilustración 24: Corte de un decantador primario. Imagen tomada de: <http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/tratam1/decantacion.htm>



Ilustración 25: Decantador vacío. Se aprecia la campana deflectora, la poceta de fangos, el puente móvil con las rasquetas (barredor de fangos) y el desnatador (barredor de grasa).

Los criterios de diseño del decantador primario se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 19: Criterios de diseño para decantadores primarios circulares. Lozano, (2012)

| PARÁMETRO | VALOR O RANGO |
|--------------------------------------|---|
| Tiempo de retención hidráulica (TRH) | 2 a 3 horas (sin tratamiento secundario posterior y a caudal punta) |

| | |
|---|---|
| | 1 a 2 horas (con tratamiento biológico posterior y a caudal punta) |
| Carga superficial | 2 a 3 m ³ /m ² *h (a caudal punta) |
| Capacidad de tratamiento de cada unidad | < 0.25 m ³ /s (a caudal medio) |
| Carga sobre el vertedero | < 40 m ³ /h*m linela del vertedero perimetral (a caudal punta) |
| Profundidad del decantador (en la vertical del vertedero de salida) | 2.5 a 4.0 m |
| Pendiente de fondo hacia la poceta de fangos | 2 a 8 % |
| Relación diámetro/altura | 5 a 16 |
| Diámetro de la campana deflectora | 15 a 20 % del diámetro del decantador |
| Altura de la campana deflectora | 33 a 20 % de la profundidad del decantador |
| Velocidad máxima perimetral del puente del decantador | < 120 m/h |
| Características de la poceta de fangos | Tronco – cono invertido con una pendiente aprox. de 1:12 |
| | Capacidad de almacenamiento de lodos generados: entre 1 y 5 horas |

Se calcula una producción de natas y flotantes de 5 mg/m³ de agua tratada, con una concentración de 6 g/L.

La producción de fangos para decantadores, se calcula de la siguiente manera:

$$V_{lodos} = \frac{C_{SST} \times E}{C_f}$$

Donde:

V_{lodos} : Volumen de lodos (L/d considerando una densidad de 1 kg/L)

C_{SST} : carga de sólidos suspendidos totales (kg/d)

E: coeficiente de reducción de sólidos en el decantador

C_f : coeficiente de concentración de lodos en el decantador (3 a 7% para sólidos almacenados en pocetas y 1 a 2% cuando se hace extracción por succión).

2.2.1.3.4 Decantación asistida químicamente

Los decantadores empleados para el Tratamiento Primario Químicamente Asistido (TPQA) tienen idéntica configuración y funcionamiento que los decantadores convencionales, sin embargo, con la ayuda de sales coagulantes, las cuales promueven o facilitan la aglomeración de flóculos o coágulos de mayor tamaño y peso, se pueden alcanzar niveles de remoción de entre 60 y 80% para DBO y entre 65 y 85% para SST.

Aunque su uso no es muy común en las depuradoras municipales, se suele usar en instalaciones que sólo cuentan con tratamiento primario, con el fin de alcanzar los niveles de remoción impuestos por la autoridad ambiental. De igual manera, algunos vertidos industriales que tienen altas cargas de coloides y otras sustancias de difícil remoción por gravedad, deben ser tratados con asistencia química.

En algunas depuradoras se acondiciona una estructura al interior del mismo decantador para realizar la coagulación-floculación. Sin embargo, lo más común es emplear el llamado “serpentin de mezcla”.



Ilustración 26: Serpentín de mezcla. Imagen tomada de: <http://ptecdaf.com/images/floculator.png>

Para el correcto funcionamiento de la sal coagulante, es necesario controlar el pH. En la siguiente tabla se exponen los rangos óptimos de pH para la actuación eficiente de los coagulantes más comunes.

Tabla 20: Rangos óptimos de pH para aplicación de coagulantes. Lozano, (2012).

| SAL COAGULANTE | pH ÓPTIMO |
|-------------------------------------|---------------------|
| Cloruro férrico (FeCl_3) | 4,0 a 11,0 unidades |
| Sulfato férrico | 3,5 a 11,0 unidades |
| Policloruro de aluminio (PAC) | 5,5 a 9,0 unidades |



Ilustración 27: Tratamiento primario químicamente asistido. En primer plano, el serpentín de mezcla. Imagen tomada de: <http://prechistvatelni-valgeo.com/wp-content/uploads/2011/02/DAF12.jpg>

2.2.1.3.5 Manejo de residuos de pretratamiento y de lodos primarios

A. Residuos del pretratamiento

Para facilitar su transporte, los residuos retirados del pozo de muy gruesos y del cribado, deben colarse y compactarse mediante el uso de prensas hidráulicas o mecánicas.

La arena extraída en forma manual de los canales de desarenado, no es reutilizable; por esta razón, debe ser enviada a un relleno sanitario junto con los residuos deshidratados del pozo de muy gruesos y del cribado.

Para el caso de desarenadores aireados y desarenadores-desengrasadores, cuya extracción de arenas se realiza por bombeo continuo, el extraído debe llevarse depósitos de poca profundidad en donde la arena se deposita en el fondo y el agua se extrae por rebose y es regresada a la entrada del desarenador nuevamente. Otra opción es el retiro mediante un tornillo de Arquímedes, el cual permite la extracción de la arena en seco o, también, a través de un hidrociclón equipado de un tornillo sinfín.

La arena se lleva a unos contenedores para su posterior disposición. En algunas instalaciones lavan las arenas antes de su almacenamiento temporal en unos lavadores tipo Geiger. Esto evita la aparición de malos olores.



Ilustración 28: Lavador de arenas tipo Geiger. *Imagen tomada de:*
http://img.directindustry.es/images_di/photog/planta-de-lavado-de-arenas-539813.jpg

B. Lodos de tratamiento primario

Estos lodos tienen una consistencia limosa y una coloración entre marrón y grisácea. Por su alto contenido de materia orgánica se descomponen con facilidad, causando malos olores.

Cuando se hace tratamiento primario químicamente asistido (TPQA), se obtienen lodos de color negro con menos tendencia a la putrefacción y, por ende, con menos olor que los del tratamiento convencional.

Las características generales de los lodos primarios se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 21: Características típicas de los lodos de decantación primaria. Lozano, (2012).

| PARÁMETRO | VALORES TÍPICOS |
|---|------------------|
| SST (g/hab*d) | 30 a 38 |
| Contenido de agua (%) | 92 a 96 |
| Fracción orgánica (medida como % de sólidos suspendidos volátiles – SSV en base seca) | 70 a 80 |
| Grasas (% base seca) | 12 a 15 |
| Proteínas (% base seca) | 4 a 15 |
| Carbohidratos (% base seca) | 8 a 12 |
| pH | 5,0 a 7,0 |
| Fósforo (% base seca) | 0,5 a 1,5 |
| Nitrógeno (% base seca) | 2,5 a 5,0 |
| Patógenos (NMP/100 mL) | 1000 a 1.000.000 |
| Parásitos (NMP/100 mL) | 8 a 15 |
| Metales pesados (% base seca de Zn, Pb y Cu) | 0,5 a 3 |
| Poder calorífico (kcal/kg) | 4000 a 5000 |



Ilustración 29: Tratamiento de lodos de una depuradora. *Imagen tomada de:*
<http://www.hawaiireporter.com/wpcontent/uploads/2011/08/Screen-shot-2011-08-02-at-7.36.03-AM.png>

2.2.1.4 Fundamentos del tratamiento biológico

Según Lozano, (2012). El tratamiento biológico de las aguas residuales (TBA) se entiende como la eliminación de contaminantes mediante la actividad biológica de los microorganismos presentes en los reactores. De esta manera se removerán sustancias orgánicas biodegradables, partículas coloidales y contaminantes disueltos, entre otros, convirtiéndolos en gases y en biomasa (nuevas células), separable por sedimentación. (p.85)

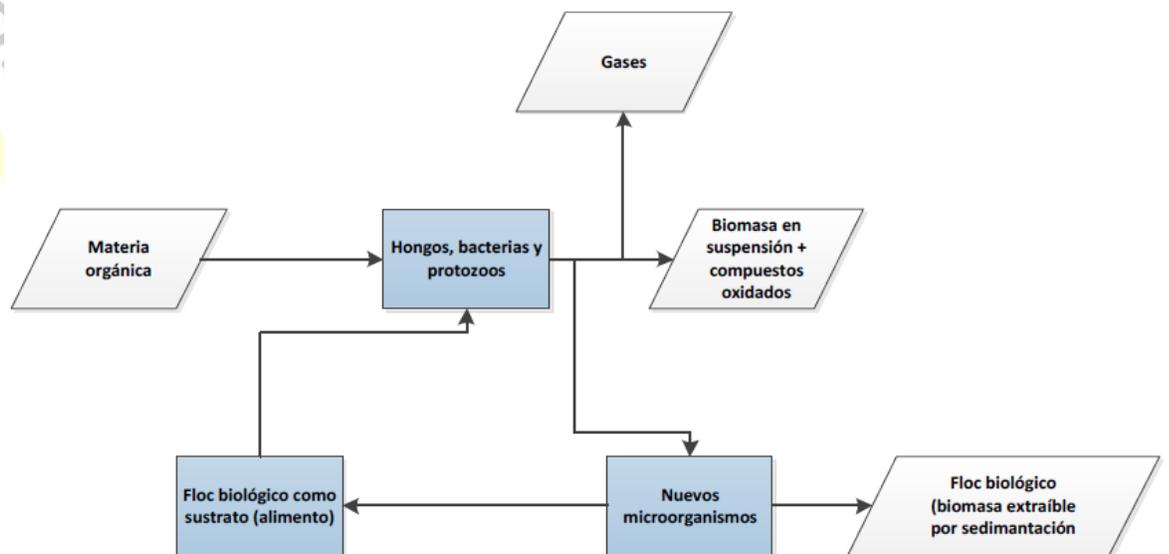


Ilustración 30: Descomposición biológica de la materia orgánica. Lozano, (2012)

En este capítulo se presentan los fundamentos de la aireación, los equipos aireadores más usados en la depuración biológica del agua, los principios que rigen la depuración biológica, las herramientas de control de dichos principios y los modelos de reactores existentes en el esquema de tratamiento biológico de las aguas residuales (TBAR).

2.2.1.4.1 Teoría de la aireación

El proceso de aireación se trata de poner el agua en contacto íntimo con el aire. Para los procesos de tratamiento de aguas residuales, el objetivo principal de la aireación es el de proporcionarle a los microorganismos el oxígeno necesario para que realicen sus procesos de transformación y degradación de la materia orgánica contaminante. De igual manera, la aireación permite:

- Transferir oxígeno disuelto.
- Remover sustancias volátiles.
- Eliminar anhídrido carbónico (CO₂).
- Remover ácido sulfhídrico (H₂S).
- Remover hierro (Fe) y Manganeseo (Mn).
- Eliminar gas metano (CH₄), gas cloro (Cl₂) y amonio (NH₄).

Los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales requieren concentraciones de oxígeno entre 0,2 y 2,0 mg/L. Los requerimientos de la mezcla son los que determinarán la potencia necesaria de los equipos de aireación empleados.

A. Teoría de la doble capa

En la interface entre el líquido (agua residual) y el gas (aire u oxígeno) se forma una película a través de la cual se transfiere el gas hacia el líquido por difusión molecular. La cantidad de gas transferido por unidad de tiempo (coeficiente de transferencia) es un valor constante a través de cada película y es dependiente del tipo de aireador y de la geometría del tanque de aireación.

Ilustración 31: Teoría de la doble capa de difusión molecular gas-líquido. Lozano, (2012).



El coeficiente de transferencia de oxígeno depende del valor de saturación de oxígeno en el agua residual, el cual corresponde al valor de saturación de oxígeno en el agua limpia, afectado por un factor de corrección “ β ”. Los valores de saturación de oxígeno “ C_s ” en el agua limpia a diferentes temperaturas se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 22: Valores de concentración de saturación de oxígeno en agua limpia a 1 atmósfera de presión (760 mm Hg). Lozano, (2012).

| Temperatura (°C) | “ C_s ” Oxígeno Disuelto (mg/L) | Temperatura (°C) | “ C_s ” Oxígeno Disuelto (mg/L) |
|------------------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| 0 | 14,62 | 18 | 9,54 |
| 5 | 12,80 | 19 | 9,35 |
| 7 | 12,17 | 20 | 9,17 |
| 8 | 11,87 | 21 | 8,99 |
| 9 | 11,59 | 22 | 8,83 |
| 10 | 11,33 | 23 | 8,68 |
| 11 | 11,08 | 24 | 8,53 |
| 12 | 10,83 | 25 | 8,38 |
| 13 | 10,60 | 26 | 8,22 |

| | | | |
|----|-------|----|------|
| 14 | 10,37 | 27 | 8,07 |
| 15 | 10,15 | 28 | 7,92 |
| 16 | 9,95 | 29 | 7,77 |
| 17 | 9,74 | 30 | 7,63 |

Para determinar el valor de concentración de saturación para un agua residual “C_{sw}”, debe tomarse el valor de concentración de saturación del agua limpia “C_s” y afectarse por el factor de corrección “β”, el cual oscila entre 0,92 y 0,98, de manera que:

$$C_{sw} = \beta \cdot C_s$$

Para presiones distintas a 1 atmósfera (760 mm Hg):

$$C_{sw}(PL) = \frac{\beta \cdot 9,2 \cdot (PL - PV)}{760 - PV}$$

Donde,

β : factor de corrección para aguas residuales, entre 0,92 a 0,98

PL : presión Local Atmosférica o Barométrica (mm Hg)

Pv : presión de Vapor de Agua (mm Hg, en tablas)

El coeficiente de transferencia de oxígeno puede ser medido en pruebas de laboratorio, así:

- Tomar entre 2 y 200 L de agua potable, se lee su OD y se desoxigena con Sulfito de Sodio (12 mg/L por mg/L de OD) y 0,04 mg/L de Cloruro de Cobalto (catalizador). También se logra burbujeando gas nitrógeno.
- Con el oxígeno disuelto en cero, encender los agitadores o burbujeadores (de velocidad o volumen constante) y registrar los incrementos de oxígeno en función del tiempo de aireación, hasta que el oxígeno disuelto se estabilice (este corresponderá al valor de saturación).
- Graficar el Logaritmo de la concentración de saturación de oxígeno “Log C_s”, dividido por la concentración de saturación de oxígeno menos el valor de oxígeno disuelto a diferentes intervalos de tiempo “C_s-C”, contra el tiempo:

$$\frac{\log C_s}{C_s - C} \text{ vs Tiempo}$$

- Calcular el valor de la pendiente de la recta obtenida y estimar el coeficiente de transferencia “ K_{La} ” considerando que:

$$K_{La} = \text{Pendiente} \cdot 2,3$$

Hasta aquí, sólo se ha calculado el Coeficiente de Transferencia del equipo aireador, cuyo fabricante, de hecho, lo pone en las especificaciones del equipo. No obstante, este coeficiente dado por el fabricante corresponde a un ensayo de laboratorio con agua potable, a 20 °C y 1 atmósfera de presión, por lo tanto, el valor de K_{La} debe corregirse para las condiciones de operación con aguas residuales.

El fabricante también proporcionará el valor de “N”, el cual corresponde a la capacidad nominal (en condiciones estándar) de oxigenación del equipo, cuyas unidades son kilogramos de oxígeno por hora (kg O₂/h). Este valor permite estimar la cantidad de aire suministrada “R” por el equipo aireador, así:

$$R = \frac{N}{n' \cdot hd \cdot C_A}$$

Donde,

R : cantidad de aire suministrada (m³/h)

N : capacidad nominal de oxigenación del equipo (kg O₂/h)

n' : tasa de absorción específica (es igual a 0,044, quiere decir que sólo un 4,4% del aire se disuelve, el resto escapa hacia la atmósfera)

hd : sumergencia o profundidad a la que se instalan los difusores (m)

C_A : concentración de O₂ en el aire (es igual a 0,28 kg/m³ para condiciones estándar)

Para estimar una potencia teórica debe considerarse entre 1 y 2 kilogramos de oxígeno por horse-power (potencia⁷) y por hora: 1 a 2 kg de O₂/hp*h.

2.2.1.4.2 Equipos aireadores

Los tipos de equipos de aireación más empleados en el tratamiento de aguas residuales, son:

- Sistemas de Aireación Difusa o Aire Comprimido.
 - Equipos difusores
- Sistemas de Aireación Superficial

- Equipos de flujo Radial
- Equipos de flujo Axial
- Equipos aspirantes
- Rotores horizontales o cepillos
- Sistemas de Turbina
 - Equipos de turbina sumergida

A. Sistemas de aireación difusa o por aire comprimido

La aireación difusa es la inyección de gas, aire u oxígeno, bajo presión, por la parte inferior de la superficie libre del fluido. Esta técnica se realiza a través de medios porosos conocidos como difusores, que producen burbujas de diámetros muy pequeños. Los preferidos son los de poro fino (2 a 5 mm), seguidos por los de poro semifino (6 a 10 mm) y los de burbuja gruesa (>10 mm).



Ilustración 32: Difusores de un reactor biológico de lodos activados. Imagen tomada de: http://www.brightwaterfli.com/files/20050331052309_Aeration-001.jpg

Pueden transferir de 0,3 kg O₂/kW*h a 1,2 kg O₂/kW*h, se usan, especialmente en depuradoras pequeñas con tanques de profundidades entre 2,5 y 5,0 m, con anchos entre 3 a 9 metros. La relación ideal ancho/profundidad de estos tanques debe de ser menor a 2, con el fin de asegurar una aireación efectiva y una mezcla apropiada.



*Ilustración 33:Detalle de un disco difusor. Imagen tomada de:
<http://pic.pimg.tw/twtechtexil2011/985f54070544389b30601f5236733e0b.jpg>*

B. Sistemas de aireación superficial

Estos pueden ser de flujo radial (baja velocidad), axial (alta velocidad), equipos aspirantes o cepillos (rotores horizontales).



*Ilustración 34: Aireador superficial de flujo radial. Imágenes tomadas de:
http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/surface-aerator-for-wastewater-treatment-560483.jpg y de <http://image.made-in-china.com/2f0j00lBsakbVKnMgp/Wastewater-Treatment-System-WastewaterAerator-LY-1-.jpg>*

Los equipos de flujo radial usan velocidades de operación entre 20 a 100 rpm (revoluciones por minuto), con potencias hasta de 150 kW. Pueden ser fijos o flotantes. La capacidad de transferencia oscila entre 1,5 y 2,0 kg O₂/kW*h.

Los equipos de flujo axial se usan mucho en lagunas aireadas, las cuales tienen bajas profundidades. Estos equipos consumen menos energía que los radiales. Se encuentran con potencias hasta de 93 kW y tienen capacidades de transferencia entre 0,7 y 1,4 kg O₂/kW*h. Generan una mejor mezcla en los tanques de aireación.

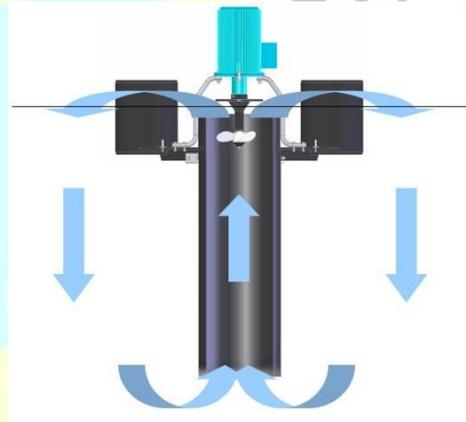


Ilustración 35: Aireador de flujo axial. Imagen tomada de:

<http://www.thewatertreatments.com/wpcontent/uploads/2009/10/surface-aerator.jpg>

Los equipos aspirantes poseen un eje hueco con un motor en un extremo y una hélice en el otro. El aire se aspira desde la atmósfera y se inyecta al agua. Tienen inclinación variable y suelen instalarse sobre soportes flotantes. Su capacidad de transferencia va de 0,5 a 0,8 kg O₂/kW*h.

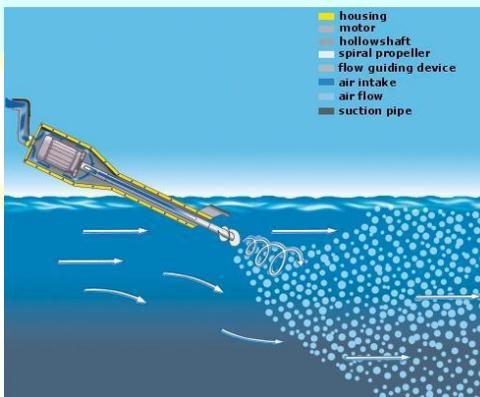


Ilustración 36: Equipo aspirante. Imagen tomada de:

http://www.isma.fr/images/aerateur/photo1_anglais.jpg

Los cepillos de aireación se emplean en zanjones de oxidación. La tasa de oxigenación oscila entre 1,5 y 2,0 kg O₂/kW*h. Para asegurar una buena mezcla el volumen del zanjón debe ser inferior a 200 m³/m de rotor.



Ilustración 37: Cepillo de aireación en un zanjón de oxidación. Imagen tomada de: http://www.cstwastewater.com/upload/images/CoolahShire_BrushAerators.jpg

C. Sistemas de turbina sumergida

Aunque tienen un volumen o área de influencia menor que los aireadores superficiales, tienen altas capacidades de transferencia de oxígeno que oscilan entre 1,0 y 2,0 kg O₂/kW*h. Los diámetros de turbina suelen ser entre 0,1 y 0,2 veces el ancho del tanque para depósitos con alturas entre 5 y 6 metros.

2.2.1.4.3 Teoría de la depuración biológica

El principio del tratamiento biológico de las aguas residuales (TBAR) es análogo al de la autopurificación de las aguas. En las depuradoras, estos fenómenos se hacen en reactores que mantienen los microorganismos en condiciones controladas, acelerando así el proceso de descomposición y la neutralización de la materia orgánica.

En la depuración biológica se presentan múltiples reacciones de tipo bioquímico que transforman la materia orgánica, los nutrientes y otros compuestos (e.g. sulfuros, metales) en elementos más simples y de mayor estabilidad; este proceso se conoce como oxidación biológica y en él, se realiza una conversión de los elementos orgánicos a formas inorgánicas

altamente oxidadas (mineralización). Estas reacciones pueden efectuarse mediante un proceso:

- Aerobio: en presencia de oxígeno disuelto.
- Anaerobio: en ausencia de oxígeno disuelto y de nitratos

Igualmente, cada uno de estos procesos puede llevarse a cabo con la biomasa (microorganismos):

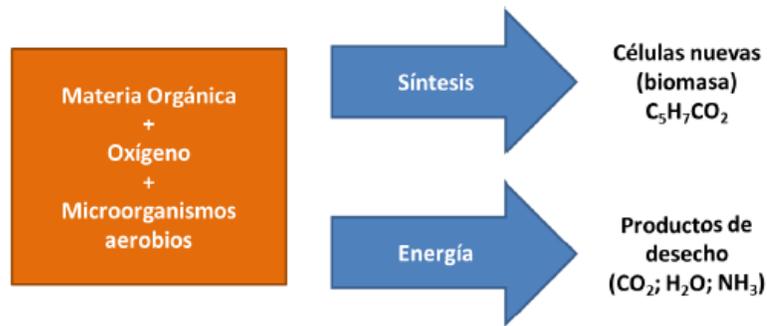
- Adherida
- En suspensión

En el TBAR, los microorganismos (biomasa) emplean las sustancias suspendidas o disueltas, presentes en las aguas residuales, para incorporarlas a su metabolismo en los procesos de obtención de energía y síntesis celular (generación de nuevas células). Toda oxidación, incluyendo la mineralización u oxidación biológica, implica una transferencia de electrones entre un donador (sustancia reductora) y un aceptor de electrones (sustancia oxidante). En el TBAR, la materia orgánica es la donante de electrones para los organismos vivos; no obstante, elementos inorgánicos reducidos como amoníaco, sulfuros, hierro ferroso e hidrógeno molecular se comportan, para las bacterias, como donantes de electrones, alimento o fuente de energía.

