

TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

INGENIERÍA AMBIENTAL

Informe final de proyectos de investigación y extensión

Mitigación de malos olores generados en plantas de tratamiento de aguas residuales: Estudio de caso El Roble de Puntarenas

Elaborado por:

Ing. Jorge Calvo Gutiérrez, M.Sc.

Ing. David Hernández Parra, Lic.

Junio 2016

TABLA DE CONTENIDO

1.	CÓDIGO Y TÍTULO DEL PROYECTO	5
2.	AUTORES Y DIRECCIONES	5
3.	RESUMEN.....	6
4.	PALABRAS CLAVES	6
5.	INTRODUCCIÓN	7
6.	MARCO TEÓRICO	11
6.1	Olores y odorantes.....	11
6.1.1	Emisiones de olores y odorantes en las PTARs	12
6.1.2	Compuestos odorantes en PTARs	15
6.1.3	Implicaciones en la salud por la exposición a compuestos odorantes y olores.	18
6.1.4	Factores de emisión de olor	19
6.2	Legislación Nacional e internacional	20
6.2.1	Legislación nacional.....	20
6.2.2	Legislación internacional.....	20
6.3	Técnicas de cuantificación de compuestos odorantes y olores	22
6.3.1	Muestreo de olores y odorantes.....	22
6.4	Dispersión de olores	24
6.4.1	Estabilidad atmosférica	24
6.4.2	Modelos de dispersión Atmosférica	25
6.4.3	Sistemas de control biológicos del olor en PTAR.	29
7.	METODOLOGÍA	37
7.1	Lugar de estudio	37
7.2	Caracterización de las condiciones actuales de la PTAR en cuanto a la generación de olores	38
7.2.1	Descripción del sistema de tratamiento	38
7.2.2	Determinación de compuestos odorantes y olores.....	39
7.2.3	Estimación de emisiones.....	40
7.3	Percepción comunitaria del impacto de los olores.....	41
7.3.1	Selección del área de aplicación de la encuesta.	41

7.3.2	Aplicación de la encuesta	42
7.3.3	Análisis de resultados.....	42
7.3.4	Determinación de estabilidades atmosféricas.....	42
7.4	Simulación de la dispersión de olores mediante el modelo de penacho gaussiano.....	43
7.4.1	Estudio meteorológico	43
7.4.2	Simulación de la dispersión de olores.....	43
8.	RESULTADOS	46
8.1	Caracterización de las condiciones actuales de la PTAR en cuanto a la generación de olores	46
8.1.1	Determinación de compuestos odorantes y olores	46
8.1.2	Emisiones teóricas.....	54
8.2	Percepción comunitaria del impacto de los olores.	55
8.2.1	Encuesta a usuarios de la planta de tratamiento	55
8.3	Simulación de la dispersión de olores mediante el Modelo de Penacho Gaussiano	62
8.3.1	Estudio meteorológico	62
8.3.2	Simulación de dispersión de olores y odorantes.	66
8.4	ATIVIDAD METANOGENICA	72
8.5	Biofiltro	73
9.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	78
10.	RECOMENDACIONES	80
11.	AGRADECIMIENTOS	83
12.	REFERENCIAS	84
13.	APÉNDICES	91
	Apéndice 1: Tiempo de retención en las unidades	92
	Apéndice 3: Descripción del sistema de tratamiento	94
	Apéndice 4: Puntos de muestreo	99
	Apéndice 5: Encuesta de percepción de olores	100
	Apéndice 6: Cuantificación de casas a encuestar por sector	101
	Apéndice 7: Desviación estándar de la distribución de la concentración horizontal y vertical para las diferentes estabilidades	103

Apéndice 10: Análisis de componentes principales	104
Apéndice 11: Prueba de contraste de hipótesis entre proporciones	105
Apéndice 12: Prueba de hipótesis para velocidad y dirección del viento.....	106
Apéndice 13: Valores de concentración al variar el flujo de succión.....	108
14. Anexos.....	114
Anexo 1: Valores promedios para el periodo del año 2004 al 2013 de datos meteorológicos	115
Anexo 2: Factores de emisión de concentración de olores para una PTAR.	116
Anexo 3: Encuesta aplicada previamente por el AYA.....	117
Anexo 4: Porcentaje de cobertura de nubes	118
Anexo 5: Resultados de del muestreo y análisis de olores, así como de odorantes	119

1. CÓDIGO Y TÍTULO DEL PROYECTO

Código del Proyecto: 5402-1460-8001

Nombre del proyecto o actividad: Estrategias aplicables en el ámbito costarricense para mitigación de malos olores generados en Plantas de Tratamiento y Estaciones de Bombeo de Aguas Residuales, con miras a proteger la calidad de vida y el valor de las propiedades de vecinos ubicados en la periferia de estos sistemas

2. AUTORES Y DIRECCIONES

Coordinador del Proyecto:

	Investigador:	Grado Académico
Coordinador del proyecto	Jorge Calvo Gutiérrez	Maestría Académica

Investigadores:

	Investigador:	Grado Académico
Investigador Jun-Dic 2015	David Hernández Parra	Licenciatura
Investigador Febr-May 2014	Diana Zambrano Piamba	Maestría Académica
Investigador Contrapartida AyA	Andrés Lazo Páez*	Maestría Académica

* Investigador del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado, Recolección y Tratamiento. Subgerencia Sistemas Periféricos

3. RESUMEN

La planta de tratamiento de aguas residuales de El Roble de Puntarenas, administrada por el AyA y construida hace más de 20 años, no cuenta con medidas apropiadas para el control de malos olores en sus unidades de pre-tratamiento, tratamiento primario, y tratamiento de lodos residuales.