A. Proceso aerobio

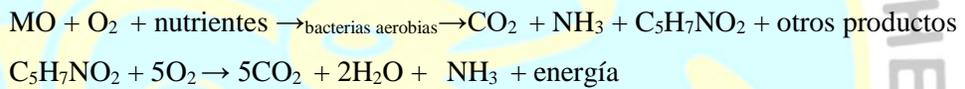
Se considera un proceso de respiración de oxígeno en el que el oxígeno libre es el único aceptor final de electrones. El carbono se oxida y el oxígeno se reduce.

A pesar de la complejidad de este metabolismo microbioal, su representaci3n puede simplificarse como se muestra en la siguiente ilustraci3n:



Ilustraci3n 38: Metabolismo aer3bico de la materia org3nica. Lozano, (2012)

Como se pudo deducir, la mol3cula $C_5H_7CO_2$ representa las bacterias o la biomasa formada; de igual forma, la degradaci3n biol3gica aerobia de la materia org3nica, implica la aparici3n de nitr3geno amoniacal, increment3ndolo en el afluente.



Las bacterias emplear3n el ox3geno disuelto para oxidar la materia org3nica a en anh3drido carb3nico y generar energ3a. En ambas v3as del metabolismo aer3bico de la materia org3nica, se genera nitr3geno amoniacal y se consume el ox3geno disponible en el agua. Estequiom3tricamente, se estima que, para oxidar 1 g de biomasa, se consumen 1,42 g de ox3geno.

B. Proceso anaerobio

Se conoce tambi3n como digesti3n o fermentaci3n anaerobia. En el proceso anaerobio, la mayor parte de la energ3a liberada permanece en los productos finales org3nicos reducidos como el metano; raz3n por la cual, se genera una menor cantidad de biomasa (y de menos lodos) que en el proceso aerobio.

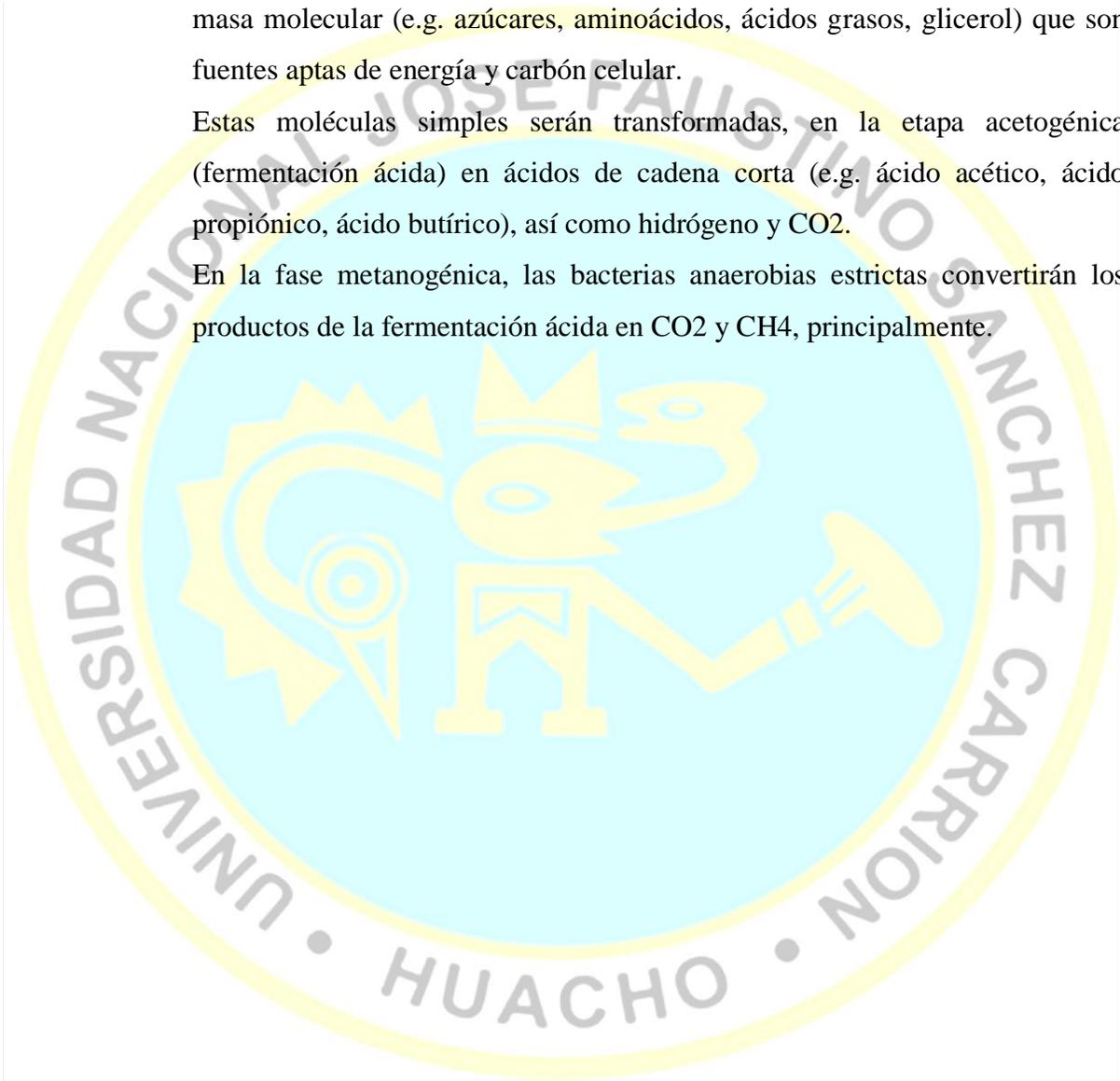
El uso de sulfatos y CO_2 como aceptores de electrones obliga a tener condiciones anaerobias estrictas (ausencia de ox3geno y nitratos), de lo contrario, la formaci3n de metano (CH_4) se ver3 afectada. El proceso anaerobio se puede reducir en tres etapas, de las cuales, las dos 3ltimas ocurren de manera simult3nea:

- Fase hidrolítica
- Fermentación ácida
- Fermentación metanogénica

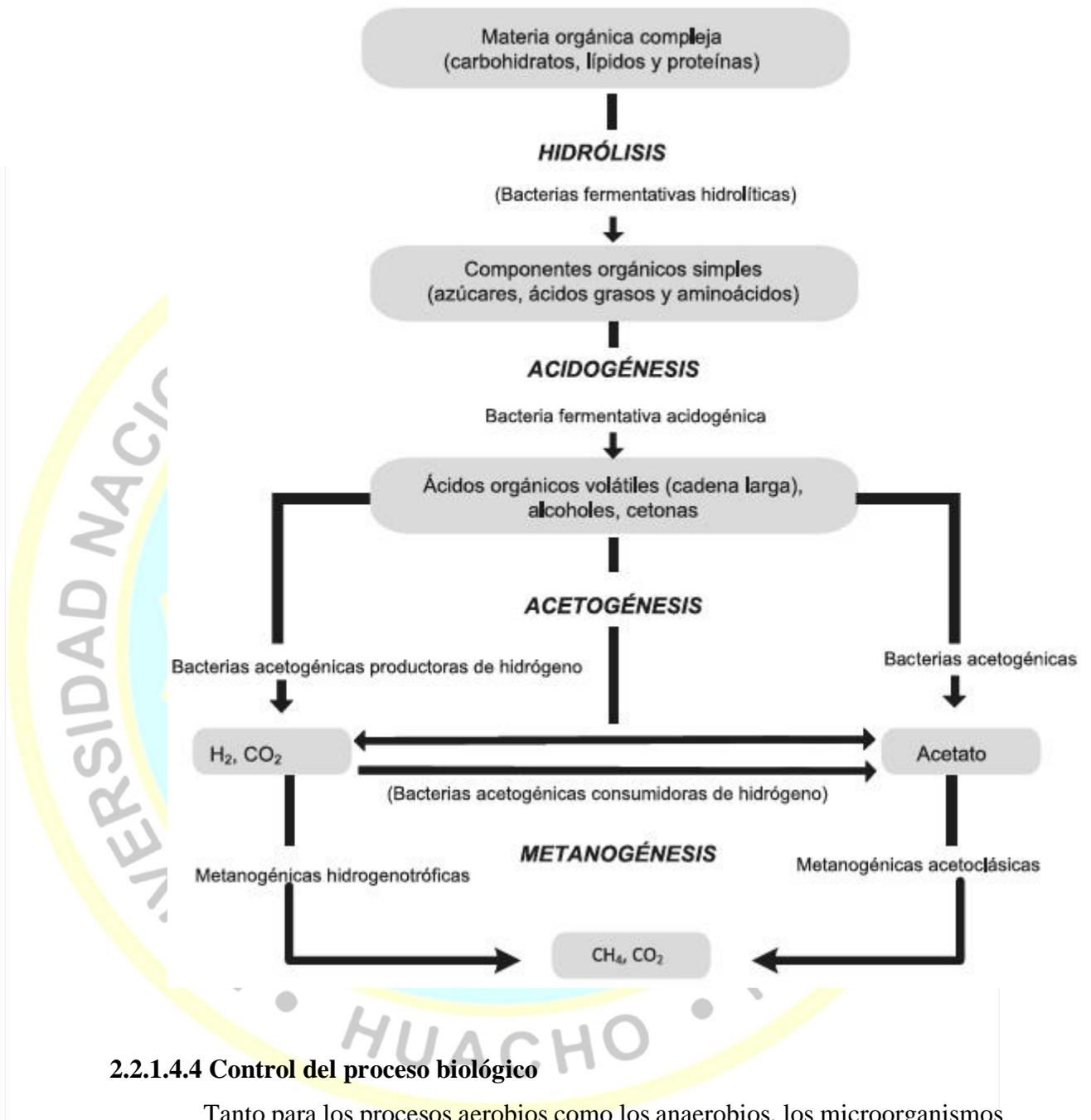
En la primera etapa, las bacterias hidrolíticas transforman enzimáticamente los compuestos complejos (e.g. proteínas, carbohidratos y grasas) en otros de baja masa molecular (e.g. azúcares, aminoácidos, ácidos grasos, glicerol) que son fuentes aptas de energía y carbón celular.

Estas moléculas simples serán transformadas, en la etapa acetogénica (fermentación ácida) en ácidos de cadena corta (e.g. ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico), así como hidrógeno y CO₂.

En la fase metanogénica, las bacterias anaerobias estrictas convertirán los productos de la fermentación ácida en CO₂ y CH₄, principalmente.



Estas etapas se pueden ver ilustradas en la siguiente ilustración:



2.2.1.4.4 Control del proceso biológico

Tanto para los procesos aerobios como los anaerobios, los microorganismos encargados de la mineralización de la materia orgánica se desarrollarán y actuarán de manera óptima siempre y cuando se mantenga, de forma general:

- Nutrientes en cantidad y proporciones apropiadas.
- Inexistencia de compuestos tóxicos o inhibitorios.

- Condiciones ambientales apropiadas (e.g. pH, temperatura).

Los microorganismos requieren carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno (CHON), como nutrientes principales; en menor proporción también demandarán fósforo, azufre, potasio, calcio, hierro, magnesio, zinc y molibdeno. Todos estos nutrientes se encuentran comúnmente en las aguas residuales domésticas y en las municipales o urbanas; no obstante, los efluentes industriales suelen presentar deficiencias en varios de estos elementos.

Una de las relaciones de rendimiento óptimo más empleadas para evaluar la disponibilidad de nutrientes en las aguas residuales, es:

$$\text{DBO/N/P}=100/5/1$$

Otro aspecto a considerar y que dependerá del tipo de reactor y de su modo de operación, es la relación alimento/microorganismo, notada frecuentemente como F/M (del inglés Food/Microorganisms), aunque también se cita en algunos textos como relación A/M. Este valor da cuenta de la fracción en masa de materia orgánica disponible por microorganismo. Algunos compuestos presentes en las aguas residuales son de difícil descomposición por vías microbianas y deben usarse tratamientos fisicoquímicos para su eliminación. La lignina y la celulosa son compuestos extremadamente estables y sólo pueden ser descompuestos por bacterias especializadas. Algunos compuestos tóxicos, como los metales pesados, pueden ser inhibitorios para el crecimiento de los organismos; no obstante, este efecto es muy variable dependiendo de las características de la biomasa, el tipo de proceso y la aclimatación, entre otros factores. Las concentraciones inhibitorias en aguas residuales para algunos compuestos presentes, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 23: Concentraciones inhibitorias de algunos compuestos en procesos de oxidación biológica. Lozano, (2012)

| Parámetro | Concentración inhibitoria (mg/L) | |
|-------------------|----------------------------------|-----------|
| | Aerobia | Anaerobia |
| Aluminio | | 25 |
| Amoniaco | 580 | 1500 |
| Arsénico | | 0,1 |
| Cadmio | 100 | 0,02 |
| Calcio | | 2500 |
| Cianuros | 5 | 1 |
| Cloruros | | 15000 |
| Cobre | 1 | 10 |
| Cromo hexavalente | 2 | 50 |
| Cromo trivalente | 2 | 500 |
| Fenoles | | 180 |
| Hidrocarburos | | 50 |
| Hierro | 20 | 5 |
| Magnesio | 50 | 1000 |
| Mercurio | 0,005 | 1 |
| Níquel | 1 | 2 |
| Nitritos | | 35 |
| Plata | | 1 a 2 |
| Plomo | | 0,1 |
| Potasio | | 2500 |
| Sodio | | 3500 |
| Sólidos disueltos | | 15000 |
| Sulfatos | | 500 |
| Sulfuros | | 100 |
| Vanadio | | 10 |
| Zinc | 5 | 20 |

Las condiciones óptimas para el trabajo bacteriano en los procesos aerobios son:

- Nutrientes suficientes.
- pH entre 6,5 y 8,5.
- Temperatura inferior a 38 °C.
- Presencia de oxígeno.
- Ausencia de sustancias tóxicas.

Las condiciones óptimas para el trabajo bacteriano en los procesos anaerobios son:

- Nutrientes suficientes.
- pH entre 6,5 y 7,6.

- Temperatura entre 30 y 38 °C para organismos mesófilos o entre 50 a 60 °C para organismos termófilos.
- Ausencia de oxígeno.
- Potencial de óxido-reducción (POR) entre -470 a -550 mV.
- Ausencia de sustancias tóxicas.

La producción de biomasa anaerobia es casi 20 veces menor que la que se presenta en los procesos aerobios.

A. Definiciones fundamentales para el control y diseño de los procesos biológicos

En cualquiera de los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales (TBAR), existen conceptos fundamentales que permiten, no sólo verificar el control de la depuración en los reactores, sino también, diseñar o modificar el diseño del reactor.

- Carga Hidráulica “CH”: corresponde al caudal de aguas residuales tratado (\square/t) por unidad de área horizontal del reactor “S”. Puede ser también entendida como una velocidad de tratamiento.

$$C_h(m^3/m^2 \cdot h) \text{ ó } (m/h) = \frac{V(m^3)}{S(m^2) \cdot t(h)}$$

- Carga Másica o Carga Orgánica “CM”: conocida también como Carga Contaminante, es el producto de la concentración de un contaminante “C” y el caudal de aguas residuales vertidas “Q”. Es entendida como el aporte en masa de contaminantes de un vertido.

$$C_M \left(\frac{kg}{dia} \right) = C \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot Q \left(\frac{m^3}{dia} \right)$$

- Carga Volumétrica “CV”: es el cociente entre la carga másica (carga contaminante) “CM” por volumen de la unidad de tratamiento (reactor) “V”.

$$C_v(kg/dia \cdot m^3) = \frac{C_M(kg/dia)}{V(m^3)}$$

- Carga Superficial “Cs”: corresponde al cociente entre la carga másica (carga contaminante) “CM” por unidad de área superficial del reactor “S”.

$$C_s(kg/dia.m^2) = \frac{C_M(kg/dia)}{S(m^2)}$$

- Tiempo de Retención Hidráulico (TRH): es el cociente entre el volumen del reactor o unidad de tratamiento “V” por el caudal tratado de aguas residuales “Q”.

$$TRH(dias) = \frac{V(m^3)}{Q(m^3/dia)}$$

- Tiempo de Retención Celular o Edad de Lodo (TRC): es la relación en masa de la cantidad de biomasa existente (microorganismos) en el reactor “M_{exis}”, por la biomasa eliminada “M_{elim}” y por día.

$$TRC(dias^{-1}) = \frac{M_{exis}(kg)}{M_{elim}(kg).t(dias)}$$

2.2.1.4.5 Modelos de reactores y características

El tratamiento de las aguas residuales puede efectuarse en unidades que se clasifican según su forma de alimentación, en:

- Flujo intermitente: conocidos también como de llenado y vaciado, o reactores por cochada, son unidades que se llenan con un volumen de agua residual (etapa de llenado), se tratan estas aguas (etapa de tratamiento) y se vacía (etapa de vaciado) para dar lugar a una nueva carga con otro volumen de aguas residuales. Se usa frecuentemente en aguas residuales industriales, en donde la descarga de efluentes líquidos no se realiza de manera continua, sino en periodos o lapsos del día. Aunque este fue el modelo de reactor que empezó a usarse en los inicios del tratamiento de aguas residuales municipales, el rápido crecimiento de las ciudades obligó a cambiar estos reactores por otros de funcionamiento continuo. También se usa mucho en investigaciones y experimentos de laboratorio debido a la comodidad que supone el no trabajar con flujos constantes de agua.
- Flujo continuo: estos reactores presentan una entrada y salida permanente de caudal y, de manera simultánea, se efectúa el tratamiento de las aguas residuales.

Adicionalmente, se tienen reactores que según su hidráulica de flujo se clasifican en:

- De mezcla completa: podemos imaginar que en estos reactores se tiene una turbina que recorre totalmente el área del tanque, combinando casi instantáneamente las aguas que se encuentran dentro del reactor, con las que están ingresando como afluente. De manera coloquial, es como estar batiendo constantemente el contenido de una olla, balde o vaso, que tiene una entrada y salida constantes de líquido.
- De flujo a pistón: en este reactor, el agua que ingresa como afluente recorre longitudinalmente el tanque, como si se tratase de una pared que se desplaza a una misma velocidad sin mezclarse con el resto del líquido, hasta su salida.

Las características geométricas y el equipo empleado en el reactor, determinarán el tipo de hidráulica predominante en el tanque de reacción. Es fácil imaginar que un tanque de sección circular con una turbina, trabajará como reactor a mezcla completa, mientras que un tanque rectangular, muy alargado, tendrá una hidráulica cercana al flujo a pistón. Estas combinaciones darán lugar a las siguientes tres (3) tipologías básicas de reactores:

- a. Reactor intermitente (a mezcla completa).
- b. Reactor de flujo continuo y mezcla completa.
- c. Reactor de flujo continuo a pistón.

A. Reactor intermitente (a mezcla completa).

Es un sistema cerrado muy empleado para investigaciones y ensayos a nivel de laboratorio. La composición del agua residual cambia en el tiempo, pero se mantiene homogénea en todo el reactor.

B. Reactor de flujo continuo y mezcla completa.

En este reactor el afluente se mezcla de forma casi instantánea y completa con el contenido del reactor, de manera que la dispersión de los materiales es

infinita. En estas condiciones, la concentración de materia orgánica del efluente es exactamente igual a la concentración del licor mezclado del reactor.

C. Reactor de flujo continuo a pistón.

Cada partícula viajará por este reactor sin mezclarse, de forma que se descargará en la misma secuencia y orden en las que entran al reactor: visto de manera coloquial, es semejante a una fila de un banco que es atendida por un solo cajero. En este modelo, el tiempo de retención hidráulica real para cada molécula de agua es idéntico al tiempo teórico. Este reactor es teóricamente (y también en la práctica) más eficiente que los de mezcla completa y ocupará, consecuentemente, menos espacio.

Los microorganismos en los reactores, independientemente de si son aerobios o anaerobios, pueden encontrarse de dos formas:

- Biomasa Suspendida (cultivo en suspensión).

La biomasa se encontrará suspendida (llamada también cultivo en suspensión), cuando los microorganismos no cuentan con ningún medio de soporte sobre el cual adherirse. De manera simple, estos reactores son similares a una piscina en la que los microorganismos “nadan” libremente en todas las direcciones posibles.

- Biomasa Adherida (cultivo fijo).

La biomasa adherida (llamada también cultivo fijo), se presenta cuando los microorganismos se fijan sobre un medio de soporte (e.g. piedras, piezas plásticas, materiales inertes) formando una zooglea o biopelícula (biofilm). La clasificación de los sistemas más usados para el tratamiento de las aguas residuales, se expone en la Ilustración:

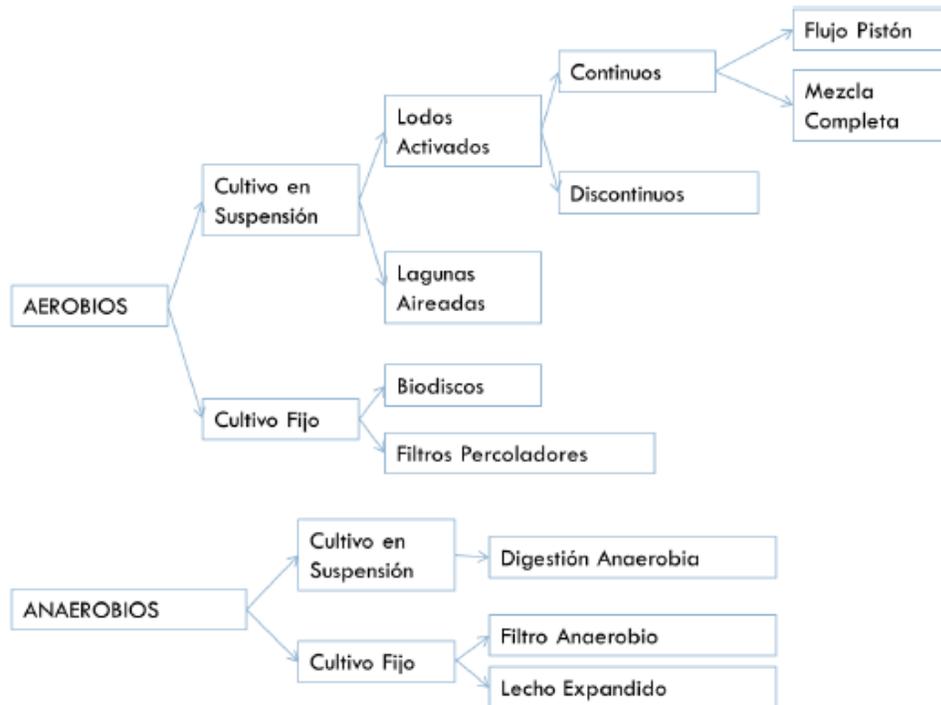


Ilustración 39: Tipos de reactores para el tratamiento de aguas residuales. Lozano, (2012).

2.2.1.5 Tratamiento secundario o biológico

Según Lozano, (2012). Nos dice que el tratamiento secundario, conocido también como depuración o tratamiento biológico de las aguas residuales (TBAR), es entendido como la eliminación de contaminantes mediante la actividad biológica de los microorganismos presentes en los reactores.

La materia orgánica en suspensión y disuelta es convertida, mediante procesos de oxidación química, en biomasa y sólidos inorgánicos sedimentables. Como ya se ha visto en los capítulos anteriores, mientras que en el tratamiento primario se remueven sólidos en suspensión y, por ende, buena parte de la DBO suspendida, el tratamiento secundario o biológico busca remover, especialmente, la DBO soluble y los remanentes de materia en suspensión que escaparon del tratamiento primario.

Aunque el tratamiento secundario es capaz de remover DBO y SST en valores cercanos al 85%, no eliminará significativamente nutrientes (N y P), ni metales pesados, ni patógenos, los cuales deben ser removidos posteriormente. Las unidades convencionales de tratamiento biológico más empleadas en nuestro medio, son los lodos activados y los filtros percoladores, los cuales se tratarán en este capítulo; como

tecnologías no convencionales, en Colombia y en Latinoamérica, se usan de manera extensiva las lagunas aireadas y de estabilización, las cuales serán expuestas en el Capítulo 9 (Tecnologías Blandas). En menor proporción se utilizan también los biodiscos o contactores biológicos rotativos (CBR).(p.103)

2.2.1.5.1 Lodos activados

El reactor de lodos activados mantiene suspendido a un cultivo microbiano en condiciones aerobias. Este proceso hace uso del sistema de aireación, el cual suministrará el oxígeno que demandan las bacterias, evitará que haya asentamiento de la biomasa en el reactor y, además, mantendrá homogeneidad del licor mezclado en el tanque.

Una vez que la materia orgánica ha sido oxidada, el efluente se envía a un sedimentador secundario en donde se separará el fango (biomasa) del agua. Parte de esta biomasa decantada es recirculada al reactor con el fin de mantener en él una buena concentración de microorganismos y otra parte se desecha (purga), llevándola a tratamiento de lodos, evitando así acumulaciones excesivas de microorganismos en el sistema que pueden alterar los tiempos de retención celular.

Una de las preguntas recurrentes de los estudiantes es ¿a qué se le llama exactamente “lodo activo”? una respuesta corta y sencilla es que el lodo activo es la suma de la biomasa formada en el reactor y los sólidos suspendidos (materia inerte y compuestos inorgánicos) aportados por el agua residual. Esta mezcla de microorganismos y materia inerte tiene una alta capacidad de absorción de la materia orgánica y por ello se le llama “activo” o “activado”.

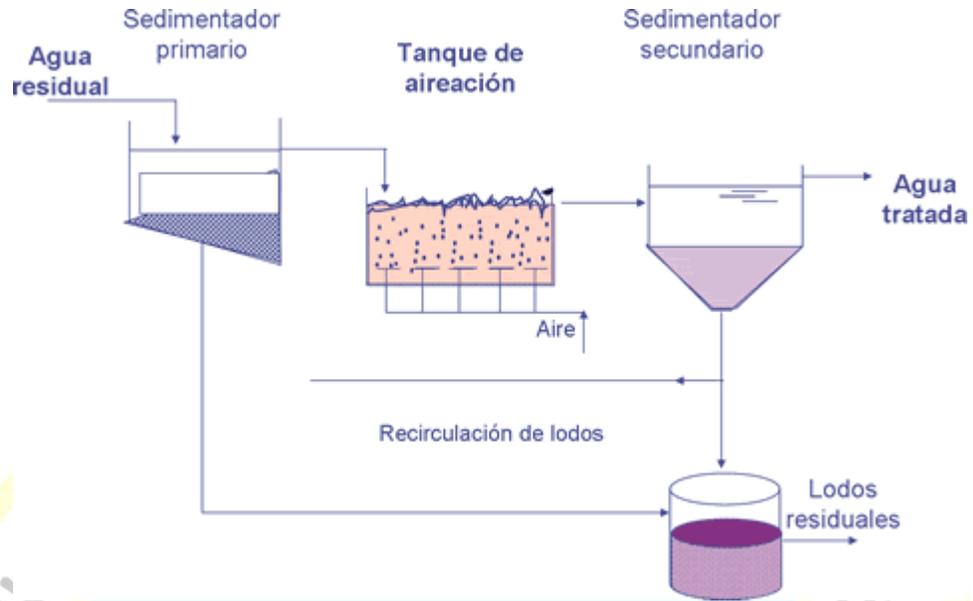


Ilustración 40: Esquema básico de un proceso de lodos activados. Imagen tomada de <https://es.slideshare.net/ilserocio/lodos-activados>

A. Lodos activados en reactores de mezcla completa

Estas unidades se suelen emplear para caudales pequeños (<400 m³/d) y con cargas bajas, razón por la cual se usan en depuradoras prefabricadas con aireación superficial o con turbina. Estos sistemas soportan bien los flujos y cargas transientes (variaciones repentinas de caudal o carga contaminante).

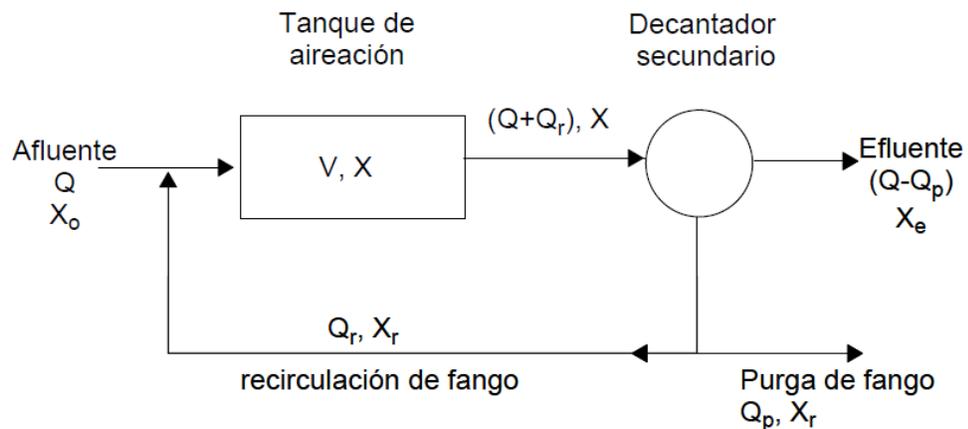


Ilustración 41: Reactor de mezcla completa. Imagen tomada de: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5909/08Mjkm08de18.pdf?sequence=8>

B. Lodos activados en reactores de flujo a pistón

Suelen emplearse para el tratamiento de grandes caudales, con funcionamiento de carga media o alta y aireación convencional, escalonada o gradual, empleando difusores (especialmente).

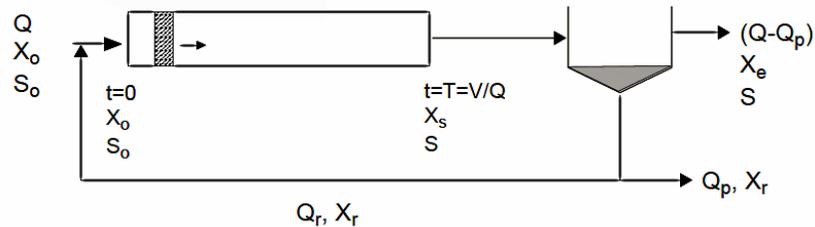


Ilustración 42: Reactor de flujo a pistón. Imagen tomada de: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5909/08Mjkm08de18.pdf?sequence=8>

C. Métodos de aireación para reactores de flujo a pistón

Considerando que la demanda de oxígeno (DBO) o la cantidad de materia orgánica oxidable, disminuye con el tiempo de tratamiento y en la medida en que avanza por el reactor, la aireación puede efectuarse de tres formas:

- Aireación convencional: consiste en abastecer exactamente la misma cantidad de oxígeno a lo largo de todo el reactor. Se emplea en operaciones con carga media y alta.
- Adición por pasos o escalonada: en este caso, aunque se mantiene la misma alimentación de oxígeno a lo largo del reactor, el afluente de aguas residuales se ingresa al tanque en diferentes puntos a lo largo de su recorrido. Se usa en operaciones de carga media o alta.
- Aireación gradual: se prefiere en caudales mayores a los 2000 m³/d para aguas residuales municipales y mayores a 400 m³/d para depuración de aguas residuales industriales. El suministro de aire desciende de manera gradual y proporcional a la disminución de la DBO a lo largo del reactor.

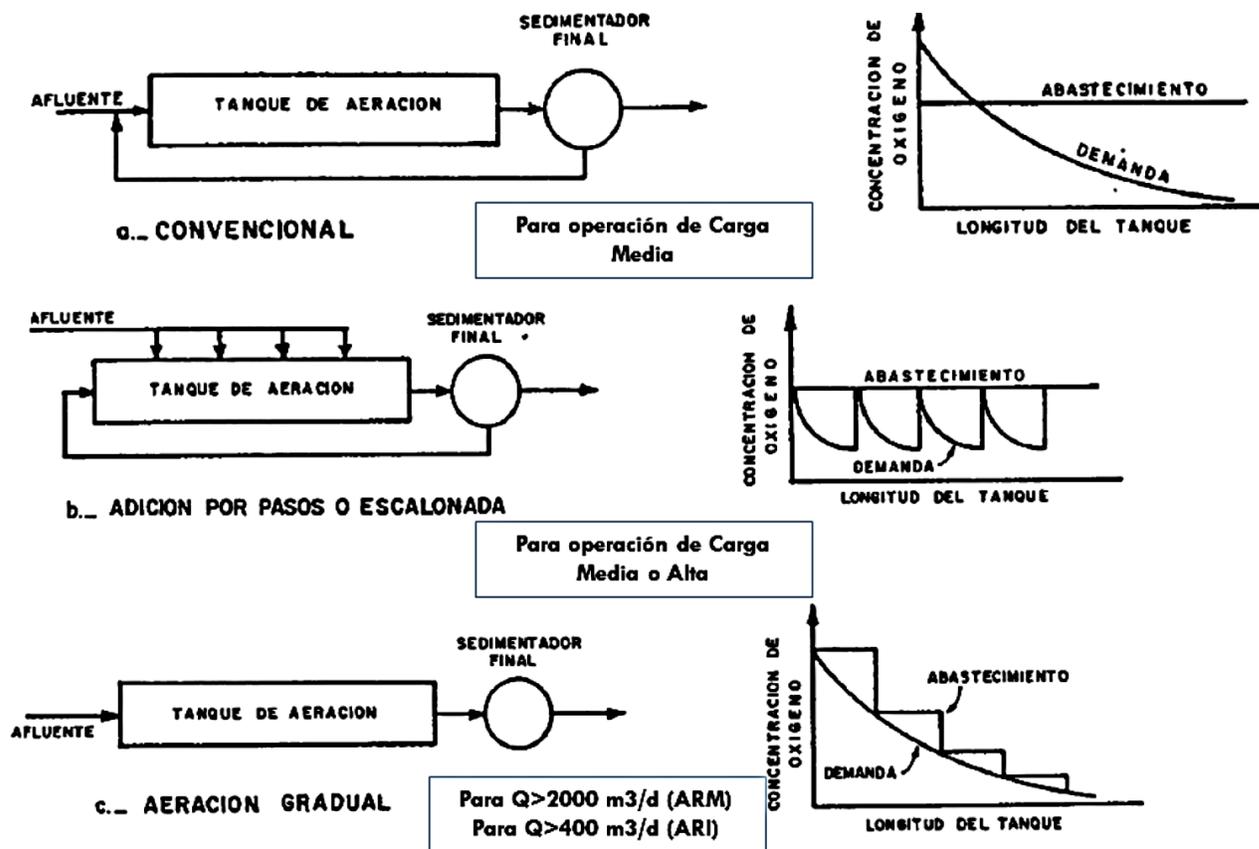


Ilustración 43: Métodos de aireación para reactores de lodos activados de flujo a pistón. Lozano, (2012).

D. Métodos de operación de los lodos activados

Como se ha venido sugiriendo en esta lección, existen tres modos de operación de los lodos activados: a) alta carga; b) carga media o convencional; y c) carga baja o aireación extendida o prolongada. Las características de cada operación, se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 24: Métodos de operación de los reactores de lodos activados Lozano, (2012).

| PARÁMETRO | ALTA CARGA | CONVENCIONAL (CARGA MEDIA) | AIREACIÓN EXTENDIDA O PROLONGADA (CARGA BAJA) |
|---------------------------------------|-------------|----------------------------|---|
| Color de Fango | Gris marrón | Marrón | Chocolate |
| Carga másica (Cm) (kg DBO5/kg SSLM*d) | 0,4 – 1,5 | 0,1 – 1,0 | 0,03 – 0,12 |
| | 1,6 - 16 | 0,3 – 3,0 | 0,16 – 0,4 |

| | | | |
|---|-----------|-------------|-------------|
| Carga volumétrica (Cv) (kg DBO ₅ /m ³ *d) | 5 - 10 | 5,0 - 15 | 20 - 30 |
| Tiempo de Retención Celular (TRC) (días) | 0,5 - 4 | 4,0 - 10 | 18 - 36 |
| TRH (horas) | 1000 - | 2000 - 3000 | 3000 - 6000 |
| SSLM (ppm) | 2000 | 25 - 50 | 75 - 150 |
| Tasa de Recirculación (%) | 100 - 500 | 0,2 - 0,4 | 0,05 - 0,15 |
| Relación F/M | 0,4 - 1,5 | 0,9 - 1 | < 0,6 |
| Exceso de Lodos (kg SSLM/kg DBO ₅ *d) | 1,2 | 3 - 10 | < 3 |
| Respiración Endógena (mg O ₂ /g*h) | 10 | 90 - 160 | 50 - 100 |
| IVL (mL/g) | 120 - 250 | 70 | 50 |
| N Total en Lodo (mg/g) | 80 | 30 | <10 |
| Consumo de Oxígeno (mg O ₂ /L*h) | <100 | >95 | >125 |
| Equipos de aireación (m ³ aire / kg DBO) | 25 - 95 | 90 | 90 |
| Eficiencia media (%) | 80 | | |

El modo de operación de alta carga permite reducir costos de construcción (bajo TRH), pero los decantadores secundarios son más grandes. La aireación extendida o prolongada es la que más se usa en unidades compactas (prefabricadas) y caudales pequeños (<400 m³/d), dado que los altos tiempos de retención permiten la digestión completa del lodo (autodigestión y lisis en la fase endógena).

Cuando hay déficit de nitrógeno en el reactor, se agregará amoníaco deshidratado (NH₃); en los casos en que el fósforo es el elemento que escasea en el tanque de aireación, se agregará ácido fosfórico (H₃PO₄) hasta obtener el nivel deseado.

El volumen del tanque de aireación de lodos activados, se calcula con la siguiente expresión:

$$V = \frac{TRC \cdot Y \cdot Q \cdot (S_o - S)}{X \cdot [1 + (K_d \cdot TRC)]}$$

Donde,

V : Volumen del reactor (m³)

TRC : Tiempo de retención celular (d)

Y : Coeficiente de crecimiento bacteriano (oscila entre 0,4 y 0,8)

Q : Caudal de aguas residuales (m³/d)

S_o : DQO inicial en el afluente (kg/m³)

S : DQO final en el efluente (kg/m³)

X : SSLM -sólidos suspendidos del licor mezclado- en el tanque (kg/m³)

K_d : Coeficiente de eliminación de bacterias (oscila entre 0,040 – 0,075)

La carga másica se calcula de la siguiente manera:

$$C_m = \frac{S_o \cdot Q}{V \cdot X}$$

Donde,

C_m : Carga másica (kg DQO/kg SSLM*d)

El tiempo de retención celular (en días), se estimará así:

$$TRC = \frac{V \cdot X}{Q_p \cdot X_r}$$

Donde,

Q_p : Caudal de purga (m³/d)

X_r : SSLM -sólidos suspendidos del licor mezclado- en el lodo (kg/m³)

El caudal de recirculación (en m³/d) se estimará así:

$$Q_r = \frac{(Q \cdot X) - (Q_p \cdot X_r)}{X_r - X}$$

La relación F/M (alimento/microorganismos) podrá calcularse, así:

$$\frac{F}{M} = \frac{Q \cdot S_o}{V \cdot X}$$

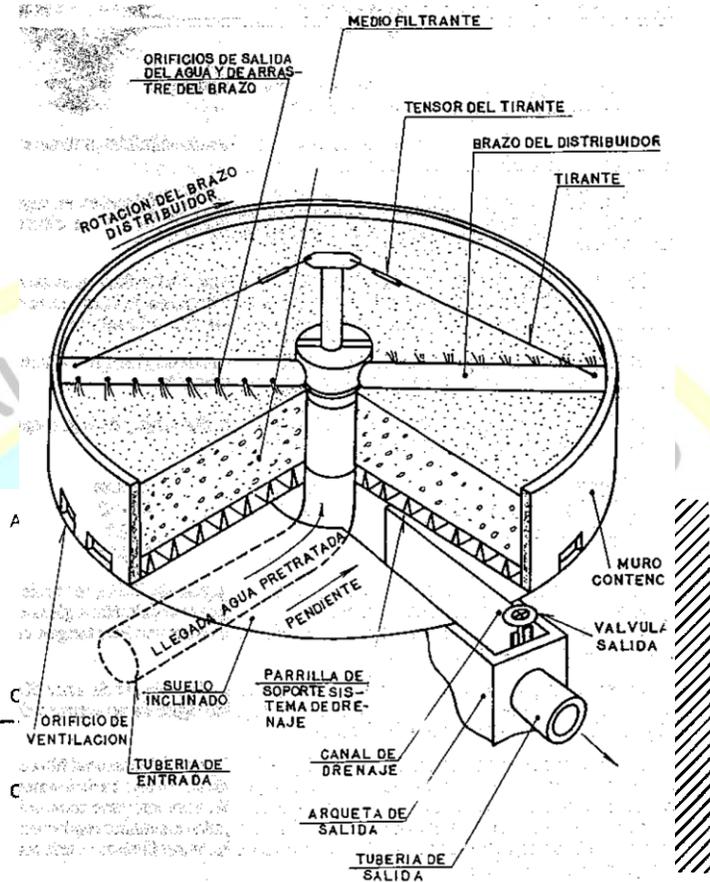
2.2.1.5.2 Filtro percolador

También llamados biofiltros, es quizá el tipo de reactor más usado en nuestro medio. A pesar de su nombre (filtro percolador) esta unidad no realiza un proceso de filtración propiamente dicho, sino que se trata de una torre de

contacto en la que el agua residual escurre, desde arriba, por un lecho fijo en el que la biomasa se encuentra adherida.

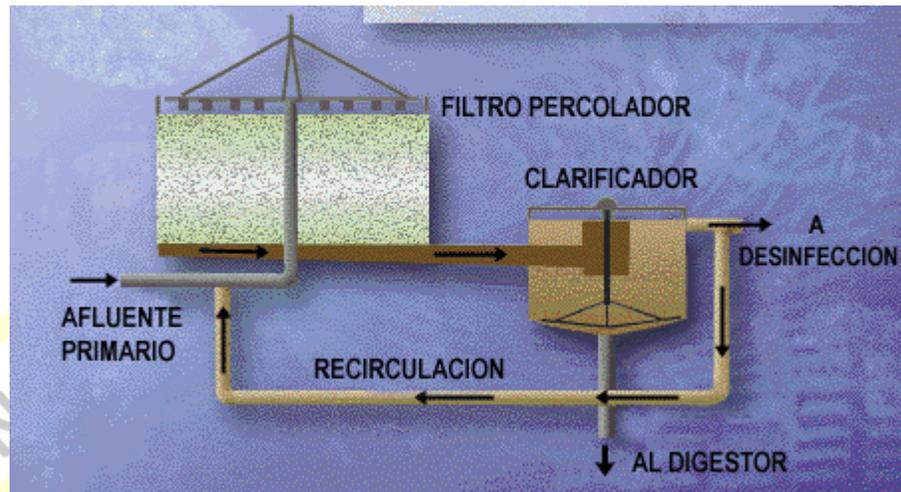
Este lecho fijo se compone de piedras o, más recientemente, de piezas plásticas u otro material, sobre las cuales se realiza una aspersión de las aguas residuales, mediante un brazo rotatorio con orificios o boquillas, el cual es movido por un motor o por la misma acción dinámica del agua al golpear con la superficie del lecho. Con el tiempo, se forma una biopelícula (biofilm), llamada también zooglea, sobre este material de soporte; esta biopelícula o lama biológica de microorganismos se encargará de tomar como alimento (adherir y descomponer), la materia orgánica biodegradable presente en las aguas del afluente. Esta biomasa adherida se encuentra formada, principalmente, por protistas: bacterias (aerobias y facultativas, principalmente), hongos (que predominarán si se trabaja con pH bajos) y protozoos. También se presentan larvas de insectos y caracoles. En la superficie del filtro, por efecto de la luz solar, suelen crecer comunidades de algas que podrían llegar a obstruir parcialmente el filtro.

Ilustración 44: Partes de un filtro percolador.



En la medida en que avanza la operación del filtro, la biopelícula aumenta gradualmente su espesor sobre la superficie de las rocas o piezas plásticas. Esto causa que la materia orgánica que se absorbe, sea empleada por los microorganismos de la parte más superficial “capa externa”, dejando a los de la parte interna con menos alimento y oxígeno. En consecuencia, esta “capa interna” entra en fase de crecimiento endógeno provocando pérdida de adherencia al medio de soporte, hasta que termina por desprenderse. Todo lo anterior provoca un ciclo de auto limpieza en el filtro percolador que evitará su colmatación por engrosamiento de la biomasa adherida.

Ilustración 45: Distribución y actividad de la biomasa en un filtro percolador Romero Rojas, (1999).



Los filtros percoladores pueden clasificarse según su carga hidráulica y orgánica en:

- Baja tasa
- Alta tasa

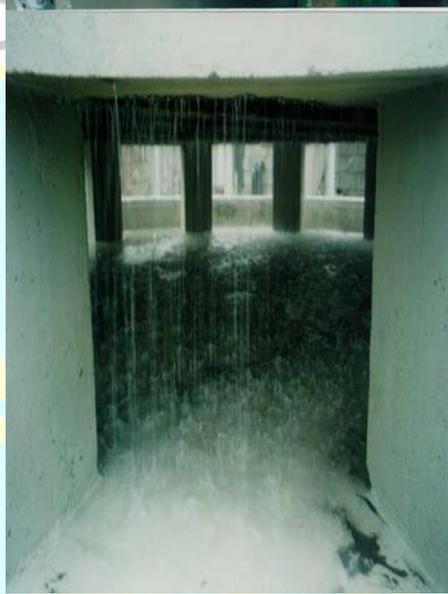
Aunque el filtro percolador suele operarse con recirculación del efluente clarificado proveniente del decantador secundario, no es requisito indispensable; no obstante, ayuda a recomponer rápidamente la biomasa que se desprende del lecho fijo, mejorando la eficiencia del proceso de depuración. Siempre que se hable de un filtro percolador de alta tasa, se estará afirmando que tiene recirculación.

Ilustración 46: Ilustración 30. Esquema de un filtro percolador con recirculación. Imagen tomada de:



Por ejemplo, si se dice que la relación de recirculación es de 0,5, significará que la mitad del efluente clarificado del decantador secundario, se hará pasar nuevamente por el filtro percolador. Así mismo, si la relación de recirculación es de 2, indicará que se hará pasar todo el efluente del decantador secundario, dos veces más por el filtro percolador.

Ilustración 47: Piezas plásticas usadas como medio de soporte de la biomasa en el filtro percolador. Imagen tomada de: <http://www.iccelda.com/IMAGENES/x.jpg>



Es importante asegurar la ventilación de la torre del filtro percolador, con el fin de mantener unas condiciones aerobias. Para ello, se suelen disponer aberturas (ventanas) en la base del biofiltro, las cuales deben sumar un área de entre 10 y 25% de su área superficial.

Ilustración 48: Aberturas de ventilación en la base de los filtros percoladores. Balda R., (2001).



Ilustración 49: Base de un filtro percolador con aberturas de ventilación. En la parte superior se aprecia el falso fondo como sistema de drenaje. Imagen tomada de: http://www.egevasa.es/portal/export/sites/default/Tecnologia/ImagenesTecnicasEgevasa/FiltroPercolador1.jpg_729600497.jpg

Los criterios de diseño según el tipo de operación y medio de contacto de los filtros percoladores, se expone en la siguiente tabla.