Con el fin de encontrar opciones viables para mitigar el impacto negativo debido a los malos olores, se realizó un diagnóstico de las condiciones operativas de la PTAR, se evaluó la percepción de la comunidad mediante la aplicación de una encuesta, el 76% de los encuestados indica que sí siente los olores emitidos por la PTAR obteniendo un radio de influencia a los 600 m, el 57% indican que los olores son fuertes, el 83% los percibe como fecal. Las horas a las cuales se sienten más los olores son: 6:00 a 9:00, 15:00 a 18:00 y 18:00 a las 21:00, y en la época lluviosa es donde se perciben más los olores.

Se analizó los odorantes (sulfuro de hidrógeno (H₂S), amoníaco (NH₃), mercaptanos y compuestos orgánicos volátiles (COVs) mediante cromatografía de gases acoplada a espectrofometría de masas (CG-MS) en la fase aire y agua, y los olores con olfatometría. Los puntos fueron el tamiz, el sedimentador primario y el tanque de lodos, y con factores de emisión. Posteriormente, se realizó una evaluación con el modelo de dispersión atmosférica para determinar las distancias a las cuales se presentan las mayores concentraciones de olores y odorantes generados en la PTAR.

Se determinó el estado actual de la PTAR en términos de generación de olores, obteniendo caudales mayores (hasta un 30%) en comparación al valor de diseño (85l/s) y las unidades no cuentan con sistemas de control de olores.

Posteriormente, se diseñó y construyó un filtro a escala para evaluación la capacidad de controlar la liberación de olores empleando un medio filtrante biológico. La validación del sistema filtrante (filtro prototipo) tuvo un retraso debido a que no se aprobó la compra del equipo de análisis de gases portátil para realizar las mediciones y a pesar de que se logró conseguir el equipo con la Universidad Nacional la celda de medición de sulfuro de hidrógeno llegó a destiempo.

Finalmente, toda la información recopilada en este proyecto sirvió de base la realización del proyecto final de graduación de la Ing. Luz Sáenz Sánchez, y la preparación del artículo científico a publicarse en la Revista Tecnología en Marcha volumen número 29-2 correspondiente al mes de junio de este año.

Palabras clave: Olor, Odorantes, Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Modelo de Penacho Gaussiano.

4. PALABRAS CLAVES

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Olor, Odorantes, Modelo de Penacho Gaussiano, Biofiltro.

5. INTRODUCCIÓN

A pesar de que la legislación nacional establece requerimientos a cumplir para la aprobación y operación de PTAR, así como para el vertido y reuso de aguas residuales, no indica criterios claros relacionados con la potencial generación de malos olores en este tipo de instalaciones. Alguna otra reglamentación, tal como aquella que regula la Inmisión de Contaminantes Atmosféricos, presenta límites máximos permisibles relativamente altos para valores de componentes típicos que producen malos olores. Es decir, los valores que típicamente se presentan en ambientes abiertos tales como el que existe en muchas PTAR son menores a lo que se podría encontrar en industria u otras aplicaciones similares (Henry & Heinke, 1999).

Según (Körner, 2008), un tipo de solución muy utilizado a nivel mundial para mitigar la generación de malos olores es el uso de biofiltros con material de soporte natural. Es decir, se fabrica una estructura donde se crean las condiciones apropiadas para el surgimiento de una biomasa capaz de transformar moléculas potencialmente generadoras de malos olores en productos con otras propiedades más aceptables. Aunque existen múltiples parámetros que rigen el desempeño de este tipo de alternativa, uno muy importante es el medio de soporte a utilizar. Es por ello que se requiere no sólo de pruebas piloto para dimensionar la estructura, sino también de la determinación de si las condiciones existentes en El Roble son apropiadas para la implementación de biofiltración de efluentes gaseosos.

Otra alternativa muy utilizada a nivel mundial es la atomización de productos químicos sobre las estructuras donde se generan los malos olores. Tal opción consiste en la implementación de un sistema de boquillas y tubería de distribución para atomizar un producto con características químicas propicias para atrapar las moléculas potencialmente generadoras de malos olores (OMI, 2013). Es decir, no se enmascara el olor ni existe transformación de las moléculas, sino que simplemente se logra un efecto “secuestrante” de las mismas en fase gaseosa. Uno de los aspectos más importantes a determinar para este tipo de alternativas, es el mecanismo real por medio del cual actúan los productos químicos en cuestión. Lo anterior enfocado a buscar un producto a nivel nacional que pueda ser utilizado, incluso verificar si existe algún compuesto natural que pueda cumplir la misma función. Todo lo anterior para minimizar una potencial dependencia de casas comerciales específicas, y en procura de una sustancia con un grado de toxicidad mínimo para el personal operativo. Aspectos ambientales también son sumamente importantes en una evaluación para este tipo de alternativas (Metcalf & Eddy, 2004).

Como parte de las alternativas existentes para atacar la problemática pero dentro de la matriz agua está el uso de productos secuestrantes, cuyo efecto es similar al de los productos atomizados. Esto con la diferencia de la fase en la cual tiene lugar la acción de mitigación del mal olor. Asimismo, se debe estudiar el uso de productos utilizados comúnmente como coagulantes, que por su composición química tienen la capacidad de reaccionar con elementos tales como el azufre, lo cual podría mitigar en alguna medida el mal olor (Gil, 2013). En el caso de este tipo de alternativas es

importante evaluar, adicionalmente, la factibilidad de conseguir los insumos en el mercado nacional.