Tabla 25: Criterios de diseño para filtros percoladores, según tipo de operación y medio de contacto. Lozano, (2012)

| ELEMENTO | CARGA BAJA | CARGA ALTA | CARGA ALTA |
|--|--|------------|------------------------------|
| Medio filtrante | Piedra | Piedra | Plástico |
| Tamaño (cm) | 2,5 a 13 | 2,5 a 13 | Varía |
| Superficie específica (m ² / m ³) | 60 a 70 | 60 a 70 | 80 a 200 |
| Constante “n” del material | 1,5 a 3,5 | 1,5 a 3,5 | 0,4 a 0,6 (según fabricante) |
| Constante de tratabilidad “K” | Agua residual doméstica sedimentada = 2,21 (m*d) ^{-0.5} Agua residual industrial = 0,25 a 2,51 (m*d) ^{-0.5} | | |

| | | | |
|--|--------------|------------|------------|
| Espacio vacío (%) | 40 a 60 | 40 a 60 | 94 a 97 |
| Peso específico (kg/m ³) | 800 a 1450 | 800 a 1450 | 30 a 100 |
| Carga hidráulica (m ³ /m ² *h) | 0,05 a 0,15 | 0,4 a 1,6 | 0,4 a 3,0 |
| Carga orgánica (kg DBO ₅ /m ³ *d) | 0,1 a 0,4 | 0,5 a 0,6 | 0,3 a 1,8 |
| Carga orgánica para nitrificación (kg DBO ₅ /m ³ *d) | 0,1 a 0,16 | 0,1 a 0,25 | 0,16 – 0,4 |
| Profundidad (m) | 0 | 0,5 a 2,0 | 0,5 a 4,0 |
| Relación de recirculación | Intermitente | Continuo | Continuo |
| Arrastre de sólidos | 80 a 85 | 50 a 70 | 50 a 85 |
| Eficiencia de remoción de DBO ₅ (%) | Muchas | Pocas | Muy pocas |
| Moscas en el filtro | | | |

2.2.1.5.3 Sistemas anaerobios

Los procesos anaerobios se prefieren sobre los aerobios, en tratamiento de aguas residuales con altas cargas de contaminación orgánica (e.g. procesadoras de productos cárnicos, mataderos, industria agrícola, industria de alimentos). En este tipo de aguas, cuya DBO supera los 1000 mg/L, los compuestos orgánicos y el anhídrido carbónico (CO₂) son aceptores finales de electrones de las bacterias, para la producción de metano. Este gas tiene un poder calorífico aproximado de 36500 kJ/m³.

Como se dijo en las Lecciones 18 y 19, la temperatura óptima de los procesos anaerobios es elevada (cerca de los 35 °C). No obstante, se usan reactores de este tipo a temperaturas por encima de los 10 °C y, preferentemente, por encima de los 20 °C. Debe tenerse en cuenta que por cada descenso de 10 °C en la temperatura de trabajo, se recomienda incrementar al doble, el tiempo de retención hidráulica del reactor.

Los rendimientos típicos de los reactores anaerobios se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 26: Rendimientos promedio de los procesos anaerobios. Malina & Pohland, (1992).

| Parámetro | Rango o valor |
|------------------------|---|
| Remoción de DBO (%) | 80 a 90 |
| Remoción de DQO (mg/L) | 1,5 x DBO removida |
| Producción de biogás | 0,5 m ³ /kg de DQO removida |
| Producción de metano | 0,35 m ³ /kg de DQO removida |
| Producción de lodo | 0,05 a 0,10 kg SSV/kg de DQO removida |

Se ha comprobado que los reactores anaerobios de biomasa fija o adherida, son más eficientes para aguas con altos contenidos de DBO soluble; mientras que los de biomasa suspendida, presentan rendimientos más altos con aguas que presenten grandes concentraciones de DBO insoluble (materia orgánica particulada).

El tiempo de retención celular, llamado también edad de lodo, tiene una gran influencia en la eficiencia de los procesos anaerobios y deben proyectarse en función a la temperatura de operación, así:

Tabla 27: Tiempos de retención celular (TRC) para diseño de los reactores anaerobios Lozano, (2012).

| T° de operación (°C) | Mínima (d) | Diseño (d) |
|----------------------|------------|------------|
| 20 | 10 | 27 |
| 25 | 8 | 20 |
| 30 | 6 | 14 |
| 35 | 4 | 10 |
| 40 | 4 | 10 |

A. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente a través de un Manto de Lodos (UASB)

Conocido también como UASB (por sus siglas en inglés: Upward-flow Anaerobic Sludge Blanket) y, en español como RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), es un tanque cerrado que tiene dos zonas características: la de digestión (en la parte baja) y la de sedimentación (en la parte superior).

En la zona de digestión, el afluente ingresa por la parte baja y fluye de forma ascensional por el reactor a través de un manto de lodos (biomasa), el cual se mantiene en suspensión por la fuerza hidrodinámica del flujo. En la medida en que el caudal de aguas residuales fluye a través del manto de lodos, la materia orgánica se pone en contacto con la biomasa suspendida que la adhiere y la digiere en ausencia de oxígeno, dando lugar a la formación de biogás (CH_4 y CO_2).

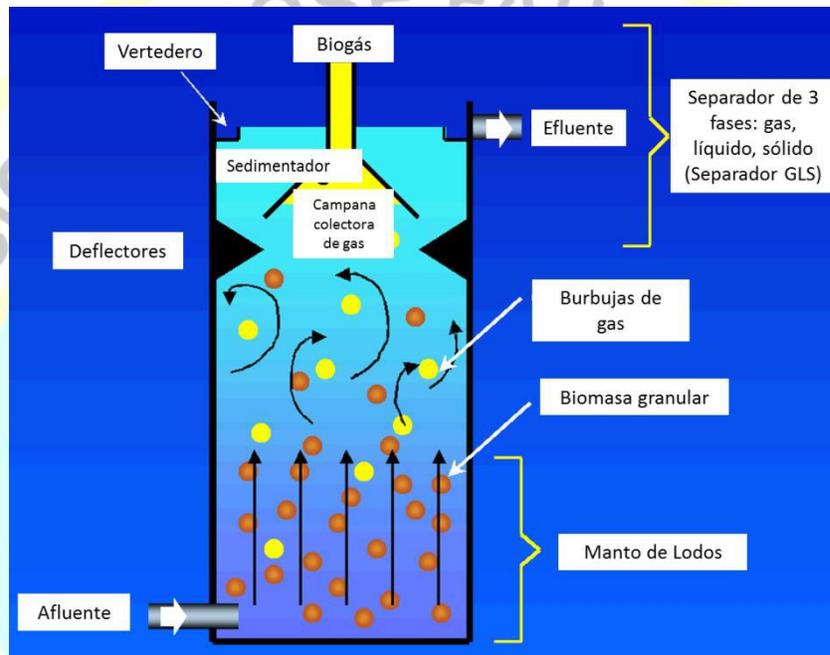


Ilustración 50: Esquema de un UASB. En la parte baja se encuentra la zona de digestión y en la zona superior se aprecia la estructura de sedimentación. Imagen tomada de: <http://www.uasb.org/discover/uasbscheme.gif> modificada por el autor.

El agua residual tratada, libre de la mayor parte de la materia orgánica granulada que fue retenida en el manto de lodos, abandona la zona de digestión e ingresa a la zona de sedimentación ubicada en la parte superior del tanque; allí unas tolvas o campanas deflectoras (llamadas también separadores GLS o separadores de 3 fases: gas, líquido y sólido), permiten separar el líquido de los sólidos (algunos) que tienden a escaparse del manto de lodos y salir juntamente con el efluente; también se recolecta el biogás generado, el cual es llevado a un sistema de aprovechamiento (como combustible para generar calor o energía) o para ser quemado.

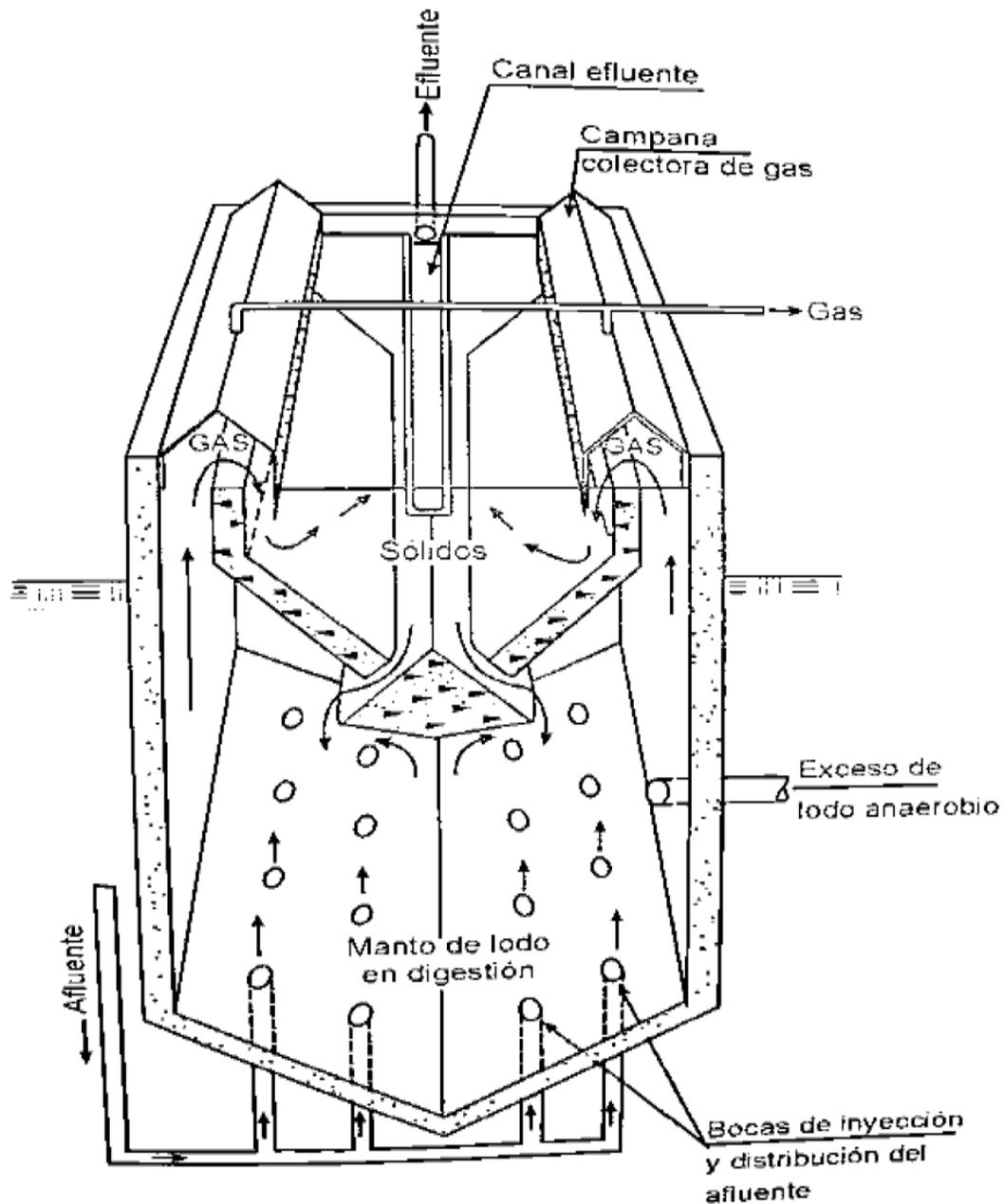


Ilustración 51: Reactor UASB. En la parte baja se encuentra la zona de digestión y en la zona superior se aprecia la estructura de sedimentación Romero Rojas, (1999).

Como se dijo anteriormente, estos reactores de biomasa suspendida, trabajarán bien con aguas de alto contenido de DBO no soluble y concentraciones de SST menores a 2000 mg/L. Se pueden destacar los siguientes puntos:

- El reactor no requiere siembra para su arranque.

- Se presentaron eficiencias muy aceptables con tiempos de retención hidráulica tan bajos como entre 4 y 6 horas (con temperaturas entre 25 y 30 °C).
- Se debe proyectar, por lo menos, una entrada de flujo por cada 4 m² de superficie de tanque.
- La remoción de patógenos es de un 50%.

Algunas de las ventajas del UASB, son:

- Construcción sencilla.
- Poca ocupación de área.
- Operación simple.
- No necesidad de uso de energía eléctrica.
- Baja producción de lodos.

Estos reactores son muy usados en aguas residuales de industrias de almidón, azúcar, papa, papel y cerveza. Los criterios de diseño recomendados para los UASB, se resumen en la Tabla.

Tabla 28: Criterios de diseño de los UASB. Lozano, (2012).

| Parámetro | Valor o rango |
|---|---|
| DQO de entrada (mg/L) | 1000 a 20000 <2000 |
| SST de entrada (mg/L) | Preferentemente, <1000 |
| Relación SS/DQO de entrada | <0,5 |
| Relación DBO/N/P de entrada | <350/5/1 |
| Temperatura del afluente (°C) | >15 |
| Tiempo de retención hidráulica (h) | 4 a 12 |
| Carga orgánica (kg DQO/m ³ *d) | <24 |
| Profundidad del reactor (zona de digestión + zona de sedimentación) (m) | 10 a 20 En casos extremos, >0,5 y <40 <6 |
| Profundidad de la zona de digestión (m) | <4,5 |
| Profundidad de la zona de sedimentación (m) | <1,5 |
| Carga superficial del sedimentador (m/d) | <36 |
| Inclinación de las paredes del sedimentador | 45° |
| Volumen del reactor (m ³) | <1500 |
| Velocidad ascensional de flujo (m/h) | 0,6 a 0,9 En casos extremos, <2 |

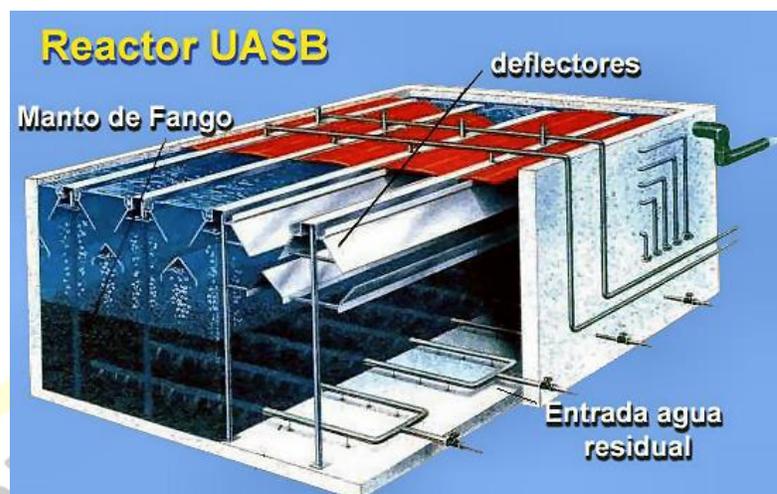


Ilustración 52: Reactor UASB. CIDTA. Universidad de Salamanca, (2005).

El diseño del separador de 3 fases o separador GLS, mencionado con anterioridad, debe considerar, además de las inclinaciones de 45° tanto de las paredes de la tolva del sedimentador como de los obstáculos (gorros en forma de V invertida) que lo complementan, velocidades de entrada o de paso de 5 m/h y traslapos de al menos 0,20 m entre los extremos de la tolva del sedimentador y del obstáculo.

B. Reactor Anaerobio de lecho expandido y biomasa en suspensión (EGSB).

Una variación más reciente y mucho más eficiente, muy extendida por el mundo, es conocida como reactor EGSB, por sus siglas en inglés Expanded Granular Sludge Bed. Esta unidad se vale del mismo manto de lodos (biomasa suspendida) que el UASB, pero emplea velocidades mayores que permiten mantener un lecho parcialmente expandido o fluidizado. Esto mejora el contacto de la materia orgánica con la biomasa suspendida y la segregación de las partículas inactivas. Esta mayor velocidad también da como resultado, unidades más esbeltas que facilitan la recirculación de las aguas tratadas. Esta variación se recomienda en aguas que contienen partículas suspendidas inertes o poco biodegradables, las cuales no deben acumularse en el manto de lodos. Se diseña con los mismos criterios del UASB, exceptuando por la velocidad de ascenso que oscila entre 3 y 10 m/h.



Ilustración 53: Reactor EGSB. Imagen tomada de:

http://www.pollutionsolutiononline.com/assets/file_store/pr_files/12891/images/thumbnails/800w1_biobed_egsb_reactor_figure_1.jpg

2.2.1.5.4 Decantador secundario

A diferencia de los decantadores primarios, estas unidades que acompañan casi la totalidad de los reactores biológicos, no se diseñan para remover carga contaminante presente en las aguas residuales, sino para separar el agua tratada, de la biomasa que escapa juntamente con ella.

Estas unidades son más grandes que los decantadores primarios y no deben tener un tiempo de retención excesivo debido a que podrían presentarse condiciones anaerobias, pero sí el suficiente para lograr una separación efectiva de la biomasa. Si este lodo sale juntamente con el efluente de las aguas tratadas, se presentarán altos niveles de DBO y SST que echarán a perder todo el proceso de depuración y que causarán incumplimiento de los parámetros y normativas de vertido.

El tiempo de retención estimado para el diseño de estas unidades, dependerá de la sedimentabilidad del lodo, la cual se determina mediante el Índice de Mohlman o Índice Volumétrico de Lodos (IVL). El IVL corresponde al volumen en mL ocupado por un gramo de sólidos del licor mezclado (biomasa), tras una sedimentación de 30 min en una probeta de 1000 mL.

$$IVL = 1000 \cdot \frac{\text{volumen de los lodos asentados (mL)}}{SSLM}$$

Donde,

IVL : índice Volumétrico de Lodos (mL/g)

SSLM : sólidos suspendidos del licor mezclado (mg/L)

La sedimentabilidad del lodo se define de la siguiente manera:

Tabla 29: Definición de la sedimentabilidad del lodo según su IVL Lozano, (2012).

| IVL | Valor |
|---|---------------|
| Muy buena sedimentabilidad | <40 mL/g |
| Sedimentabilidad aceptable | 40 a 140 mL/g |
| Pobre sedimentabilidad | >140 mL/g |
| Tendencia al hinchamiento de lodos (<i>bulking</i>) | >200 mL/g |

Para un proceso de depuración eficiente de las aguas residuales, es imprescindible tener una biomasa de buena sedimentabilidad, que decante con facilidad por gravedad y que produzca un efluente claro. Sin embargo, en algunas depuradoras se presenta un floc biológico de gran volumen y poco peso que presenta dificultades de asentamiento. A este fenómeno se le conoce como esponjamiento o hinchamiento de los lodos, y también como bulking filamentoso.

El bulking filamentoso, es causado por una proliferación excesiva de los microorganismos filamentosos llamados actinomicetes y es quizá el mayor problema de los reactores aerobios de las estaciones depuradoras de aguas. Este tipo de lodo esponjado no decanta y escapa juntamente con el efluente del decantador, eliminando la posibilidad de retornar esta biomasa activa al reactor aerobio, reduciendo el sustrato necesario para mantener el crecimiento de los microorganismos y obligando a la biomasa restante a funcionar con régimen de respiración endógena, mientras que el efluente tratado, presentará elevados niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

Los factores que influyen en la formación de un flóculo de biomasa no decantable y con deficiencias en la compactación, que impiden una

separación eficiente de los lodos del reactor aerobio dependen, en alguna proporción, de la edad de los lodos, la toxicidad (presencia de metales pesados y compuestos orgánicos), actividad abundante de protozoos ciliados, altos niveles de tensoactivos. Relaciones bajas de F/M hacen que el lodo tenga características muy pobres de sedimentación (flóculos dispersos), pero también relaciones elevadas (entre 0,6 y 1,0 kg DBO/kg SSVLM) provocan la aparición de filamentosos que hinchan el lodo e impiden su decantación (Ramalho, 1996).

De otro lado, el crecimiento de estas bacterias filamentosas depende en gran medida, de las condiciones operativas de la planta (Jenkins, Richard, & Daigger, 1993), especialmente lo que concierne a:

- Bajas concentraciones de Oxígeno Disuelto
- Altas o bajas relaciones F/M
- Deficiencias de nutrientes (fósforo y nitrógeno)
- Bajo pH
- Temperaturas inapropiadas
- Baja carga orgánica
- Altas concentraciones de grasas y aceites
- Altos tiempos de retención celular

Richard (2003), reporta que son seis las causas principales de crecimiento de microorganismos filamentosos en los reactores de lodos activados que son: a) Baja concentración de OD; b) Baja relación F/M; c) Septicidad; d) Presencia de Grasas y Aceites; e) Deficiencia de Nutrientes; y f) Bajo pH. El autor afirma también que en las aguas residuales industriales, las causas podrían reducirse a dos variables: los bajos niveles de nutrientes y al pH, mientras que en aguas residuales municipales, dependerá de la interacción de estos seis parámetros, desconociéndose la interacción real de estas variables, lo que dificulta el diagnóstico de la causa o causas principales en este tipo de aguas servidas (Richard, 2003).

Aunque varios autores han reportado herramientas y metodologías de control del bulking, todas ellas se encuentran dirigidas a la aplicación -remediadora o preventiva- de sustancias químicas inhibitorias de tipo oxidativo, bactericida o bacteriostático, junto con coagulantes y aglomerantes, como el policloruro de aluminio junto con polielectrolito catiónico (Entidad Regional de Saneamiento y depuración de Aguas Residuales de Murcia - ESAMUR, 2006) (Richard, 2003), el Ozono que puede favorecer la aparición de bromuros (Leeuwen & Pretorius, 2007), el Peróxido de Hidrógeno y el Cloro, que elevan los costos de tratamiento y, eventualmente, el volumen de lodos que debe ser posteriormente tratado y dispuesto; adicional a esto, el cloro, de no ser aplicado en las dosis correctas, conlleva a un incremento en la turbiedad del efluente y de los sólidos suspendidos totales (SST), aniquilamiento de biomasa activa beneficiosa y detrimento en la remoción de DBO. Aunque se menciona la probabilidad de presencia de subproductos cancerígenos de la cloración, se afirma que no es probable, dadas las dosis bajas que se manejan y el tiempo corto de vida del cloro en reactores de fangos activos; no obstante, algunos autores aún difieren (Richard, 2003). Una de las actividades preventivas más usadas para disminuir los efectos adversos que causan los organismos filamentosos, es la llamado "Sludge Juggling" que consiste en variar la tasa de recirculación de los fangos activos y los niveles de aireación a lo largo del reactor (Richard, 2003).

Los decantadores secundarios son prácticamente idénticos en su configuración a los decantadores primarios y los criterios de diseño se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 30: Criterios de diseño para decantadores secundarios circulares Lozano, (2012).

| Parámetro | Valor o rango |
|--------------------------------------|--|
| Tiempo de retención hidráulico (TRH) | 3 a 5 horas |
| Carga superficial | <0,8 m ³ /m ² *h (a caudal medio) <1,5 m ³ /m ² *h (a caudal punta) |
| Carga sobre el vertedero | |

| | |
|---|--|
| | < 2,5 m ³ /h*m lineal del vertedero perimetral (a caudal medio) |
| | < 4,5 m ³ /h*m lineal del vertedero perimetral (a caudal punta) |
| Profundidad del decantador (en la vertical del vertedero de salida) | 3 a 6 m |
| Pendiente de fondo hacia la poceta de fangos | 8 % |

2.2.1.5.5 Manejo de lodos secundarios

Los lodos secundarios o lodos biológicos son conocidos también como lodos en exceso ya que como se vio en las lecciones anteriores, este lodo constituido principalmente por biomasa activa, se retorna a los reactores para mantener unas condiciones de operación óptima y unas edades de lodo (tiempos de retención celular) adecuadas.

Estos lodos frescos, tienen una coloración marrón oscura y olor a tierra húmeda que no es desagradable hasta que empiezan a ser digeridos anaeróbicamente. Su contenido inicial de humedad varía entre el 98 y el 99,5%, siendo muy difícil su concentración (espesamiento). El autor conoce algunas depuradoras en donde estos lodos secundarios son enviados al decantador primario, en donde se mezclan con los lodos primarios y dan lugar a lodos mixtos.