Una serie de productos que también son utilizados directamente en la matriz agua son aquellos que buscan mejorar los mecanismos biológicos de degradación en el agua residual, ya sea por la adición de microorganismos, o bien por la adición de micronutrientes y otros productos activadores de los procesos metabólicos existentes en la biología que contiene el agua residual. Aunque este tipo de soluciones típicamente requieren de un tiempo de contacto largo para poder observar su efecto, es importante considerarlos como parte del análisis integral que se pretende realizar. Con esto se estaría abarcando toda la gama de opciones disponibles a nivel mundial, aplicables a las condiciones existentes en El Roble.

Las actividades humanas directa o indirectamente generan olores que ocasionan molestia y daños a la salud de las poblaciones vecinas que recientemente han sido considerados como contaminantes atmosféricos (Capelli, Sironi, Del Rosso, & Guillot, 2013).

Actividades como el tratamiento de residuos mediante rellenos sanitarios y PTARs han contribuido a la emisión de gases odorantes por los procesos que se llevan a cabo en sus unidades (Barrera Curihuentro, 2010), como por ejemplo la fermentación y degradación de la materia orgánica (MO) (Barrera Curihuentro, 2010) y por la naturaleza propia de las aguas residuales.

Las principales fuentes de olor en las PTARs se sitúan en los procesos de tratamiento primario como sedimentadores y en las unidades de tratamiento de lodos como espesadores, unidades de almacenamiento y deshidratación (Capelli, Sironi, Del Rosso, & Céntola, 2009).

Algunas causas de generación de olores en las PTARs son el mal diseño (sobredimensión y tiempos de retención altos) y la operación inadecuada (capacidades de tratamientos mayores o menores y parámetros diferentes a los de su diseño como pH, temperatura y oxígeno disuelto) (Morgan Sagastume, Revah Moiseev, & Noyola Robles, 2000).

Los principales compuestos olorosos emitidos desde las PTAR son H₂S, mercaptanos, NH₃, y COVs (Latos, Karageorgos, Kalogerakis, & Lazaridis, 2010); los cuales están presentes en las aguas residuales por la utilización de productos de limpieza de los hogares, solventes y derivados del petróleo; así como por compuestos asociados con los desechos humanos y por transformaciones biológicas durante su recolección (Lehtinen & Veijanen, 2010).

Las olores pueden afectar la calidad de la vida humana produciendo estrés psicológico y síntomas como: insomnio, pérdida de apetito y comportamiento irracional (Ziya Öztürk et al., 2009). También náuseas, dolor de cabeza, disminución del consumo de agua, desequilibrios respiratorios, vómitos y perturbaciones mentales (Stellacci, Liberti, Notarnicola, & Haas, 2010). Asimismo pueden provocar pérdidas económicas dado que los precios de las viviendas ubicadas cerca de la PTAR pueden ser hasta un 15% más baratas con respecto a casas más alejadas (Lebrero, Bouchy, Stuetz, & Muñoz, 2011).

Según Capelli et al (2011) hay diferentes métodos que pueden ser utilizados con el fin de caracterizar olores y compuestos odorantes. Los principales son las mediciones sensoriales (olores) y las mediciones químicas (odorantes). Las mediciones sensoriales emplean el olfato humano como detector mientras las mediciones químicas detectan los componentes de las mezclas de gases a través de métodos analíticos (Dincer & Muezzinoglu, 2007) como por ejemplo cromatografía de gases con espectrometría de masas (GC-MS) (Capelli et al., 2011). Este proceso es válido para identificar y caracterizar la fuente de emisión. También se puede utilizar los factores de emisión con el fin de determinar la concentración de olores (Capelli et al., 2009).

No obstante, se debe estudiar la dispersión de las emisiones procedentes de las fuentes con el fin de conocer la distribución de la pluma de los olores y los odorantes para determinar el posible impacto generado en la población. También se puede realizar la dispersión de los olores para conocer el comportamiento de la pluma antes de la construcción de una PTAR o si se realiza una modificación al sistema de tratamiento.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) ha avalado la utilización de ciertos modelos de dispersión para conocer el impacto que se genera por la emisión de olores y odorantes en la periferia de las PTAR, tales como Calpuff, Aermod, y el Penacho Gaussiano (USEPA, 2014). Este último es muy utilizado ya que requiere de poca información meteorológica y se puede trabajar para fuentes de emisión puntuales, lineales y áreas (Barrera Curihuentro, 2010).

Actualmente Costa Rica carece de legislación que controle la emisión e inmisión de olores y odorantes. Sin embargo, otros países si han definido legislación en dicho tema. Por ejemplo Holanda ha establecido normativas para controlar las concentraciones de olores¹ definiendo un límite máximo en inmisión de 1 OU/m³ para zonas residenciales (Lebrero et al., 2011). Mientras para la concentración de odorantes, como por ejemplo el H₂S el límite máximo permisible en inmisión es de 10 mg/ m³.

Según Fallas (2012) en Costa Rica existían 51 PTAR domésticas, si estas no cumplen con un diseño adecuado y control operacional son susceptibles a generar olores, como es el caso de la PTAR de El Roble de Puntarenas, que en el año 2014 recibió cinco denuncias² ante el Ministerio de Salud, asociadas con la generación de olores en el manejo de lodos y por un aumento del caudal de tratamiento (Ugalde Castillo, 2015).

La presente investigación tiene como finalidad conocer las condiciones actuales de la PTAR de El Roble de Puntarenas en cuanto a generación de olores y odorantes en tres puntos (tamiz, sedimentador y tanque de lodos; los cuales se escogieron basados en un estudio recopilado por

¹ Cuya medida es la unidad de olor por metro cubico (OU/m³),

² El estado de las denuncias se desconoce.

(Carrera-Chapela, Donoso-Bravo, Souto, & Ruiz-Filippi, 2014)), tanto en la matriz aire como en agua. Lo anterior con el fin de conocer los compuestos y posibles causas de generación.

En la investigación se aplicó una encuesta para determinar la percepción de la inmisión de olores en la comunidad aledaña a la PTAR, identificar posibles odorantes, épocas del año y horas del día en donde se perciben más los olores, además para identificar el área impactada por la inmisión de compuestos odorantes y olores.

Además, se aplicó el modelo de Penacho Gaussiano con el fin de determinar las distancias a las cuales se presentan las mayores concentraciones de olores y odorantes para las diferentes estabildades atmosféricas y se compararon con los resultados obtenidos en el análisis de percepción comunal.

Objetivo General:

Contribuir al mejoramiento de las condiciones de saneamiento ambiental de las PTAR a través de la generación de estrategias de intervención en el área de agua residual, como alternativa de prevención ante los impactos del cambio climático.

Objetivo 1.

Establecer la condición actual de la PTAR El Roble en cuanto a la generación de malos olores.

Objetivo 2.

Determinación de técnica de bajo costo para monitoreo de gases potencialmente generadores de malos olores.

Objetivo 3.

Ejecución de proyectos piloto para selección de alternativa óptima que permita mitigar malos olores.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 OLORES Y ODORANTES

Los olores son el efecto percibido cuando los odorantes se han detectado e interpretado por el ser humano a través del sistema olfativo sensorial, y los odorantes son las sustancias responsables de generar un olor (Carrera-Chapela et al., 2014). La respuesta humana a un olor depende de:

- La concentración de olor, es el número de unidades de olor por metro cúbico en condiciones normales ($T=25^{\circ}\text{C}$, $P=1\text{ atm}$), se calcula a partir del número de veces que hay que diluir un gas con aire neutro para que pueda ser detectado por el 50% de los panelistas (Barrera Curihuentro, 2010). El umbral de olor es la concentración mínima que se puede detectar por el 50% de panelistas (Chapela, 2013).
- La intensidad, se obtiene comparando la muestra del gas con una de n-butanol o sec-butanol como referencia y se establece una escala de intensidad (Chapela, 2013), la cual varía desde no perceptible (0) hasta extremadamente fuerte (6) (Barrera Curihuentro, 2010).
- La calidad, permite describir y diferenciar cualitativamente los olores (Barrera Curihuentro, 2010), por ejemplo el olor a un perfume y el de una alcantarilla.
- El tono hedónico, es la propiedad de gusto o disgusto del olor (Barrera Curihuentro, 2010).

La contaminación odorífica se considera un tema complejo ya que se debe de analizar varios factores como lo es el proceso de formación de los odorantes; la transferencia de la matriz agua-aire; condiciones ambientales, así como la topografía del lugar para que se lleve a cabo la dispersión; también la percepción de la comunidad ya que depende de la exposición y la respuesta de cada individuo para que los olores sean percibidos como molestos y sea necesario presentar una denuncia. En la Figura 6.1 se muestra el proceso global de dicha problemática.

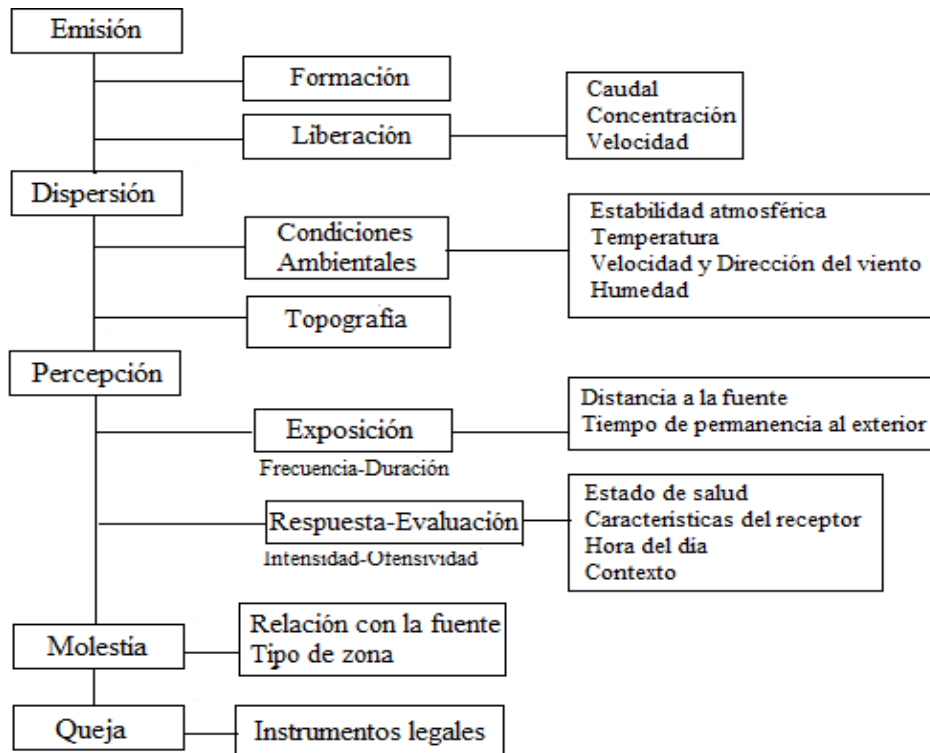


Figura 6.1. Proceso global de problemática odorífera, desde la formación del olor hasta la aparición de la queja y factores que lo influyen. Adaptado de Torres S., Úbeda S., Calvet S., & López J.,(2008)

Según Valencia, Espinosa, Parra, & Peña (2011), la percepción y la tolerancia de un olor dependen de las experiencias personales y asociaciones emocionales de cada individuo, pueden variar de una persona a otra en función de la edad, el sexo y el estado de salud.