Los lodos secundarios están compuestos, principalmente de:

- Agua: su contenido variará entre el 50 y el 99% según su estado de tratamiento.
- Materia orgánica: en el caso de los lodos frescos, su contenido varía entre el 60 y el 75%, una vez digerido, esta cantidad disminuye entre 54 y 60%.
- Nutrientes: son importantes en lodos empleados con fines agrícolas. Hacen referencia, principalmente a: nitrógeno total, fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O).

- Contaminantes orgánicos: los lodos pueden presentar trazas de detergentes y antibióticos, así como otros de productos químicos de uso común. De otro lado, podrían presentar niveles peligrosos de virus, oocitos, quistes y huevos de helminto así como de algunos parásitos, que limitan el uso de los lodos para el sector agrícola.
- Contaminantes minerales: las aguas residuales de grandes ciudades con una importante actividad industrial, presentan comúnmente niveles apreciables de metales pesados como Zn, Pb, Cu, Cd, Hg y Fe, entre otros.

En el tratamiento de lodos secundarios se deben llevar a cabo 3 fases principales:

- Espesado: para reducir los volúmenes iniciales de lodo y facilitar su manejo en el tratamiento.
- Digestión: para estabilizar anaerobiamente la materia orgánica presente y evitar su fermentación y putrefacción.
- Deshidratación o secado: para eliminar el exceso de agua y conseguir una textura apropiada que facilite su manejo y transporte.

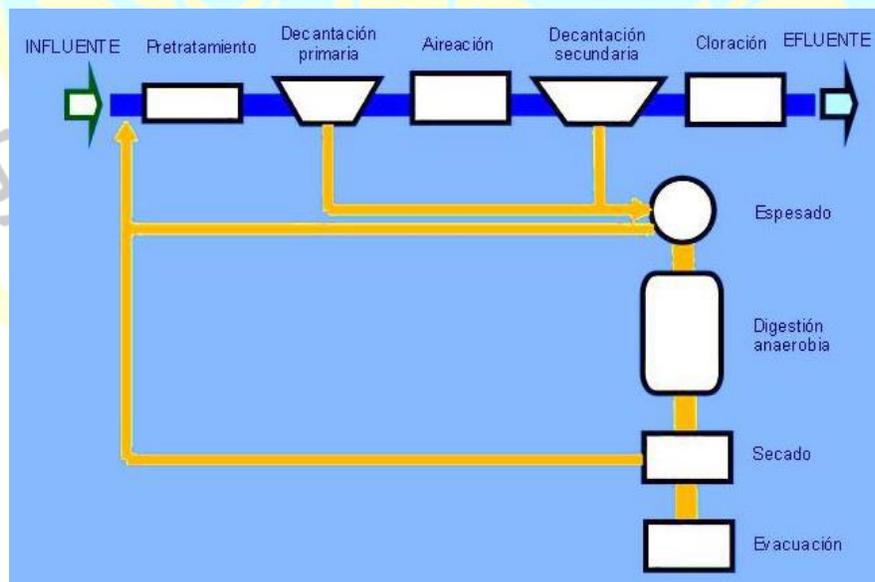


Ilustración 54: Línea de fango (en amarillo) de una depuradora. (Programa de Master en Ingeniería del Agua de la Universidad de Sevilla).

A. Espesado

Con el fin de reducir los costos de tratamiento, los lodos frescos provenientes de los reactores biológicos, los cuales tienen más de un 95% de agua, deben ser reducidos en volumen. Esta concentración de lodos se realiza en unidades llamadas espesadores. Estos tanques, de manera similar a un decantador, tienen un brazo rotatorio móvil, anclado a un armazón barrelados, el cual tiene la función de eliminar los espacios ocupados por el agua y agrupar los sólidos. Su rendimiento puede ser mejorado usando sales coagulantes (frecuentemente, cloruro férrico - FeCl_3 a dosis entre 1 y 6 mg/L). Estas unidades manejan una carga de rebose de 2 a 8 m/d y tiempos de retención entre 1 a 2 días. El diámetro de estas unidades, generalmente, no excede los 12 m (aunque se proyectan hasta los 30 m) y tienen profundidades entre 2 y 5 m. La velocidad periférica del barre lodos es aproximadamente unos 0,10 m/s.

B. Digestión

En la digestión, los lodos concentrados son estabilizados bioquímicamente con el fin de que no continúen su proceso de descomposición o se presente crecimiento de microorganismos, en su reutilización o en su disposición final. Adicionalmente, esta digestión completa, permite la eliminación de los organismos patógenos presentes y la reducción de olores desagradables.

Esta digestión se realiza a través de un proceso anaerobio, en tanques cerrados, y se obtendrá como producto normal de la fermentación anaerobia, biogás (CH_4 y CO_2) y nuevas células, que serán eliminadas una vez que se haya digerido toda la materia orgánica y entren a la fase de crecimiento endógeno.

Es importante controlar, especialmente, la temperatura (entre 30 y 35 °C), el pH (entre 6,8 y 7,4) y alcalinidades entre 1500 y 2000 mg/L. Los parámetros usados para determinar la estabilidad del lodo, son el contenido de sólidos volátiles y el número de patógenos. Estos digestores suelen cargarse de forma continua o intermitente (al menos 1 vez al día), aunque esta última suele presentar eficiencias menores por la producción súbita de hidrógeno y ácidos, propiciada por una mayor heterogeneidad de los productos transformados.



Ilustración 55: Digestor Anaerobio con conducciones de biogás y recirculación de fangos digeridos. Imagen tomada de: http://usuarios.arsystel.com/raulh/edar_pinedo/1246.jpg



Ilustración 56: Depósito de acumulación del biogás (gasómetro) y antorcha de quemado. Imagen tomada de: http://usuarios.arsystel.com/raulh/edar_pinedo/1250.jpg

Existen dos maneras de operar estos digestores:

- Tasa baja: llamados también de proceso convencional o de tasa estándar, se alimentan de manera intermitente, sin mezcla y sin

calentamiento adicional de los lodos. La carga de sólidos oscila entre 0,5 y 1,5 kg SV/m³*d. El tiempo de retención oscila entre 30 y 60 días y, en algunos casos, hasta 90 días.

- Tasa alta: tienen alimentación continua, con mezcla y calentamiento del lodo, para lo cual se emplea la temperatura derivada de la quema del mismo biogás generado en la digestión. La carga de sólidos oscila entre 1,6 y 4,0 kg SV/m³*d. El tiempo de retención oscila entre 10 y 20 días.

C. Deshidratación o secado

Para reducir su volumen al máximo y darle a los lodos una textura que facilite su manejo, se emplean diferentes alternativas de deshidratación. Aunque pueden emplearse lechos de secado (áreas con superficies drenantes sobre las que se extienden los lodos para ser secados por efecto del aire y la radiación solar), se emplean de manera más frecuente equipos mecánicos como los filtros



prensa y los filtros banda, los cuales presionan los lodos digeridos a través de telas porosas que permiten la salida del agua, dando lugar a unas “tortas” de lodos deshidratados.

Ilustración 57: Filtro prensa. Imagen tomada de:
<http://www.gruptefsa.com/Racer/sp/Planta%20aguas%20Doe%20Run%20Per%C3%BA32.JPG>

El líquido extraído de este proceso, es llevado nuevamente a cabeza de proceso, en el tanque espesador.



*Ilustración 58: Filtro banda. Imagen tomada de:
http://1.bp.blogspot.com/adKAtLWzKsU/T_Ilx6pe25I/AAAAAAAAAPE/3l06iJrWgy0/s1600/Sin+tr%25C3%25ADulo.png*

D. Destino final de los lodos

Considerando el alto contenido de nutrientes, pero dependiendo de las características de toxicidad a causa de la presencia de contaminantes orgánicos o minerales y de la patogenicidad de los lodos, estos pueden emplearse (con las debidas precauciones) en:

- Compostaje, con fines agrícolas.
- Acondicionamiento de suelos para agricultura, reforestación, recuperación de áreas degradadas, incluyendo las de actividades extractivas.

No obstante, especialmente en depuradoras municipales, la presencia de procesos industriales con vertidos tóxicos, entre otras actividades, impide el aprovechamiento seguro de estos lodos, de manera que deberán tratarse y disponerse. Para ello, se deberán disponer en un relleno sanitario, en el que puede existir previamente un proceso de incineración.

2.2.1.6 Tratamiento terciario y reúso de aguas residuales regeneradas

Según Lozano, (2012). Dice que el tratamiento terciario de las aguas residuales se entiende como cualquier práctica adicional a los procesos biológicos secundarios (que remueven materia orgánica biodegradable e inorgánica oxidable), con el objetivo de eliminar contaminantes orgánicos no biodegradables, organismos patógenos y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo.

En países como los latinoamericanos, predominantemente agrícolas, se hace casi imprescindible desinfectar las aguas residuales tratadas, con el propósito de no restringir su uso en el sector agropecuario. Así mismo, especialmente en cuerpos de agua lénticos (con velocidades de flujo muy bajas) como lagos y estuarios, las descargas de aguas residuales tratadas pueden llegar a ocasionar problemas de hipereutrofización, por los altos niveles de nitrógeno y fósforo que se encuentran en éstas. Por esta razón, deben ser removidos en el tratamiento terciario. En este capítulo se incluyen, también, algunos conceptos acerca de la reutilización de las aguas residuales tratadas, llamadas también aguas residuales regeneradas. (p.132)

2.2.1.6.1 Justificación del tratamiento terciario

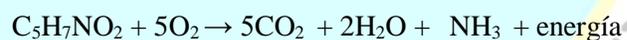
El tratamiento terciario, avanzado o específico (en cuanto tiene, por lo general, un objetivo particular), surgió como una alternativa de tratamiento que aseguraba el reúso posterior del agua residual tratada. No obstante, en la actualidad, los tratamientos específicos o terciarios desempeñan un papel fundamental en el cumplimiento de las cada vez más exigentes normativas de vertimientos de los países, en los que los tratamientos primario y secundario, no sólo no son suficientes para hacer que un vertido cumpla con las disposiciones normativas de las autoridades ambientales competentes, sino que en varios casos, puede incrementar las concentraciones de algunos compuestos que hoy son vigilados por su incidencia en las restricciones de uso agrícola, como el caso de los patógenos, y por los efectos nocivos sobre el funcionamiento de los ecosistemas hídricos, como es el caso del nitrógeno y el fósforo.

Desafortunadamente, como se presentó en los capítulos 4 y 5, los procesos biológicos aerobios, los cuales son los de uso más extendido en el mundo, tienen la particularidad de multiplicar por millones, los microorganismos del licor mezclado presentes como biomasa activa en los reactores. Esta síntesis celular en la que se usan los productos de conversión de la materia orgánica como materia prima, causa también un notable crecimiento del número de organismos patógenos que, eventualmente, pueden escapar con el efluente del decantador secundario, llegando a los cuerpos hídricos receptores de los residuos o líquidos tratados.

Evidentemente, esta situación en el escenario de los países agrícolas como el nuestro, provoca serias dificultades en el uso para riego, de aguas superficiales que reciben vertidos de plantas depuradoras.

Adicionalmente, la biomasa activa de los reactores biológicos aerobios no usa todo el fósforo disponible en las aguas residuales que se tratan y, como resultado de las actividades de degradación de la materia orgánica biodegradable, se forma nitrógeno amoniacal que en presencia del oxígeno, se transformará en nitritos y, finalmente, en nitratos.

La aparición de nitrógeno amoniacal puede ser explicada por las siguientes ecuaciones de síntesis y de transformación en energía, respectivamente.



El nitrato, aunado al fósforo no utilizado, constituyen sustancias que pueden llegar a causar problemas de hipereutrofización en los cuerpos de agua lénticos y en algunos ríos de velocidades bajas. Por esta razón, deben ser eliminados hasta alcanzar los niveles aceptables establecidos para los vertidos, en las normativas ambientales.

Además de la desinfección y la eliminación de nitratos por procesos de nitrificación-desnitrificación, existen otros tratamientos terciarios o avanzados como son:

- Adsorción (con carbón activo).
- Intercambio Iónico.

- Procesos con membranas.
- Procesos de oxidación avanzada.

Estos procesos permiten remover, también, contaminantes específicos como metales pesados, agroquímicos, pesticidas y detergentes, entre otros.

2.2.1.6.2 Desinfección

La desinfección es un tratamiento terciario que busca la destrucción de los microorganismos patógenos presentes en los efluentes de las depuradoras de aguas residuales, antes de su vertido a los cuerpos hídricos receptores. Debe recordarse que los tres grandes grupos de patógenos de origen entérico que causan la mayor parte de los problemas de salud pública relacionada con enfermedades gastrointestinales son:

- Bacterias
- Virus
- Protozoos

Entre estos protozoos, los más reconocidos son los quistes de ameba. Otro organismo patógeno que debe controlarse permanentemente en las aguas y



en los lodos tratados de las depuradoras, son los huevos de helminto.

Ilustración 59: Cámara de contacto de cloro, antes de la descarga de aguas tratadas de la depuradora. Imagen tomada de:

<http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/tratam3/imagenes/4.jpg>

Para la desinfección de las aguas residuales tratadas en la depuradora, pueden emplearse los siguientes oxidantes:

- Cloro gaseoso

- Hipoclorito de sodio
- Hipoclorito de calcio
- Dióxido de cloro
- Cloruro de bromo
- Ozono
- Radiación UV (disminuye su eficiencia con la presencia de sólidos en suspensión)

Estas sustancias son altamente tóxicas para los microorganismos, destruyen su pared celular, causando su muerte, y/o inhiben su actividad enzimática, inactivándolos. Cualquier desinfectante que se use debe considerar la inactivación o destrucción de los patógenos en el menor tiempo posible, empleando dosis bajas y sin que promueva la aparición de subproductos que puedan ser dañinos para los ecosistemas hídricos receptores.



Ilustración 60: Canal de contacto para desinfección de aguas residuales tratadas.

Imagen tomada de:

<http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/tratam3/imagenes/2.jpg>

El oxidante más empleado en el mundo, por su bajo costo, su facilidad de manejo, su estabilidad y su solubilidad, entre otras, es el cloro en todas sus formas, seguido por la radiación ultravioleta (UV), muy practicada en Europa.

No obstante, la desinfección con rayos UV puede llegar a ser ineficiente, en aguas efluentes que contengan sólidos suspendidos, debido a que los

patógenos se resguardan bajo estas partículas, del efecto desinfectante de la radiación.

Para desinfección de aguas residuales, la forma de cloro más empleada es el hipoclorito de sodio (líquido). Éste se aplica al efluente de la depuradora en una cámara de mezcla, en la que se aprovecha la turbulencia que causa la caída del agua tratada para dispersar el oxidante de manera homogénea en toda la masa del vertido que será desinfectado. Posteriormente, el agua residual que recibió la dosis de cloro, pasará a un tanque de contacto que tiene unas pantallas o tabiques que mejoran la reacción del desinfectante con la masa de agua e incrementan los tiempos de contacto, mejorando la eficiencia del proceso.

Se recomienda el empleo del hipoclorito en concentraciones entre el 10 y el 20% de cloro libre disponible en solución. Las dosis aplicadas de hipoclorito de sodio son usualmente inferiores a 10 mg/L, con tiempos de contacto nunca inferiores a 30 min y, preferiblemente, de 60 minutos.

El canal de contacto, resultante de la ubicación de los tabiques en el tanque (Foto 39 y 40), debe mantener unas velocidades de flujo de 5 cm/s.

2.2.1.6.3 Nitrificación y desnitrificación

Como se mencionó anteriormente, el vertido de aguas residuales puede ocasionar problemas de hipereutrofización en lagos y embalses, a causa de la presencia de concentraciones significativas de nutrientes. Adicionalmente, altos niveles de nitrógeno en las aguas pueden causar la reducción del oxígeno disuelto en los ecosistemas hídricos receptores y, para muchas especies, puede llegar a constituirse en un tóxico.

A. Eliminación de nitrógeno

En las aguas residuales, la mayor parte del nitrógeno se encuentra en forma de nitrógeno orgánico (e.g. aminoácidos, proteínas, carbohidratos) y amoníaco (e.g. urea de la orina). Se estima que los sistemas convencionales de depuración de aguas residuales, logran eliminar sólo el 30% del nitrógeno

inicial. Para eliminar este nitrógeno remanente, se usa el proceso de nitrificación-desnitrificación, cuyas etapas pueden resumirse de la siguiente manera:

- Nitrificación: es un proceso biológico aireado en donde se agota la demanda de oxígeno del amoniaco, oxidándolo hasta su conversión a nitrato.
- Desnitrificación: en ausencia de oxígeno, el nitrato se transforma en nitrógeno gaseoso que se incorpora a la atmósfera.

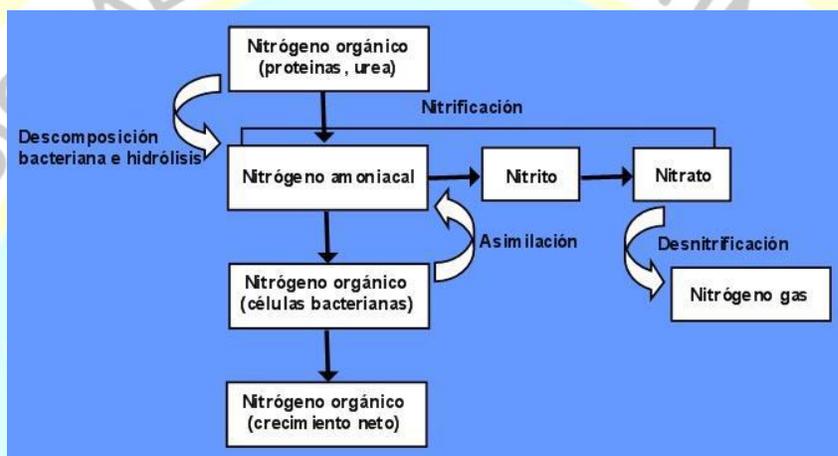
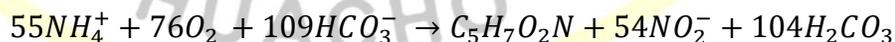


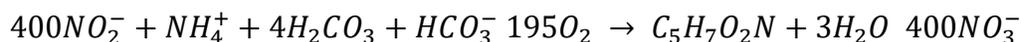
Ilustración 61: Proceso de nitrificación-desnitrificación de las aguas residuales. Imagen tomada de: <http://prueba2.aguapedia.org/master/formacion/edar/temario/tratam3/imagenes/1.jpg>

En la nitrificación, es fundamental la presencia de las bacterias Nitrosomona y Nitrobacter. Las primeras, transforman oxidativamente las formas amoniacales de nitrógeno en nitritos, mientras que las segundas, continúan oxidando los nitritos hasta la formación de nitratos. Las reacciones son las siguientes;

Para Nitrosomonas:



Para Nitrobacter:

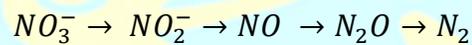


En la nitrificación, aunque aún no se logra la eliminación de nitrógeno, sí se anula su consumo de oxígeno. Para que se presente la nitrificación, debe mantenerse la concentración de oxígeno disuelto, por encima de 1 mg/L.

Esta nitrificación puede tener lugar en el mismo reactor aerobio empleado en el tratamiento biológico o secundario, tanto en procesos de biomasa fija, como suspendida. También es muy usual, emplear tanques independientes, los cuales reciben el efluente del decantador secundario. Con un reactor independiente para la nitrificación, se obtiene mayor fiabilidad y flexibilidad en el proceso.

La desnitrificación es la etapa siguiente a la nitrificación y que permite la transformación del nitrato en nitrógeno gaseoso que se escapa a la atmósfera. Esta etapa se desarrolla en un medio anóxico (sin oxígeno). En esta etapa, son fundamentales bacterias como: *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcalibacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* y *Spirillum*, para convertir las formas oxidadas de nitrógeno a otras fácilmente eliminables.

El proceso de desnitrificación se puede representar con las siguientes reacciones:



Los últimos tres compuestos son gaseosos y se pierden hacia la atmósfera. Para el correcto funcionamiento de esta etapa de desnitrificación, se hace necesaria la ausencia de oxígeno que, de estar presente, inhibe por completo la actividad enzimática de los microorganismos encargados de la transformación de los nitratos. Así mismo, se debe mantener un pH entre 7 y 8. Esta desnitrificación puede llevarse a cabo en reactores de biomasa suspendida o de biomasa fija y puede requerirse una fuente adicional de carbono como el metanol (en algunas depuradoras, mezclan los efluentes del

tratamiento secundario con aguas residuales brutas que contienen una importante cantidad de carbono como materia orgánica).



Ilustración 62: Zona anóxica para desnitrificación. Imagen tomada de: http://usuarios.arsystel.com/raulh/edar_pinedo/1207.jpg

Con este sistema se elimina cerca del 90% del nitrógeno total presente en el afluente. Recientemente, se ha demostrado que no es necesario realizar la nitrificación (en un reactor independiente) como proceso previo a la desnitrificación. La ventaja de hacer la desnitrificación sin nitrificación adicional previa (excepto la que se presenta en el reactor aerobio secundario), radica en que el agua residual aún tiene cantidades importantes de materia orgánica como fuente de carbono.

Uno de los problemas que aún no se ha logrado solventar del todo, es la necesidad de mantener una agitación mecánica en el tanque de desnitrificación (reacción anóxica) para liberar con facilidad los gases de nitrógeno que se van produciendo y para mantener unas condiciones homogéneas y sin sedimentaciones en el reactor; esto deriva en la inevitable incorporación de oxígeno nocivo para el proceso. Así mismo, la necesidad de alimentación externa de carbono, se constituye también en una de las dificultades que abre excelentes oportunidades para la investigación.

2.2.1.6.4 Eliminación de fósforo

El fósforo puede ser eliminado por vías químicas, biológicas o físicas. Si se requieren niveles de fósforo inferiores a 1 mg/L, se suele realizar filtración combinada con procesos químicos o biológicos.

Para la eliminación química, suele emplearse coagulación con aluminato sódico o cloruro férrico e, incluso, cal con adición de polímeros. No obstante, esta práctica viene siendo desestimada por el incremento sustancial de los lodos generados por la depuradora.

La eliminación física se hace mediante procesos de ósmosis inversa o ultrafiltración. Sin embargo, estos métodos son costosos por el elevado consumo de energía, así como el precio de las membranas y su corta vida útil.

A. Vía biológica de eliminación del fósforo

La bacteria *Acinetobacter* es una de las principales responsables de la eliminación de fósforo en reactores destinados a este propósito. No obstante, se han encontrado otras bacterias que compiten muy bien con este género de microorganismos, como son: *Pseudomonas vesicularis* y *Klebsiella pneumoniae*. El éxito de la eliminación biológica de fósforo consiste en alternar, para estas bacterias, un ciclo anóxico seguido de otro aerobio, el cual puede repetirse dependiendo de las necesidades de eficiencia en la eliminación de este nutriente.

Durante el ciclo anóxico (ausente de oxígeno) las bacterias responsables de la eliminación del fósforo, emplean sus reservas celulares de polifosfatos como fuente principal de energía y toman como alimento los ácidos grasos volátiles (AGV) que son productos normales de la fermentación anaerobia; de esta manera, emplean casi la totalidad del fósforo acumulado intracelularmente. Posteriormente, en el ciclo aerobio, estos microorganismos emplean las reservas de carbono como fuente energética y, como si estuvieran “temerosos” de no tener suficientes reservas energéticas para enfrentar otra fase anaerobia, almacenan grandes cantidades de fósforo, las cuales exceden sus necesidades estequiométricas. Así, una vez finalizado este proceso, la biomasa rica en fósforo debe ser eliminada.

Esta eliminación de biomasa enriquecida con fósforo, puede hacerse mediante dos procedimientos:

- Purga de fango o Bardenpho.
- Tratamiento en línea auxiliar o PhoStrip.