Los mismos autores indican que en una población se pueden dar los fenómenos de sensibilización y desensibilización, esto si se encuentra expuesta a un mismo olor durante un período de tiempo prolongado. El primero se produce cuando el olor es percibido y se evidencia con un aumento en el número de quejas de la población, mientras que la desensibilización ocurre cuando los habitantes dejan de percibir el olor.

Estos fenómenos ocurren tanto para olores agradables como desagradables (Valencia et al., 2011), por ejemplo un perfume que es un olor agradable con el paso del tiempo se deja de percibir (Definición abc, 2015).

6.1.1 Emisiones de olores y odorantes en las PTARs

La emisión de olor en una PTAR se clasifica como una fuente difusa al contar con una área de emisión en contacto directo con el ambiente (Vergara & Zorich, 2013).

Los compuestos odorantes se pueden encontrar en los influentes de las aguas residuales o generarse en el transporte y en las unidades de los sistemas de tratamiento (Lehtinen & Veijanen, 2010). Según la recopilación realizada por Carrera-Chapela et al (2014) las unidades pueden clasificar en:

- Fuentes que promueven la transferencia de sustancias odoríficas ya formadas: unidades de aireación, desarenadores y sistemas de tratamiento de lodos activados.
- Fuentes que favorecen la formación de sustancias odoríficas: sedimentación primaria y secundaria, así como, tanques de espesamiento de lodos.

Entre las causas de generación de olores y odorantes se encuentran las condiciones operacionales, el incremento en las capacidades de tratamiento, así como procesos deficientes de almacenamiento, como falta de tanques de ecualización y tanques de tratamiento de lodos, esto depende del proceso y las condiciones operacionales (Chapela, 2013).

Las condiciones operacionales como pH, temperatura y el tiempo de retención hidráulico (TRH) tienen un gran efecto sobre las características de olor, por ejemplo las condiciones anaerobias o bajos niveles de oxígeno en las aguas residuales y (sumados a) largos TRH, favorecen la formación de compuestos de azufre reducidos (como mercaptanos) y ácidos carboxílicos (Lehtinen & Veijanen, 2010).

Según Arriagada Monreal (2008), cuando el pH es ácido se favorece la formación del H_2S mientras un pH alcalino beneficia al NH_3 , debido al equilibrio químico y su disociación (Carrera-Chapela et al., 2014), así como por la presencia de los microorganismos que se desarrollan en dichas condiciones (Arriagada Monreal, 2008).

En un estudio recopilado por Carrera-Chapela et al (2014) las principales fuentes de olor en las PTARs se ocasionan en las unidades de tratamiento primario como sedimentadores y en las unidades de tratamiento de lodos como espesadores, unidades de almacenamiento y deshidratación, esto si el agua contiene condiciones sépticas, y/o durante el tratamiento de lodos donde las condiciones anaeróbicas generan nuevos odorantes por los bioprocesos que se llevan a cabo, asimismo en condiciones de flujo calmo se favorece la emisión de olores como en los sedimentadores primarios y si la purga de lodos no es suficiente para eliminar la actividad anaeróbica, podría favorecer la formación de nuevos odorantes.

En la Figura 6.2 se muestra el porcentaje de olor emitido para cada unidad de tratamiento con respecto a los resultado de una encuesta aplicada a 100 PTARs en Alemania y Francia (Stuetz & Frechen, 2001).Obteniendo que el mayor porcentaje de olor (26%) ocurre en el almacenamiento de lodos, seguido por las unidades de espesamiento de lodos con un 19%, y con la unidad de deshidratación con un 17%.

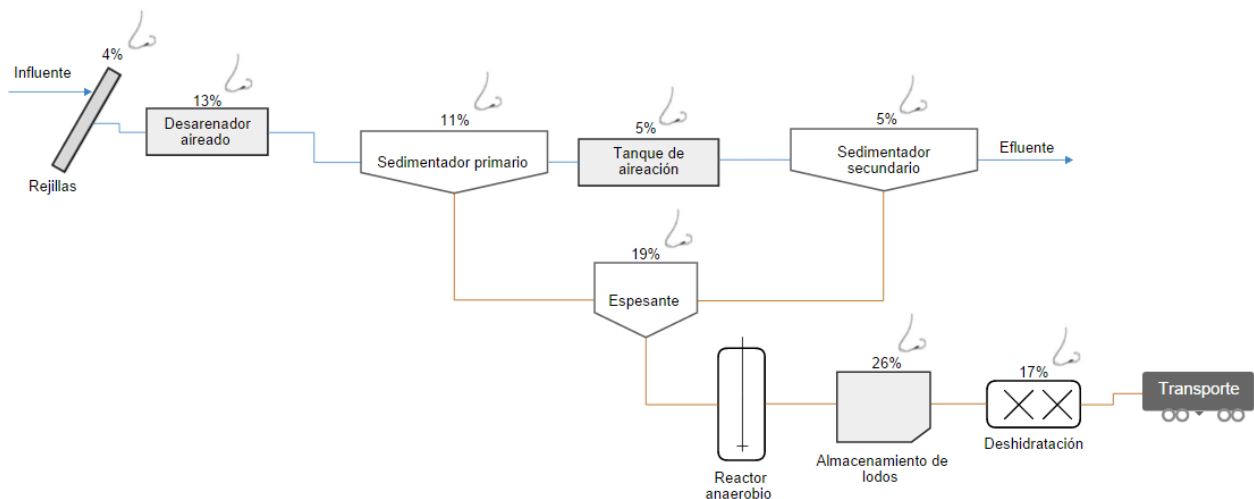


Figura 6.2. Porcentaje de emisión de olor en una PTAR de lodos activados. Adaptado de Carrera-Chapela et al (2014).

La transferencia de los olores y odorantes de la matriz agua a la matriz aire se puede ver afectado por propiedades como la solubilidad, el peso molecular y la volatilidad; también por las concentraciones en la fase agua-aire y los puntos de turbulencia de las PTARs (Arriagada Monreal, 2008).

El gradiente de concentración líquido-gas es importante en la transferencia entre las matrices, ya que en las unidades abiertas la presión parcial del gas en la atmósfera es prácticamente cero, y esta aumenta conforme se da la liberación; en cambio en las unidades con confinamiento se puede alcanzar el equilibrio líquido-gas (Chapela, 2013).

La solubilidad es un factor que afecta la liberación de los compuestos ya que es la capacidad del odorante de disolverse en el agua, a mayor solubilidad mayor concentración en la matriz agua. La solubilidad es afectada por la temperatura por lo tanto a mayor temperatura menor solubilidad y por lo tanto mayor tasa de transferencia a la matriz aire (Arriagada Monreal, 2008).

El peso molecular y la volatilidad de los compuestos son factores a considerar en la transferencia entre las fases (agua-aire), y ambos se relacionan con la presión de vapor. Según lo anterior, a menor peso molecular y mayor presión de vapor, mayor potencial para ser emitido a la atmósfera debido a su mayor volatilidad (Arriagada Monreal, 2008).

La transferencia de los odorantes entre las fases se pueden llevar a cabo mediante métodos de difusión y de convección, el primero ocurre cuando las concentraciones en el agua son mayores que en el aire en unidades con confinamiento los compuestos intentarán alcanzar el equilibrio entre las matrices (Lehtinen & Veijanen, 2010) ,y por métodos de convección cuando se produce el barrido de los compuestos desde la superficie del agua hasta el aire (Lehtinen & Veijanen, 2010).

En puntos de turbulencia se dan la liberación de gases entre las fases por ejemplo en los puntos de entrada del influente y salida del efluente, también en la recirculación de los licoros especialmente

del espesamiento y deshidratación de lodos (Lebrero et al., 2011), estos por lo general están conformados por una mezcla de compuestos sulfurosos como H₂S, mercaptanos y NH₃ (Arriagada Monreal, 2008).

6.1.2 Compuestos odorantes en PTARs

El H₂S y el NH₃ son considerados los principales odorantes causantes de los olores en una PTAR (Muñoz et al., 2010). Varios autores indican la presencia de diversos odorantes en las aguas residuales domiciliarias, por ejemplo Burgess, Parsons, & Stuetz (2001) reportan la presencia de alifáticos, aromáticos e hidrocarburos clorados, mientras Lebrero et al (2011) mencionan que han encontrado aldehídos, escatol e indol; y en concentraciones más bajas se puede encontrar los COVs como tolueno, limoneno, butanona y benceno . Los mercaptanos tales como metilmercaptanos, metil tiol, dimetilsulfuro y dimetildisulfuro han sido reportados por Dincer & Muezzinoglu (2007).

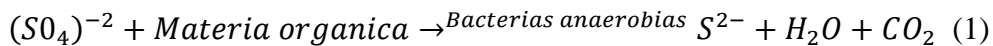
A continuación se detalla el origen en las aguas residuales de algunos odorantes como el H₂S, compuestos orgánicos sulfurados, compuestos nitrogenadas y COVs, así como propiedades físico-químicas de los odorantes y su composición en el agua y aire.

6.1.2.1 Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)

Es un compuesto incoloro que se puede encontrar en los gases naturales tales como gases volcánicos y aguas termales, también se genera como un subproducto de muchas actividades industriales como en las refinerías de petróleo, la fabricación de papel y en las PTARs (Omri, Aouidi, Bouallagui, Godon, & Hamdi, 2013).

Una de las vías de formación es la que se presenta a continuación (Gostelow, Parsons, & Stuetz, 2001):

- Reducción del sulfato por acción de bacterias sulfatorreductoras: se describen con las ecuaciones de Cheremisinoff, 1988,



- Desulfuración de compuestos orgánicos que contienen azufre en estado reducido.

6.1.2.2 Compuestos orgánicos sulfurados

Dentro de este grupo se encuentran los mercaptanos los cuales son principalmente producidos por la degradación biológica de algunos aminoácidos (cisteína y metionina) contenidos en las proteínas (Stuetz & Frechen, 2001). En el espesamiento, almacenamiento y deshidratado de lodos

por lo general los mercaptanos son los odorantes que generan el olor dominante (Arriagada Monreal, 2008).

6.1.2.3 Compuestos nitrogenados

Dentro de este grupo se encuentra el NH_3 , las aminas, el indol y escatol (Lebrero et al., 2011). La orina, las proteínas, los aminoácidos son considerados los precursores de la emisión de compuestos nitrogenados en las aguas residuales (Gostelow et al., 2001). En las etapas de fermentación de la MO nitrogenada por vía anaerobia se produce NH_3 y compuestos amoniacales (Madriz Medeiros, 2011).

6.1.2.4 Compuestos orgánicos volátiles

La formación de COVs depende del tipo de sustrato y los microorganismos presentes, y por lo tanto las vías de fermentación y los productos producidos pueden variar considerablemente (Stuetz & Frechen, 2001). Por ejemplo la fermentación de azúcares puede producir varios COVs como isopropanol, butanol y 2 3-butanodiol (Stuetz & Frechen, 2001) y en la degradación de lípidos se puede producir ácidos grasos volátiles (Rodríguez, 2015).