El proceso Bardenpho consiste en realizar la secuencia de ciclos anóxico y aerobio para después efectuar una purga de fango que es conducida al tratamiento específico de estos lodos.

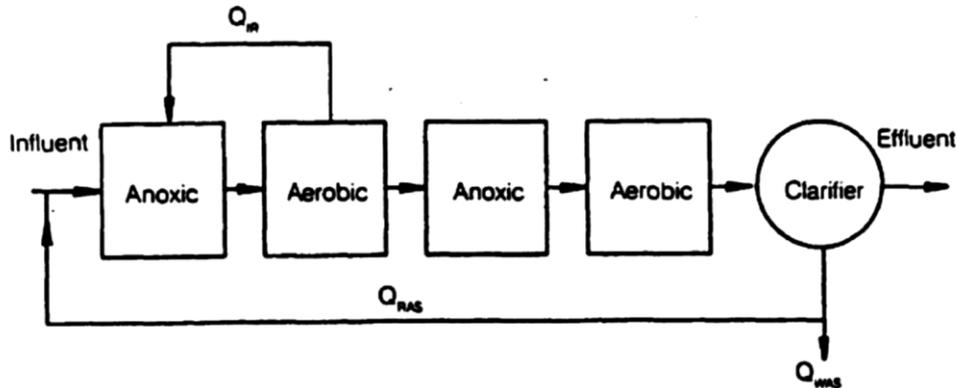


Ilustración 63: Esquema de un proceso Bardenpho® con una secuencia de cuatro reactores (dos anóxicos y dos aerobios) con recirculación del segundo al primer reactor a una tasa media de 5 veces el caudal tratado. Imagen tomada de: http://gabinetejmg.es/art_tec/Tec_elimi_nutrientes.pdf

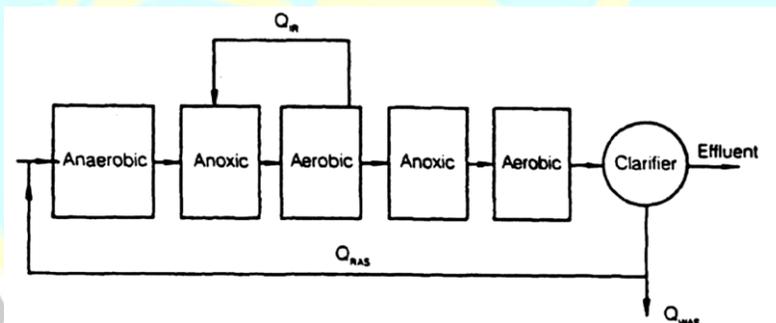


Ilustración 64: Esquema de un proceso Bardenpho® modificado, en la que se añade un reactor anaerobio (ausente de oxígeno y nitratos) en la cabecera que permite la eliminación de nitrógeno y DBO también. Imagen tomada de: http://gabinetejmg.es/art_tec/Tec_elimi_nutrientes.pdf

De otro lado, el PhoStrip, concentra la biomasa enriquecida a una línea auxiliar en donde se emplea tratamiento químico, el cual consiste (la mayoría de las veces) en una adición de cal para precipitar el fósforo.

Más recientemente se ha formulado una línea de investigación en eliminación biológica de fósforo utilizando procesos de biopelícula.

2.2.1.6.5 Reúso de aguas residuales regeneradas

Con mucha más frecuencia, en las últimas décadas se viene hablando del reúso de las aguas residuales tratadas, llamadas en Europa, “aguas residuales regeneradas”. La demanda creciente de agua para satisfacer las necesidades domésticas, agrícolas e industriales, se incrementa en la medida en que la población crece y el modelo económico impone una tendencia cada vez más consumista.

Entre las alternativas no convencionales para aprovechamiento de agua, pueden citarse las siguientes (CYTED. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua):

- Escorrentía
- Agua residual regenerada
- Agua de mar desalinizada
- Agua salobre desalinizada

El CYTED destaca que, de estas alternativas, la más importante en volumen y disponibilidad, es la de agua residual regenerada. Estas aguas tienen la ventaja adicional, de ser, en teoría, una fuente de caudal continuo; por esta razón, desde hace muchas décadas, se han venido empleando de manera directa o indirecta, especialmente, para riego de cultivos. No obstante, estas prácticas son consideradas en la actualidad, de gran riesgo para la salud pública por los patógenos asociados a este tipo de aguas.

Algunos de los usos que podrían darse a las aguas residuales regeneradas son:

- Usos domésticos y urbanos:
 - Riego de jardines privados, parques y campos deportivos.
 - Descarga de artefactos sanitarios
 - Limpieza de calles
 - Sistemas contraincendios
- Usos agrícolas:
 - Riego de cultivos.
 - Riego de pastos para alimentación de ganado
 - Acuicultura

- Cultivos de flores ornamentales
- Usos industriales:
 - Aguas de proceso
 - Torres de refrigeración
- Usos recreativos:
 - Riego de campos de golf.
 - Lagos y fuentes ornamentales sin acceso público al agua.
- Usos Ambientales:
 - Recarga de acuíferos.
 - Riego de bosques y zonas verdes sin acceso público
 - Silvicultura
 - Mantenimiento de humedales

A. Tecnologías de tratamiento para la regeneración de aguas residuales

Los tratamientos avanzados destinados a la regeneración de las aguas residuales son múltiples. No obstante, suelen preferirse aquellos que implican un gasto energético muy bajo, justificado en el hecho de que, en la mayoría de las ocasiones, se empleará para usos relativamente poco “nobles” (CYTED. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua).

➤ Tecnologías de Membrana

Son tecnologías costosas y sólo se justifica su utilización en los que el uso del agua regenerada justifica el precio final (e.g. ósmosis inversa para agua de bebida en campos de refugiados, naves espaciales, abastecimientos de emergencia o recarga de acuíferos). Entre estas tecnologías se cuentan: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis reversible y electrodesionización.

➤ Filtración Avanzada

En este caso, se usan anillas planas plásticas con ranuras. Estas anillas se comprimen unas sobre otras formando así el cuerpo del filtro. Dependiendo del nivel de compresión y el tamaño de ranuras empleadas, habrá mayor o menor filtrabilidad.

➤ Tecnologías intensivas de regeneración

Entre estas alternativas se pueden mencionar, los SBR (sequencing batch reactors: reactores secuenciales discontinuos) y los biodiscos.

Los SBR funcionan de manera análoga a los lodos activados, en los cuales los procesos de aireación y sedimentación se llevan a cabo en el mismo reactor. No demandan grandes áreas de terreno y sus costos son competitivos, generando un efluente fácilmente tratable para regeneración.

Los biodiscos son reactores de biomasa fija con discos que giran sobre un eje. La biomasa tiene dos etapas continuas de contacto: con el agua y con el aire (alimentación y respiración). Es un proceso económico, muy empleado en pequeñas instalaciones y, con una desinfección posterior del efluente generado, suele bastar para la reutilización de las aguas.

➤ Tecnologías extensivas de regeneración

Entre las alternativas se encuentran: los filtros intermitentes de arena, los sistemas de lagunaje y los humedales artificiales. En los filtros de arena, se emplea material granular entre 0,1 y 2 mm de diámetro y debe asegurarse que el lecho no se sature para mantener unas condiciones de trabajo aerobio.

Los sistemas de lagunaje ocupan mucho espacio y su funcionamiento se basa en la potenciación del fenómeno de eutrofización. Es el método que puede lograr los más altos valores de abatimiento de organismos patógenos.

Los humedales artificiales son lagunas construidas en las que se tiene un lecho de grava sembrado con macrófitas y plantas acuáticas como la espadaña o el junco. Los más empleados son los de flujo subsuperficial y los de flujo vertical.

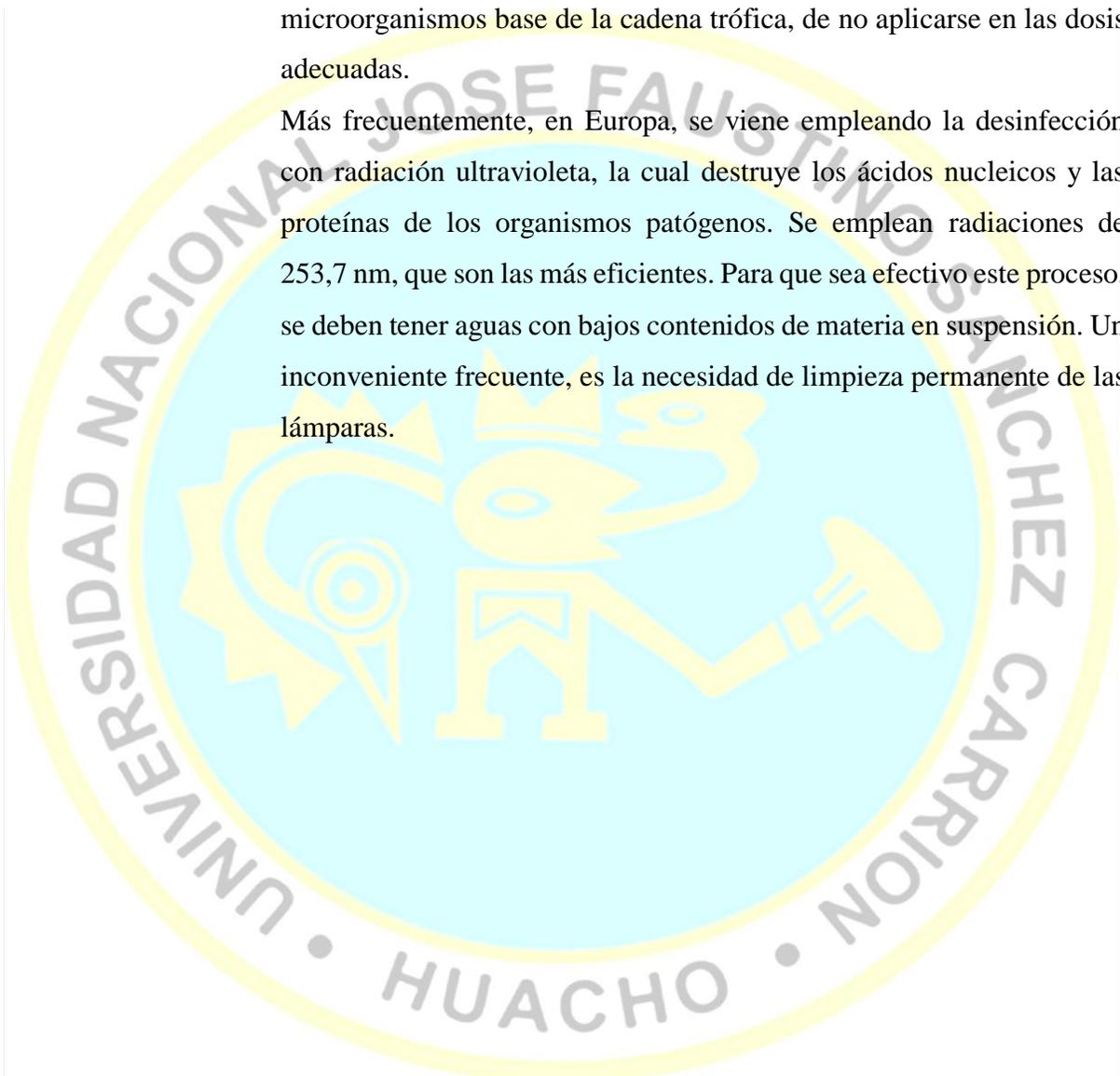
➤ Tecnologías de desinfección para regeneración

La desinfección con ozono u ozonización tiene efectos sobre virus y bacterias, principalmente. Como ventajas se cuentan que no produce olores y no es afectado por el pH del agua. En aguas con altos contenidos

de materia en suspensión, se requerirá altas dosis de ozono para asegurar su efectividad.

El dióxido de cloro también se emplea de forma extensiva en la desinfección de las aguas residuales. Entre sus inconvenientes está la alta inestabilidad y su poder biocida que puede afectar algas y otros microorganismos base de la cadena trófica, de no aplicarse en las dosis adecuadas.

Más frecuentemente, en Europa, se viene empleando la desinfección con radiación ultravioleta, la cual destruye los ácidos nucleicos y las proteínas de los organismos patógenos. Se emplean radiaciones de 253,7 nm, que son las más eficientes. Para que sea efectivo este proceso, se deben tener aguas con bajos contenidos de materia en suspensión. Un inconveniente frecuente, es la necesidad de limpieza permanente de las lámparas.



2.3 Definiciones conceptuales.

1. **Contactador:**

Según Gerin, (1999). Es un aparato mecánico de conexión, controlado mediante electroimán y de funcionamiento todo o nada. (p.23)

2. **Biopelícula:**

Según Farinati, (2017). También conocida habitualmente como “biofilm”, es una comunidad sésil muy dinámica de microorganismos, caracterizada por células irreversiblemente unidas a un sustrato o interfaz o entre sí, embebidas en una matriz extracelular de sustancias polimerizadas producidas por ellas y que exponen un fenotipo alterado con respecto al índice de crecimiento y transcripción de genes. (p.3)

3. **Excreta:**

Según Beckett, (1987). Es una sustancia de excreción, enormemente variada, pero las más abundantes son el dióxido de carbono, y los nitrogenados que se producen por alteración de grupos amino resultantes del catabolismo de las proteínas. (p. 110)

4. **Biogas:**

Según Moncayo, (2014). Es una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, producto de la digestión anaeróbica en la biomasa. (p.18)

5. **Aspersión:**

Según (Tarjuelo, 1991). Es método de riego que requiere una lluvia más o menos intensa y uniforme sobre una parcela con el objetivo de que el agua se infiltre en el mismo punto donde cae. Utiliza un dispositivo de emisión o descarga en los que la presión en el lateral, induce un caudal de salida. (p.39)

6. **Floculación:**

Según Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, (2002). Es el proceso en que las partículas desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables o aglomerados. (p.35)

7. **Tamiz:**

Según Yaque, (2013). Es una malla metálica de filamentos que se entrecruzan y que dejan unos orificios o huecos de diferentes formas, que se denominan luz de malla. (p.76)

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Estimación del caudal de diseño

Plantear una propuesta de diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, acorde a las necesidades de la población, requiere conocer datos confiables sobre los caudales que se quieren depurar. Lamentablemente, el Perú no cuenta con un monitoreo adecuado de los vertidos residuales. Por ende, los caudales de interés fueron estimados partiendo de fuentes que guardan relación directa, como por ejemplo la dotación per cápita de agua potable, precipitación diaria, entre otros. Para ello, se siguió una metodología descrita con mayor detalle dentro de este capítulo.

El primer aspecto a tomar en cuenta es la clasificación de las aguas residuales, las cuales se pueden dividir de acuerdo a su composición, tal como se señala:

- Agua residual doméstica
- Agua residual municipal

El agua residual municipal es aquella que engloba las aguas residuales urbanas y aquellas que llegan a la red de drenaje provenientes principalmente de precipitaciones.

A su vez, las aguas residuales urbanas se subdividen en aguas residuales domésticas.

Las cuales se caracterizan por su contenido biológico y químico respectivamente. En ese sentido, la clasificación del caudal residual en la comunidad campesina San Juan de Churín requiere conocer el uso del agua antes de llegar a las redes de drenaje.

Precisamente, la Tabla 31 señala el uso consuntivo del agua superficial en dicha ciudad. De ella se desprende un aspecto relevante: el pequeño porcentaje de agua destinado a las actividades industriales.

Tabla 31 Uso consuntivo del agua superficial

| Uso consuntivo del agua | Total (Hm ³) | Agrícola (Hm ³) | Poblacional (Hm ³) |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Churín - 2016 | 49.06 | 36.41 | 12.65 |
| Porcentaje | 100% | 74.22% | 25.78% |
| Churín - 2017 | 59.14 | 45.67 | 13.47 |
| Porcentaje | 100% | 77.22% | 22.78% |

Entonces, el primer caudal a tomar en cuenta está compuesto básicamente de los desechos domésticos; y corresponde a la época de estiaje. El siguiente caudal de interés es el pluvial puesto que Churin cuenta con una red de drenaje combinado, es decir, en temporadas de tormenta las aguas de precipitación se mezclarán con las domésticas produciendo un agua residual de distintas características.

En suma, el diseño contempla dos escenarios; el primero corresponde al caudal doméstico correspondiente a la temporada estiaje y el segundo al caudal combinado perteneciente al período de tormenta.

3.1.1. Caudal residual doméstico

El agua residual doméstica es el agua procedente de las instalaciones comerciales, públicas y similares. Para estimar el agua residual de esta índole es necesario, a falta de datos fiables, establecer una metodología, la cual se expondrá a continuación. En primer lugar, es necesario fijar los límites del área de interés con la finalidad de establecer la población asentada en dicha zona. En este caso en particular, la PTAR está enfocada en atender las necesidades del área de la Comunidad Campesina San Juan de Churin. En ese sentido, el estudio se restringirá a presentar una propuesta de diseño para la Comunidad Campesina San Juan de Churin. En la Figura se señalan los límites de la zona de estudio. Además, los pobladores cuentan con los servicios de agua potable y alcantarillado.

Ilustración 65 Mapa de la Zona de proyecto

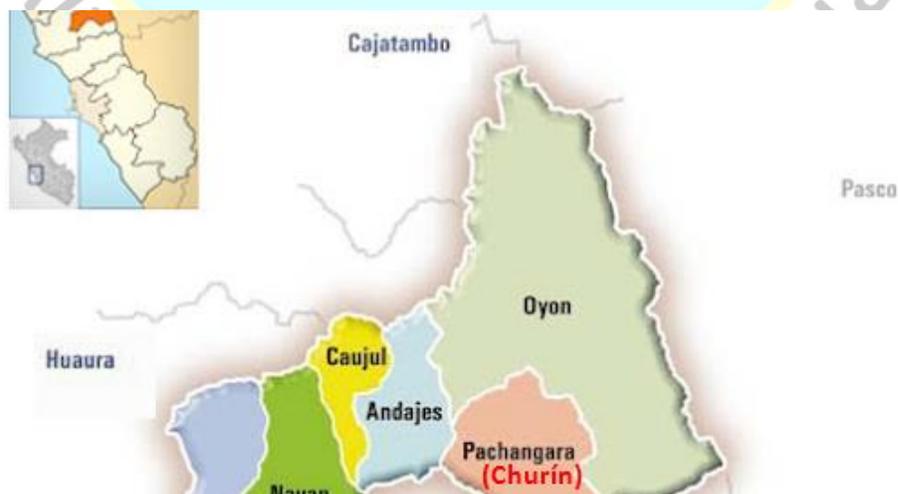
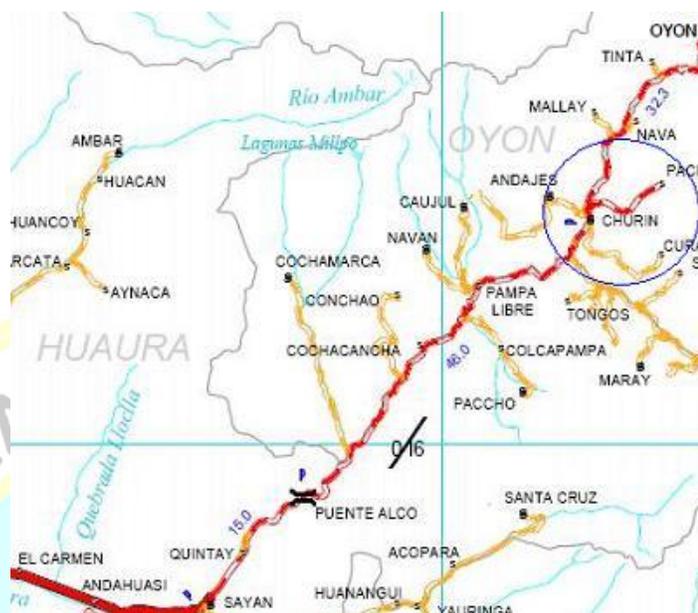
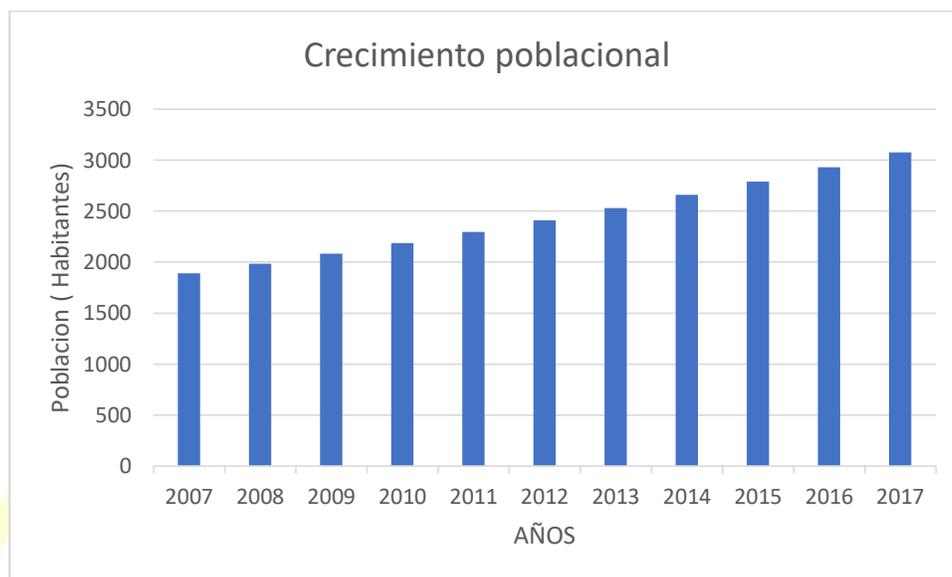


Ilustración 66 Mapa detallado de la zona de Proyecto



Seguidamente, se debe establecer la vida útil de la planta. Por lo general, se considera un horizonte de diseño de 20 a 30 años (MVCS, 2006a), en este caso se consideró un periodo de diseño de 20 años. Luego, se debe estimar la población para el año 2039, que significa el final del periodo útil de la planta, en función a la población registrada por el INEI (2015a) en el periodo 2007 - 2017 y la variación exponencial que esta experimenta. La Tabla muestra la población de la Comunidad Campesina San Juan de Churín para los últimos cinco años de los que se tiene registro.

La Figura 67 muestra el crecimiento exponencial que experimenta la población de la Comunidad Campesina San Juan de Churín. En ambos casos, el crecimiento es lento a una tasa de alrededor de 200 habitantes por año. Lo cual, en definitiva, favorece el diseño de la planta puesto que un incremento acelerado implicaría un mayor caudal de diseño.



La Tabla 32 señala la población proyectada al 2039 y cuatro años anteriores. El propósito es mostrar que la población continúa creciendo con el mismo patrón y; por lo tanto, que las ecuaciones señaladas describen apropiadamente dicho crecimiento. Asimismo, se puede apreciar que desde el 2015 hasta el 2037 la población se incrementó en un 40%, lo cual no es un hecho menor puesto que se verá reflejado en un mayor caudal de diseño.