Los tanques de aireación son una de las principales fuentes de emisiones de COVs ya que se encuentran al aire libre, son de gran tamaño y son puntos de gran turbulencia (Lehtinen & Veijanen, 2010).

6.1.2.5 Propiedades de los odorantes

Como se menciona en la sección 6.1.1 hay diversas propiedades que afectan la transferencia de compuestos entre las fases, por ejemplo la solubilidad, peso molecular y volatilidad. Es por esto que en el Cuadro 6.1 se presentan los valores dichas propiedades para los diferentes odorantes, así como el olor a que se asemejan, el umbral de detección, la composición en el aire y agua.

Los mercaptanos son los que presentan menor umbral de detección y su olor se asemejan a repollo podrido y ajo; el H_2S a huevo podrido; el NH_3 es un olor irritante y los COVs a bolas de naftalina, gomas y solventes, entre otros.

El NH_3 es el odorante que presenta menor peso molecular por lo tanto el que presenta mayor potencial para ser emitido a la atmósfera. Para el caso del H_2S es el que presenta menor solubilidad en el agua por lo tanto menor composición en dicha matriz y el que presenta mayor constante de Henry y mayor composición en la fase aire esto al compararlo con el amoniaco, mercaptanos y compuestos orgánicos volátiles.

Cuadro 6.1. Composición de los odorantes en las PTARs adaptado de Stuetz & Frechen (2001)

Clasificación	Compuesto	Fórmula química	Olor que se asemeja	Peso Molecular g/mol	Umbral de detección ppm	Composición en el aire ³ en ppm	Composición en el agua ⁴ ppm	Solubilidad en agua g/ml	Constante de Henry ⁵ a 25°C atmm ³ /gmol
Sulfuros	Metilmercaptano	CH ₃ SH	Repollo podrido Ajo	48	0.0016	10-50	11-322	0.023 ⁶	_____
	Sulfuro de hidrogeno	H ₂ S	Huevo podrido	34	0.34	200-10.000	15-38	0.005 ⁴	0.023
Nitrogenados	Amoniaco	NH ₃	Irritante	17	5	10-50	35-60	0.899 ⁷	0.000328
Compuestos orgánicos volátiles	Tolueno	C ₇ H ₈	Goma Bolas de naftalina	92.14	5	1088 ⁸ µg/m ³	0.4 mg/l ⁹	470	0.00668
	Benceno	C ₆ H ₆	Dulce, solvente	78.11	60-100			1.78 ⁴	0.0055

³ Aire seco y condiciones anaerobias de una PTAR

⁴ Influyente de una PTAR

⁵ (USEPA, 1997)

⁶ A 20°C

⁷ A 0°C

⁸ General COVs (Lehtinen & Veijanen, 2010)

⁹ General COVs (Fuentes Vivanco, 2014)

También es importante determinar la afinidad de los odorantes a la matriz agua y a la matriz aire, por lo tanto se utiliza la solubilidad para determinar a la afinidad a la matriz agua y la constante de Henry para la afinidad con la matriz aire, ya que esta representa el cociente entre la concentración de en la fase líquida en equilibrio y la presión parcial del gas en equilibrio , y cuantifica la tendencia de un compuesto a liberarse (Stuetz & Frechen, 2001).

Nótese que los criterios de afinidad se encuentran en el Cuadro 6.2 y al comparar los datos para los odorantes del Cuadro 6.1, se puede concluir que el H₂S tiene una afinidad media-baja al agua y con el aire una afinidad alta (2000 Pa m³/mol), por lo que se espera mayores valores en la matriz aire en comparación con la matriz agua para dicho odorante.

Cuadro 6.2. Afinidad de las sustancias químicas con los diferentes compartimientos ambientales en función de las características físico-químicas de los contaminantes, adaptado de (Sancha, 2004)

Afinidad	Agua Solubilidad (mg/l)	Aire Constante de Henry (Pa m ³ /mol)
Alta	>1000	>10
Alta-media	10-1000	10-10 ⁻¹
Media	1-10	10 ⁻¹ -10 ⁻²
Media-Baja	0.01-1	10 ⁻² -10 ⁻⁴
Baja	<0.01	<10 ⁻⁴

La afinidad de un compuesto puede variar según el pH, como se observa en la Figura 6.3 a una pH neutro predomina el H₂S en comparación con el amoníaco, mientras en un pH básico predomina el NH₃ en la emisión de olores.

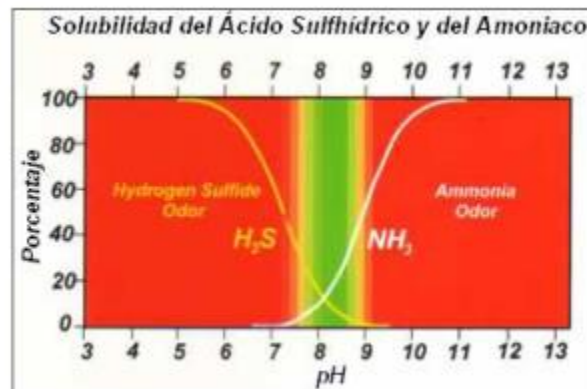


Figura 6.3. Solubilidad del ácido sulfhídrico y del amoníaco dependiendo del Ph tomado de (Arriagada Monreal, 2008)

6.1.3 Implicaciones en la salud por la exposición a compuestos odorantes y olores.

Los olores provenientes de las PTARs provocan molestias en las poblaciones cercanas (Madriz Medeiros, 2011) y debido a esto son consideradas como la principal causa de rechazo de la instalación de PTARs (Metcalf & Eddy, 1996).