Tabla 32 Población proyectada al año 2039

| Años | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|------|
| Churin | 7405.1 | 7775.4 | 8164.1 | 8572.4 | 9001 |

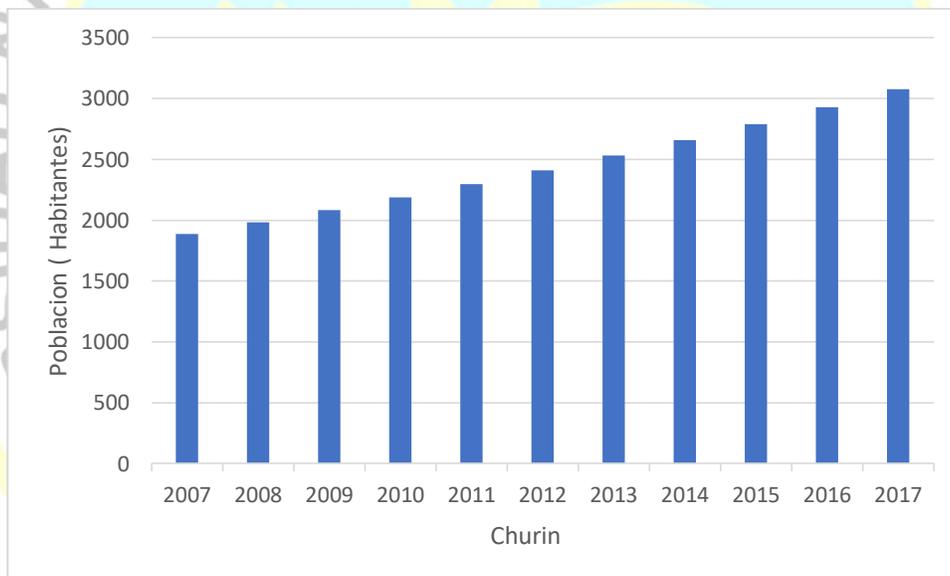
El siguiente paso es determinar cuál será el consumo de agua de los 9001 pobladores en el año 2039. Para ello, se recurrió a la producción de agua potable destinada a atender la Comunidad Campesina San Juan de Churin en el periodo 2005-2014 y la población correspondiente en cada uno de esos años (INEI, 2015a). La Tabla 33 muestra la producción de agua potable de la Municipalidad de Churin en Mm³ (miles de metros cúbicos) y el número de habitantes que es atendido por dicho servicio, para los últimos 5 años monitoreados. Asimismo, señala el porcentaje de habitantes que representa la población interés con respecto a la Comunidad Campesina San Juan de Churin, con el propósito de resaltar que la planta de tratamiento contempla satisfacer las necesidades de la mayoría de la población.

Tabla 33 Producción de agua potable

| Periodo | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|------|
| Producción de Agua Potable (m3) | 1056 | 1132 | 1276 | 1185 | 1487 |
| Población de interés | 2186.8 | 2296.1 | 2410.9 | 2531.4 | 2658 |
| Población Urbana (%) | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

A partir de los datos señalados en la Tabla 33, se estimó la población proyectada de la Comunidad Campesina San Juan de Churin para el año 2039; tal y como se muestra en la Figura 68. Dicha tasa de crecimiento es de aproximadamente de 200 personas al año y se mantiene prácticamente constante. Al igual que la población proyectada para la Comunidad Campesina San Juan de Churin, se utilizó una regresión exponencial.

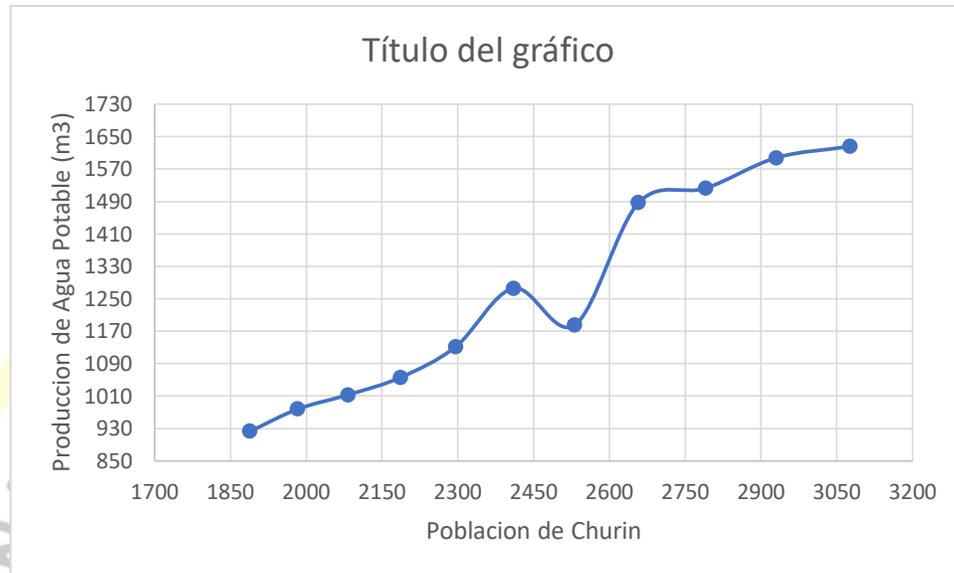
Ilustración 68 Población proyectada



Posteriormente, se fijó la relación existente entre la producción de agua potable y el número de habitantes, a partir de una regresión del tipo potencial. Por ende, se examinó la relación entre dichas variables, pero restringiendo una de estas. En otras palabras, se estimó la producción de agua potable en función de la población en el período 2007-2016; tal y como se muestra en la Figura 69. A partir de esta, se puede rescatar un hecho contradictorio en el año 2013, relacionado con la menor producción de agua

potable ante el incremento de la población. Sin embargo, esto pudo deberse a fenómenos naturales o problemas de medición.

Ilustración 69 Estimación de agua potable en función a la población



La Tabla 34 señala la producción de agua potable para los últimos cinco años de proyección. Un aspecto resaltante es que la producción de agua se incrementa año tras año, lo cual debería ocurrir en la medida de que los recursos hídricos sean suficientes para abastecer a la población. El hecho de que ocurra lo contrario representa una limitación del estudio. Asimismo, muestra la población de la Comunidad Campesina San Juan de Churín y cuanto de esta representa la población de interés.

Tabla 34 Producción de agua potable

| Años | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
|--|--------|--------|--------|--------|------|
| Producción de Agua Potable (m3) | 1734 | 1798 | 1812 | 1847 | 1887 |
| Población de interés | 7405.1 | 7775.4 | 8164.1 | 8572.4 | 9001 |
| Población Urbana (%) | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Posteriormente, se realizó una distinción entre los niveles socioeconómicos de los pobladores situados en el área urbana y rural de Huaraz, con la finalidad de estimar el consumo per cápita diario de agua potable. De hecho, se estableció una diferencia de consumo de 75 L/persona/día entre los sectores C y D. Lo cual se refleja en la siguiente ecuación:

$$PU * (CU) + PR * (CU - 75) = PTA$$

Donde:

- PU: Población urbana
- CU: Consumo urbano
- PR: Población rural
- PTA: Producción total de agua potable

La Tabla 35 indica los consumos per cápita diarios correspondientes a los últimos 5 años de proyección. Sin embargo, el de mayor relevancia es el del año 2039 puesto que permitirá estimar el caudal doméstico característico de la temporada de estiaje, que equivale al primer caudal de diseño.

Tabla 35 Consumo per cápita diarios

| Consumo per cápita proyectado | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| L/persona/día | 206 | 205 | 205 | 205 | 205 |

Una vez determinado el consumo per cápita proyectado para el 2039, se procede a estimar el caudal residual doméstico promedio. Para ello, la dotación diaria de agua potable se multiplicó por un coeficiente de retorno de 0.8 contemplado en la norma OS. 070 (MVCS, 2006b) concerniente a las redes de aguas residuales. En otras palabras, se exoneró el agua destinada al consumo humano.

$$Q_{dp} = 0.8 * \frac{PU * q_{ap}}{1000 * 24 * 3600}$$

$$Q_{dp} = 0.8 * \frac{193518 * 205}{1000 * 24 * 3600}$$

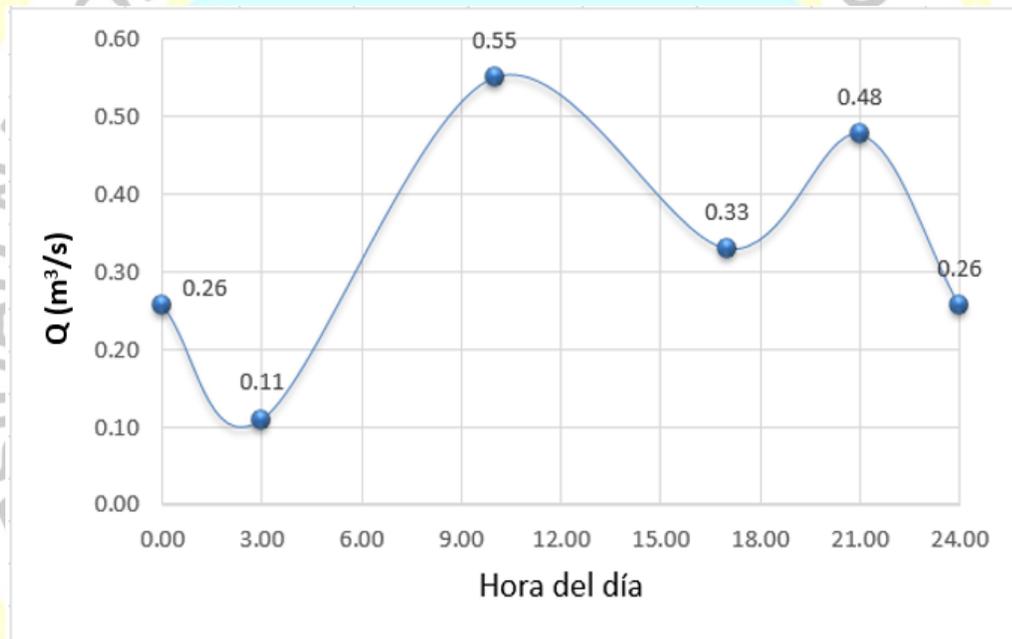
$$Q_{dp} = 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

- Q_{dp}: Caudal residual doméstico promedio (m³/s)
- PU: Población urbana
- q_{ap}: Caudal promedio de agua potable (L/persona*día)

Finalmente, se debió determinar la variación del caudal residual doméstico durante el día, para ello se utilizaron los coeficientes de mayoración y menoración recomendados por Metcalf & Eddy (2014). Prestando especial atención en el caudal pico horario, el cual representa 50% más del caudal promedio. Dicho coeficiente de mayoración está respaldado por el intervalo de 1.3 a 1.7 sugerido por Orozco (2005).

Asimismo, se debió establecer el caudal máximo diario. Para ello, Orozco (2005) recomienda utilizar un coeficiente de mayoración comprendido entre 1.5 y 1.8. La Figura muestra la variación del caudal durante el día de acuerdo a Metcalf & Eddy (2014). Es así que, en las primeras horas de la mañana, en el que el consumo de agua



es mínimo, el caudal residual doméstico también lo es. Asimismo, el caudal pico suele presentarse en las últimas horas de la mañana; mientras que el segundo caudal punta suele darse entre las 19 y 21 horas.

Así:

$$Q_{ph} = 0.55 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{pd} = 0.61 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

- Q_{ph} : Caudal punta horario (m^3/s)

- Qpd: Caudal punta diario (m³/s)

3.1.2. Agua residual doméstica

Las aguas residuales, en general, se caracterizan por su composición física, química y biológica; sin embargo, si se estudia el agua residual de esta índole este último factor es el más representativo. Dado que son las provenientes de las actividades domésticas de las personas, tales como la generación de excretas, residuos domésticos, entre otros. Efectivamente, las normas que regulan el tratamiento de vertidos residuales domésticos están enfocadas en la eliminación de parámetros como materia orgánica, nutrientes, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual.

La Tabla 36 muestra los distintos constituyentes del agua residual para distintas concentraciones. Con el objetivo de estimar el grado de contaminantes del agua residual local; y posteriormente el porcentaje de remoción requerido de acuerdo a la legislación peruana.

Tabla 36 Constituyentes del agua residual para distintas concentraciones

| Constituyente | Unidad | Concentración | | |
|-----------------------|------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | | Baja (Q = 570 L/persona.día) | Media (Q = 380 L/persona.día) | Alta (Q = 190 L/persona.día) |
| Sólidos totales | mg/L | 537 | 806 | 1612 |
| Sólidos disueltos | mg/L | 374 | 560 | 1121 |
| Fijos | mg/L | 224 | 336 | 672 |
| Volátiles | mg/L | 150 | 225 | 449 |
| Sólidos en suspensión | mg/L | 130 | 195 | 389 |
| Fijos | mg/L | 29 | 43 | 86 |
| Volátiles | mg/L | 101 | 152 | 304 |
| Sólidos sedimentables | mg/L | 8 | 12 | 23 |
| DBO5 | mg/L | 133 | 200 | 400 |
| COT | mg/L | 109 | 164 | 328 |
| DQO | mg/L | 339 | 508 | 1016 |
| Nitrógeno | mg/L | 23 | 35 | 69 |
| Orgánico | mg/L | 10 | 14 | 29 |
| Libre de amoníaco | mg/L | 13 | 21 | 40 |
| Nitritos | mg/L | 0 | 0 | 0 |
| Nitratos | mg/L | 0 | 0 | 0 |
| Fósforo | mg/L | 3.7 | 5.6 | 11 |
| Orgánico | mg/L | 2.1 | 3.2 | 6.3 |
| Inorgánico | mg/L | 1.6 | 2.4 | 4.7 |
| Grasas y aceites | mg/L | 51 | 76 | 153 |
| Coliformes totales | No./100 ml | 10E6 - 10E8 | 10E7 - 10E9 | 10E7 - 10E10 |
| Coliformes fecales | No./100 ml | 10E3 - 10E5 | 10E4 - 10E6 | 10E5 - 10E8 |
| Cryptosporidium | No./100 ml | 10E-1 - 10E1 | 10E-1 - 10E2 | 10E-1 - 10E3 |
| Giardia lamblia | No./100 ml | 10E-1 - 10E2 | 10E-1 - 10E3 | 10E-1 - 10E4 |

A partir de la Tabla 37, se determinaron las concentraciones de los constituyentes del agua residual doméstica de la zona urbana de Churin. La manera en que se estimaron dichas concentraciones fue mediante una interpolación lineal entre las concentraciones media y alta dado que el caudal promedio de Churin es equivalente a 205 L/persona*día. La Tabla señala los contaminantes que deben ser removidos de acuerdo a las normativas peruana y europea (MINAM, 2010; EC, 1998; ECC, 1991). Sin embargo, los porcentajes de eliminación correspondientes a cada una de ellas serán revisados con mayor detalle dentro del siguiente capítulo.

Tabla 37 Concentraciones de los constituyentes del agua residual doméstica de la zona urbana de Churin

| Constituyente | Unidad | Cantidad |
|--------------------|-----------|----------|
| Sólidos Totales | mg/l | 1548 |
| DBO5 | mg/l | 384 |
| DQO | mg/l | 976 |
| Nitrógeno | mg/l | 66 |
| Fosforo | mg/l | 11 |
| Grasas y Aceites | mg/l | 147 |
| Coliformes Totales | No./100ml | <10E7 |

5.2.2. Aguas pluviales

Churin, al igual que la mayoría de ciudades de la sierra peruana, se caracteriza por presentar precipitaciones importantes en los primeros meses del año; motivo por el cual las aguas pluviales corresponden un factor ineludible a tomar en cuenta en la concepción del diseño de la PTAR.

Efectivamente, este capítulo se enfoca en estudiar los efectos del agua de precipitación sobre el agua residual doméstica. Puesto que las redes de alcantarillado del área de interés corresponden a un sistema mixto, es decir, en la época de tormenta, el agua pluvial se mezcla con las aguas domésticas a lo largo de las redes de alcantarillado. Esto produce que el agua residual resultante no tenga las mismas características que sus predecesoras. La Tabla 38 indica el rango de concentraciones del agua resultante combinada. El inicio del intervalo corresponde al agua pluvial mezclada con agua doméstica de baja concentración; mientras que el final corresponde a la mezcla con agua doméstica de alta concentración.

Tabla 38 Rango de concentraciones del agua resultante combinada

| Constituyente | Unidad | Cantidad |
|--------------------|-----------|-------------|
| SST | mg/L | 270-550 |
| DBO5 | mg/L | 60-220 |
| DQO | mg/L | 260-480 |
| Nitrógeno total | mg/L | 4-17.0 |
| Nitrato | mg/L | 0.48-0.91 |
| Fósforo | mg/L | 1.2-2.8 |
| Plomo | ug/L | 140-600 |
| Coliformes fecales | MPN/100ml | 10E5 - 10E6 |

En concordancia con la Tabla 39, se estimaron las concentraciones de contaminantes presentes en el agua residual combinada. Al igual que el agua residual doméstica, se realizó una interpolación lineal; sin embargo, en este caso se cuenta únicamente con concentraciones bajas y altas. La Tabla señala los contaminantes que deben ser removidos de acuerdo a las normativas peruana y europea (MINAM, 2010; EC, 1998; ECC, 1991). Además, se aprecia que las concentraciones del caudal combinado son inferiores a las correspondientes al caudal doméstico.

Tabla 39 Estimación las concentraciones de contaminantes presentes en el agua residual combinada

| Constituyente | Unidad | Cantidad |
|--------------------|-----------|----------|
| Sólidos Totales | mg/l | 540 |
| DBO5 | mg/l | 215 |
| DQO | mg/l | 470 |
| Nitrógeno total | mg/l | 16.5 |
| Fosforo | mg/l | 2.7 |
| Coliformes Totales | No./100ml | 10E6 |

CAPITULO IV

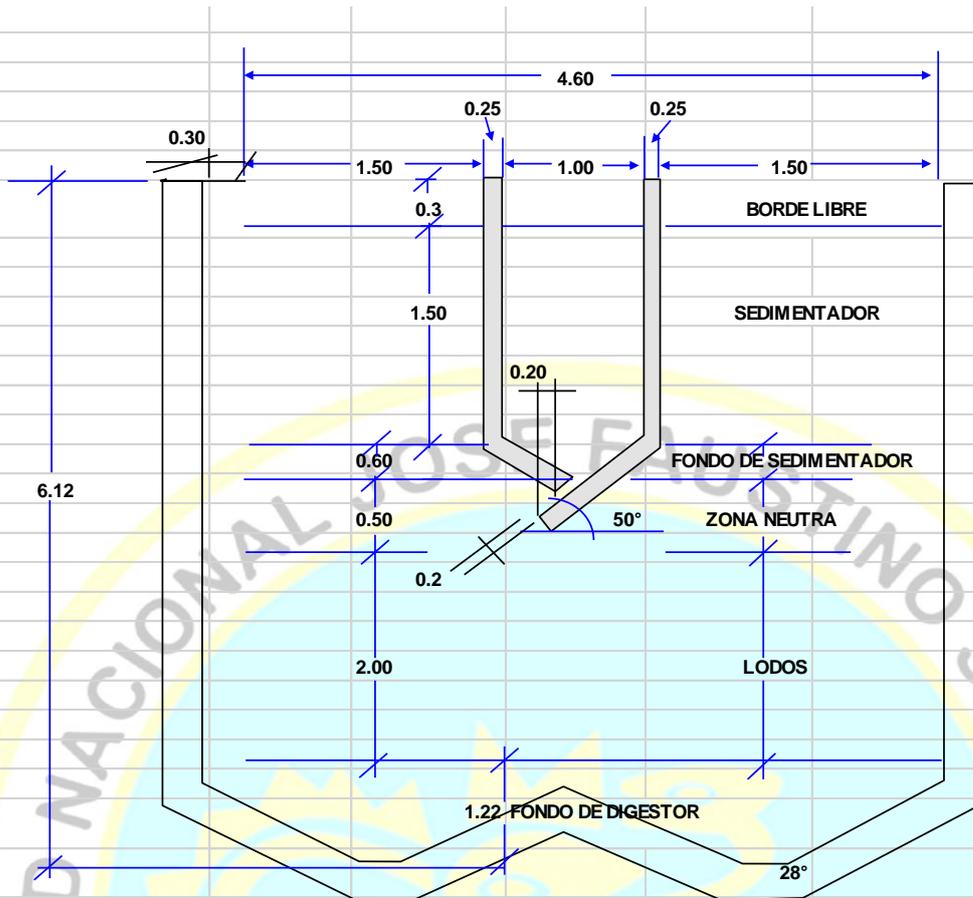
RESULTADOS

4.1 Resultados

El sistema de eliminación de las aguas residuales se realizara por gravedad, con descarga a la Planta de Tratamiento de aguas residuales.

4.1.1 Análisis de Resultados

| DISEÑO TANQUE IMHOFF DE ACUERDO AL RNE (NORMA OS.080) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|------------------------------|--|-------------------|----------------------------|------------------------------|---|-----|---|----|----|-----|----|----|---|----|----|-----|------|----|-----|
| A | PARAMETROS DE DISEÑO | | VALORES | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.- | Población actual | 920 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.- | Tasa de crecimiento (%) | 1.36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.- | Período de diseño (años) | 20.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.- | Población futura | 1205 | habitantes | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.- | Dotación de agua, l/(habxdía) | 70.00 | L/(hab x día) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.- | Factor de retorno | 0.80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.- | Altitud promedio, msnm | 63.00 | m.s.n.m. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.- | Temperatura mes más frío, en °C | 15.00 | °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9.- | Tasa de sedimentación, m3/(m2xh) | 1.0 | m3/(m2 x h)} | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.- | Periodo de retención, horas | 1.50 | horas (1.5 a 2.5) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11.- | Borde libre, m | 0.30 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.- | Volumen de digestión, l/hab a 15°C | 70.00 | L/hab a 15°C | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.- | Relación L/B (teorico) | 7.50 | > a 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14.- | Espaciamento libre pared digestor al sedimentador, metros | 1.50 | m 1.0 mínimo | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15.- | Angulo fondo sedimentador, radianes | 50.00 | (50° - 60°) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.87 | radianes | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16.- | Distancia fondo sedimentador a altura máxima de lodos (zona neutra), m | 0.50 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | Factores de capacidad relativa y tiempo de digestión de lodos | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Temperatura °C</th> <th style="text-align: center;">Tiempo digestión (días)</th> <th style="text-align: center;">Factor capacidad relativa</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">110</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">76</td> <td style="text-align: center;">1.4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">15</td> <td style="text-align: center;">55</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">0.7</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">> 25</td> <td style="text-align: center;">30</td> <td style="text-align: center;">0.5</td> </tr> </tbody> </table> | Temperatura °C | Tiempo digestión (días) | Factor capacidad relativa | 5 | 110 | 2 | 10 | 76 | 1.4 | 15 | 55 | 1 | 20 | 40 | 0.7 | > 25 | 30 | 0.5 |
| Temperatura °C | Tiempo digestión (días) | Factor capacidad relativa | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 110 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 76 | 1.4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 55 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 40 | 0.7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| > 25 | 30 | 0.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.- | Factor de capacidad relativa | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.- | Espesor muros sedimentador,m | 0.30 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.- | Inclinación de tolva en digestor | 28.00 | (15° - 30°) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 0.49 | radianes | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20.- | Numero de troncos de piramide en el largo | 2.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.- | Numero de troncos de piramide en el ancho | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.- | Altura del lodos en digestor, m | 2.00 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.- | Requerimiento lecho de secado | 0.09 | m2/hab. | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| B | RESULTADOS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.- | Caudal medio, l/día | 67.50 | m3/día | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25.- | Area de sedimentación, m2 | 2.81 | m2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26.- | Ancho zona sedimentador (B), m | 1.00 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27.- | Largo zona sedimentador (L), m | 7.50 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28.- | Prof. zona sedimentador (H), m | 1.50 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29.- | Altura del fondo del sedimentador | 0.60 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30.- | Altura total sedimentador, m | 2.40 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31.- | Volumen de digestión requerido, m3 | 84.00 | m3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32.- | Ancho tanque Imhoff (Bim), m | 4.60 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33.- | Volumen de lodos en digestor, m3 | 90.00 | m3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34.- | Superficie libre, % | 65% | (min. 30%) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35.- | Altura del fondo del digestor, m | 1.22 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 36.- | Altura total tanque imhoff, m | 6.12 | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37.- | Area de lecho de secado, m2 | 102.46 | 01 LECHO DE SECADO DE 9.50m X 9.50m | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



DISEÑO HIDRAULICO DE LECHO DE SECADO

I.- DATOS DE DISEÑO

| | | | |
|---|---------------|-------|-----------------|
| Población actual: | $P_{act} =$ | 920 | habitantes |
| Tasa de crecimiento (%): | $T (\%) =$ | 1.36 | % |
| Periodo de diseño: | Periodo = | 20.00 | años |
| Población de diseño total: | $P_{Total} =$ | 1170 | habitantes |
| Número de unidades: | $n =$ | 1 | unid. |
| Población de diseño para cada tanque: | $P =$ | 1170 | habitantes |
| Contribución per cápita de Sólidos suspendidos: | $S_s =$ | 80 | gr. SS/hab./día |
| Densidad de lodos: | $D_{lodos} =$ | 1.04 | Kg. / Lt. |
| Porcentaje de sólidos contenido en los lodos: | $\%Sól =$ | 6 | % |
| Temperatura: | $^{\circ}T =$ | 15 | $^{\circ}$ |
| Tiempo de digestión de los lodos: | $T_d =$ | 55 | días |

II.- CÁLCULOS

| | | | |
|---|---------------|--------|-----------------------|
| Caudal de Diseño: | $Q' =$ | 96.00 | $m^3/día$ |
| Carga de sólidos que ingresa al tanque séptico: | $C_s =$ | 93.62 | Kg. de SS / día |
| Masa de sólidos que conforman los lodos: | $M_{sd} =$ | 30.43 | Kg. de M_{sd} / día |
| Volumen diario de lodos digeridos: | $V_{ld} =$ | 487.58 | Lt./día |
| Volumen de lodos a extraer de los tq. sépticos: | $Vel =$ | 26.88 | m^3 |
| Profundidad de aplicación: | $h_a =$ | 0.30 | |
| Área del lecho de secado: | $A_{ls} =$ | 89.60 | m^2 |
| Relación largo / ancho: | $l^* / b^* =$ | 1 | |
| Ancho: | $a'' =$ | 9.50 | m |
| Longitud: | $L'' =$ | 9.50 | m |

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales nos permite obtener agua limpia que puede volver a ser usada en las actividades agrícolas y ganaderas de la comunidad.
- Una planta de tratamiento de aguas residuales es beneficiosa en el sentido de prevención de propagación de enfermedades que pueden estar contenidas en las aguas residuales.
- Un buen diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales ayudaría a mejorar la calidad de vida de los pobladores.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para lograr un buen diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, es necesario considerar un correcto estudio previo de suelos y cumplir con los parámetros mínimos para el dimensionamiento de cada estructura de la planta.
- Siempre es importante tomar consciencia respecto al correcto uso del agua, así como la eliminación de desechos en lugares apropiados, no mezclándose con el agua, así se ayudaría a conservar mejor la planta de tratamiento de aguas residuales.

REFERENCIAS

Fuentes Bibliográficas

- Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*. España: Universidad de Murcia, servicio de publicaciones.
- Arredondo, C. (2013). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la zona de Amanalco de Becerra, Estado de Mexico*. MEXICO D.F.: Universidad Nacional Autónoma de Mexico.
- Beckett, B. (1987). *Biology: a modern introduction*. New York, Estados Unidos: Oxford University Press.
- Collazos, C. (2008). *Tratamiento de aguas residuales*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Domínguez, r. (2015). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas para poblaciones entre 20 y 25 mil habitantes*. Liganés - España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Dueñas, R. (2015). *Evaluación y propuestas de mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales en el centro poblado de Quiquijana, distrito de Quiquijana, provincia de Quispicanchis, región Cuzco*. Cusco: Universidad Católica de Santa María.
- Farinati, A. (2017). Biopelículas: un desafío para entender la patogénesis y la terapia antiinfectiva. *Britania*, 3.
- Gerin, M. (1999). *Manual electrotécnico*. España: Schneider Electric España S.A.
- Gordillo, E. (2011). *Diseño de los sistemas de alcantallado sanitario, pluvial y tratamiento de las aguas servidas del barrio El Paraíso del distrito Metropolitano de Quito*. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica de Ecuador.
- Hernández, R. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V.
- Lozano, W. (2012). *Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales*. Bogotá.

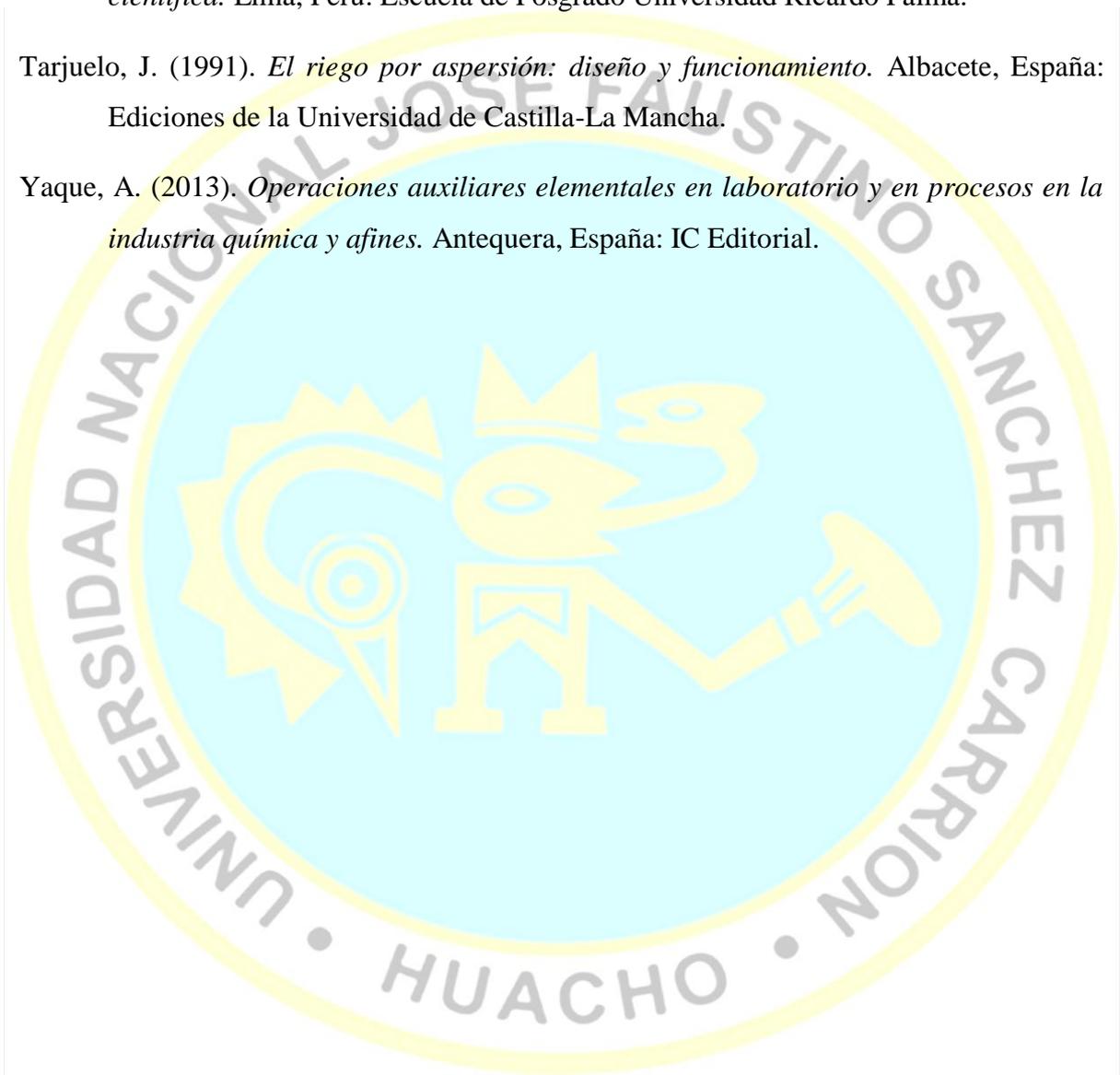
Moncayo, G. (2014). *Biodigestores tropicalizados*. Alemania: Aqualimpia engineering e.k.

Sunass, & Cooperracion Alemana. (2015). *Diagnostico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ambito de operacion de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento*. Lima: Deposito legal de la biblioteca Nacional del Peru.

Tam, J., Vera, G., & Oliveros, R. (2008). *Tipos, métodos y estrategias de investigación científica*. Lima, Perú: Escuela de Posgrado Universidad Ricardo Palma.

Tarjuelo, J. (1991). *El riego por aspersión: diseño y funcionamiento*. Albacete, España: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.

Yaque, A. (2013). *Operaciones auxiliares elementales en laboratorio y en procesos en la industria química y afines*. Antequera, España: IC Editorial.



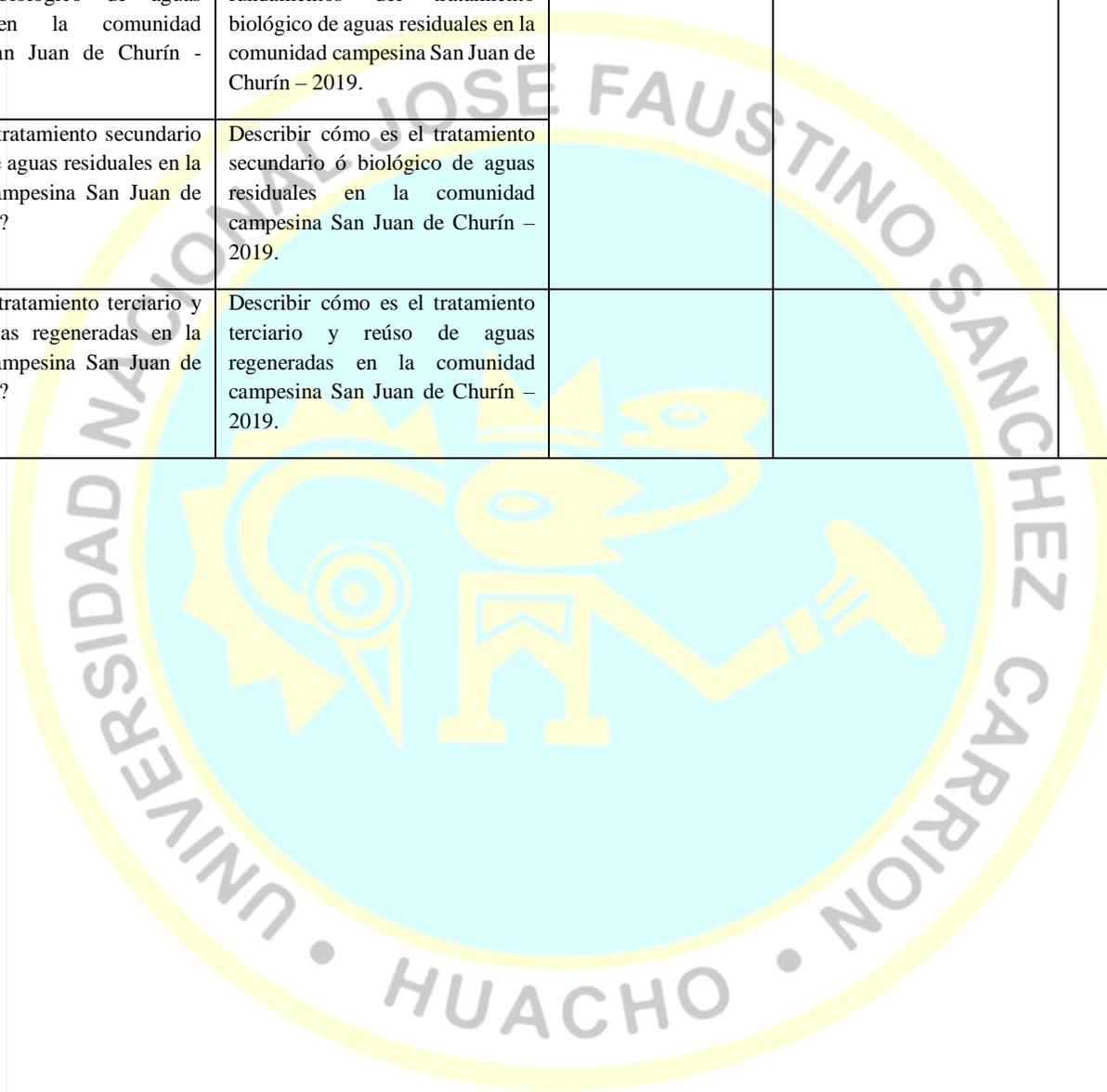
ANEXOS

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA COMUNIDAD CAMPESINA SAN JUAN DE CHURIN - 2019

| | PROBLEMA | OBJETIVO | VARIABLES | DIMENSIONES | METODOLOGÍA |
|-------------|--|---|---|--|--|
| PRINCIPAL | ¿Cuál es el impacto del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019? | Describir el impacto del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019. | VARIABLE 1 DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Naturaleza de las aguas residuales. ✓ Pre-tratamiento de aguas residuales. ✓ Tratamiento primario de aguas residuales. ✓ Fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales. ✓ Tratamiento secundario ó biológico de aguas residuales. ✓ Tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Enfoque de la Investigación: Cuantitativo 2. Tipo de Investigación: Básica 3. Diseño de Investigación No experimental - transversal 4. Nivel de Investigación descriptiva 5. Población. Muestra 6. Técnicas de recolección de datos: Encuesta 7. Estadístico de Prueba y validación Programa estadístico SPSS |
| ESPECÍFICOS | ¿Cómo es la naturaleza de las aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019? | Describir cómo es la naturaleza de las aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019. | | | |
| | ¿Cómo es el pre-tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019? | Describir cómo es el tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019. | | | |
| | ¿Cómo es el tratamiento primario de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019? | Describir cómo es el tratamiento primario de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019. | | | |

| | | | | |
|---|--|--|--|--|
| <p>¿Cuáles son los fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?</p> | <p>Describir cuáles son los fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019.</p> | | | |
| <p>¿Cómo es el tratamiento secundario ó biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?</p> | <p>Describir cómo es el tratamiento secundario ó biológico de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019.</p> | | | |
| <p>¿Cómo es el tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019?</p> | <p>Describir cómo es el tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas en la comunidad campesina San Juan de Churín - 2019.</p> | | | |



ANEXO 2: CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

| VARIABLES | DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DIMENSIONES | INDICADORES | ITEMS | Escalas y valores | Niveles y rango | Instrumento |
|--|---|------------------------------------|---|----------------|-------------------|---|-------------|
| DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | Debido al crecimiento de las industrias, crecimiento poblacional, así como la llegada de nuevas tecnologías, sustancias químicas, ha aumentado considerablemente el aporte y el nivel contaminante de los vertidos líquidos, de los cuales la mayoría sin algún tipo de tratamiento al ecosistema acuático. Por esta razón, tiene el objetivo de dar a conocer de manera práctica y sencilla los criterios fundamentales que nos permitan un adecuado dimensionamiento de los sistemas que más se usan para la depuración de aguas residuales en el ámbito rural, urbano e industrial. (Lozano, 2012, p.19-20) | Naturaleza de las aguas residuales | Origen y características de las aguas residuales | 1-5 | LIKERT | 80 a Más: ALTO 60 a 79: MEDIO 59 a Menos: BAJO | Encuesta |
| | | | Carga contaminante y habitantes equivalentes | | | | |
| | | | Esquema de depuración | | | | |
| | | | Consideraciones preliminares y criterios de selección | | | | |
| | | | Cálculos hidráulicos | | | | |
| | | Pretratamiento | Caudales de diseño y canal de entrada | 11-14 15-18 | | | |
| | | | Pozo de muy gruesos | | | | |
| | | | Desbaste | | | | |
| | | | Desarenador | | | | |
| | | Tratamiento primario | Desarenador – Desengrasador | 11-14 15-18 | | | |
| | | | Fundamentos de la decantación primaria | | | | |
| | | | Tamices | | | | |
| | | | Decantador primario | | | | |
| | | | Decantación asistida químicamente | | | | |
| | | | Manejo de residuos de pretratamiento y de lodos primarios | | | | |

| | | | | | | | |
|--|--|---|---|-------------------|--|--|--|
| | | | Teoría de la aireación | | | | |
| | | | Equipos aireadores | | | | |
| | | Fundamentos del tratamiento biológico | Teoría de la depuración biológica | | | | |
| | | | Control del proceso biológico | | | | |
| | | | Modelos de reactores y características | | | | |
| | | | Tratamiento secundario o biológico | Lodos activados | | | |
| | | | | Filtro percolador | | | |
| | | Sistemas anaerobios | | | | | |
| | | Decantador secundario | | | | | |
| | | Manejo de lodos secundarios | | | | | |
| | | Tratamiento terciario y reúso de aguas residuales regeneradas | Justificación del tratamiento terciario | | | | |
| | | | Desinfección | | | | |
| | | | Nitrificación y desnitrificación | | | | |
| | | | Eliminación de fósforo | | | | |
| | | | Reúso de aguas residuales regeneradas | | | | |

ANEXO 3: VALIDEZ DEL INSTRUMENTO

La validez del instrumento de la presente investigación, se realizó por medio del juicio de expertos, en donde ellos evaluaron y a criterio propio calificaron el contenido del cuestionario empleado.

A. NÚMERO ÓPTIMO DE EXPERTOS:

Aunque no hay forma de determinar el número óptimo de expertos para participar en una encuesta Delphi, estudios realizados por investigadores de la Rand Corporation, señalan que si bien parece necesario un mínimo de siete expertos habida cuenta que el error disminuye notablemente por cada experto añadido hasta llegar a los siete expertos. En el presente trabajo de investigación se ha elegido 03 (tres) expertos por la sencilla razón que, si 2 expertos pueden tener juicios opuestos, un tercero define o inclina el balance a cualquiera de ellos; además al fijar más expertos sufriremos el incremento en costo y trabajo de investigación, lo cual no compensa la mejora.

B. CONFECCIÓN DEL LISTADO DE EXPERTOS:

La etapa es importante en cuanto que el término de “experto” es ambiguo. Con independencia de sus títulos, su función o su nivel jerárquico, el experto será elegido por su capacidad de encarar el futuro y posea conocimientos sobre el tema consultado. La falta de independencia de los expertos puede constituir un inconveniente; por esta razón los expertos son aislados y sus opiniones son recogidas por vía postal o electrónica y de forma anónima; así pues, se obtiene la opinión real de cada experto y no la opinión más o menos falseada por un proceso de grupo.

En la presente investigación existen 02 expertos de vasta experiencia en temas de ingeniería, el último experto es un ingeniero Sanitario que es neutral.

Los expertos que realizaron esta encuesta fueron los siguientes:

Experto 1: Sánchez Arroyo Jhon Ronald

Experto 2: Sánchez Díaz Segundo Manuel

Experto 3: Mujica Tenorio David Alfredo

Las calificaciones para los criterios de validación, que se mencionan en la hoja de juicio de experto con respecto al contenido del instrumento, se muestran en la siguiente tabla:

| N° PREGUNTA Y ALTERNATIVA | EXPERTOS | | | Puntaje |
|----------------------------------|----------|----|----|---------|
| | E1 | E2 | E3 | |
| Pregunta N° 1 y sus alternativas | 5 | 5 | 4 | 14 |
| Pregunta N° 2 y sus alternativas | 4 | 4 | 5 | 13 |
| Pregunta N° 3 y sus alternativas | 5 | 5 | 4 | 14 |
| Pregunta N° 4 y sus alternativas | 5 | 3 | 5 | 13 |
| Pregunta N° 5 y sus alternativas | 4 | 5 | 5 | 14 |
| Pregunta N° 6 y sus alternativas | 4 | 4 | 4 | 12 |
| Puntaje total | 27 | 26 | 27 | 80 |

- Donde:
- 1 = Totalmente en desacuerdo (TD)
 - 2 = En desacuerdo (ED)
 - 3 = Ni de acuerdo ni en desacuerdo (NA-ND)
 - 4 = De acuerdo (DA)
 - 5 = Totalmente de acuerdo (TA)

FUENTE: Elaboración propia

C. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE VALIDEZ:

$$\text{Validez} = \frac{\text{Puntaje obtenido}}{\text{Máxima valoración}}$$

$$\text{Validez} = \frac{80}{90} = 0,88 = 88\%$$

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA COMUNIDAD CAMPESINA SAN JUAN DE CHURIN, de acuerdo al criterio de los expertos, tiene una validez general de 88%, la cual es una excelente validez, según la escala de validez el instrumento que se ve en la siguiente tabla:

| ESCALA | INDICADOR |
|-------------|------------------|
| 0.01 – 0.20 | Muy baja validez |
| 0.21 – 0.40 | Validez baja |
| 0.41 – 0.60 | Moderada validez |
| 0.61 – 0.80 | Alta validez |
| 0.81 – 1.00 | Muy alta validez |

D. CONFIABILIDAD DEL INSTRUMENTO

Se realizó el análisis de fiabilidad en el programa estadístico SPSS Statistics 22.0 al instrumento aplicado a todos los participantes o integrantes de la comunidad (21 pobladores de la zona de casas seleccionadas con áreas que utilizan el riego). Se obtuvo una fiabilidad de 0,736 este instrumento estuvo conformado por 06 items, distribuidos para la variable independiente DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, en 6 dimensiones (Naturaleza de las aguas residuales, Pre-tratamiento de aguas residuales, Tratamiento primario de aguas residuales, Fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales, Tratamiento secundario ó biológico de aguas residuales, Tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas).

| Alpha de Cronbach | N° de elementos |
|-------------------|-----------------|
| 0,736 | 06 |

Fuente: Elaboración propia

Esto quiere decir que el instrumento tiene una valoración de alta validez según la escala de expertos, como se muestra a continuación en la tabla:

| ESCALA | INDICADOR |
|-------------|------------------|
| 0.01 – 0.20 | Muy baja validez |
| 0.21 – 0.40 | Validez baja |
| 0.41 – 0.60 | Moderada validez |
| 0.61 – 0.80 | Alta validez |
| 0.81 – 1.00 | Muy alta validez |

ANEXO 4: CUESTIONARIO – ENCUESTA

UNIVERSIDAD NACIONAL JOSE FAUSTINO SANCHEZ CARRION

CUESTIONARIO DE ENCUESTA PARA MEDIR EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA COMUNIDAD CAMPESINA SAN JUAN DE CHURIN.

A.- Presentación:

Estimado(a) señor(a), el presente cuestionario es parte de una investigación que tiene por finalidad obtener información, acerca del Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales en la comunidad campesina San Juan de Churín. Respuestas personales que solamente, son de gran importancia para nuestra investigación y que serán procesadas con toda confidencialidad respetando el anonimato en la presentación de los resultados.

B.- Indicaciones:

- ✓ Este cuestionario es anónimo. Por favor responda con sinceridad.
- ✓ Lea detenidamente cada ítem. Cada uno tiene dos respuestas, de las cuales solo debe seleccionar una.
- ✓ Conteste a las preguntas marcando con una “X” en un solo recuadro según su opinión. La escala de calificación es la siguiente:

A = alto

M = medio

C = bajo

| Ítem | DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | A | M | B |
|------|--|---|---|---|
| 1 | ¿Cree Ud. que el Diseño de una planta de tratamiento dará comodidad a la naturaleza de las aguas residuales? | | | |
| 2 | ¿Cree Ud. que el Diseño de una planta de tratamiento depende de un buen pre-tratamiento de aguas residuales? | | | |
| 3 | ¿Cree Ud. que el Diseño de una planta de tratamiento depende de un buen tratamiento de aguas residuales? | | | |
| 4 | ¿Cree Ud. que el Diseño de una planta de tratamiento depende de los fundamentos del tratamiento biológico de aguas residuales? | | | |
| 5 | ¿Cree Ud. que el Diseño de una planta de tratamiento depende del tratamiento secundario ó biológico de aguas residuales? | | | |
| 6 | ¿Cree Ud. que el Diseño de una planta de tratamiento mejorará el tratamiento terciario y reúso de aguas regeneradas? | | | |

ANEXO 5: FIRMAS DE LOS INGENIEROS QUE VALIDAN EL PROYECTO