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) se determinan las implicaciones a la salud de acuerdo a la concentración del H₂S (Cuadro 6.3). Nótese que a dosis superiores a 320 ppm se presenta riesgo de muerte.

Cuadro 6.3. Sulfuro de hidrógeno: relaciones dosis-respuesta. Tomado de World Health Organization (WHO) 2000

Concentración del H₂S		Efecto
mg/m³	ppm	
1400-2800	1000-2000	Colapso inmediato de la respiración con la parálisis.
750-1400	530-1000	Fuerte estimulación del SNC, hiperpnea seguido de un paro respiratorio
450-750	320-530	Edema pulmonar con riesgo de muerte
210-350	150-250	Pérdida del sentido olfativo
70-140	50-100	Lesiones oculares graves
15-30	10-20	Irritación de los ojos

Para el caso del NH₃ también se determinaron las implicaciones a la salud de acuerdo a la concentración en ppm (Cuadro 6.4), como se observa en concentraciones de 10000 ppm puede ocurrir la muerte en minutos.

Cuadro 6.4. Amoniaco: relaciones dosis-respuesta. Tomado de Dirección General de Salud Pública (2007)

Concentración ppm	Amoniaco
≤ 150	Irritación leve
	Irritación marcada
500	Tos
	Incremento de la presión de la sangre
≤1000	Lesión en el ojo.
10000	Muerte en minutos

6.1.4 Factores de emisión de olor

Un factor de emisión es un valor representativo que trata de relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada con la liberación de éste (EPA, 2015). Se expresan como la masa del contaminante dividido por un volumen, distancia o duración de la actividad (USEPA, 2014).

Según Capelli et al, (2009) los factores de emisión (OEFs por sus siglas en inglés) permiten estimar las emisiones antes de la construcción de una PTAR o si se requiere realizar una modificación de la misma. Los mismos autores indican que se pueden utilizar para evaluar la viabilidad de implementación de una tecnología para el tratamiento de las emisiones odoríficas, por ejemplo la instalación de un biofiltro para el control de olores.

El uso de factores de emisión tiene ciertas limitaciones ya que son utilizados para predecir y no brindan un carácter descriptivo debido a que no se contempla aspectos operacionales (Capelli et al., 2009) .

6.2 LEGISLACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL

6.2.1 Legislación nacional

La emisión es la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera desde un foco por ejemplo una caldera, una PTAR y la inmisión es la concentración de un contaminante a nivel del suelo (Calidad del aire, 2015).

Costa Rica carece de una normativa que regule y controle la emisión e inmisión de olores. En el artículo 50 de la Constitución Política se establece que: “El Estado procurará el mayor bienestar a todos los habitantes del país, organizando y estimulando la producción y el más adecuado reparto de la riqueza. Toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Por ello, está legitimada para denunciar los actos que infrinjan ese derecho y para reclamar la reparación del daño causado. El Estado garantizará, defenderá y preservará ese derecho. La ley determinará las responsabilidades y las sanciones correspondientes” (Bolaños Retana, Dall’Anesse Ruíz, & Marín Vargas, 2010).

En la Ley Orgánica del Ambiente N° 7554 en el artículo 62 hace referencia a la contaminación atmosférica: se considera contaminación de la atmósfera la presencia en ella y en concentraciones superiores a los niveles permisibles fijados, de partículas sólidas, polvo, humo, vapor, gases, *malos olores*, radiaciones, ruidos, ondas acústicas imperceptibles y otros agentes de contaminación que el Poder Ejecutivo defina como tales en el reglamento (Bolaños Retana et al., 2010).

6.2.2 Legislación internacional.

En estudio realizado por Lebrero et al. (2011) señalan que, en algunos países europeos como Australia y Estados Unidos, sus regulaciones se basan en el establecimiento de la máxima concentración de olor, por lo general oscilan entre 1 y 10 OU/m³ de acuerdo al uso del suelo (Cuadro 6.5). También dichos autores indican que en el Reino Unido se establece que las PTARs no deben exceder el límite de 5 OU/m³.

Cuadro 6.5. Límites de olor en diferentes países. Tomado de Lebrero et al. (2011)

País	Límite OU/m ³	% hora año ⁻¹	Categoría del uso de suelo
Alemania	1	3	Residencial
	1	10	Urbano/ Área Industrial
Dinamarca	5-10	0.1	-----
Holanda	1	1	Residencial
Australia	5	5	Rural / Urbana
Nueva Zelanda	2	0.5	-----
Canadá	20	1	-----

También países como Holanda, Japón, Australia, Canadá y Estados Unidos, así como la WHO han establecido los límites en inmisión para el H₂S (Cuadro 6.6). Nótese que estos van de 0.1 a 200 ppbv.

Cuadro 6.6. Límites en inmisión del sulfuro de hidrógeno en diversos países adaptado de Madriz (2011)

País	Sulfuro de hidrogeno
Holanda	10 mg/m ³
WHO (Europa)	0.13-1.3 ppbv
Nueva Zelanda	5 ppbv
Japón	20-200 ppbv
Australia	0.1 ppbv
Canadá	10 ppbv
Estados Unidos (Connecticut)	6.3 ppbv

A nivel latinoamericano Panamá y Colombia se encuentran desarrollando normativa para el control de olores, por ejemplo en Panamá en el año 2006 se creó el anteproyecto de la Norma de Control de Olores Molestos en donde se establece que el límite de olor para las PTARs es de 6 OU/m³ en emisión (Lastarria, 2013). Los valores máximos permisibles en inmisión para odorantes se encuentran en el Cuadro 6.7, y en dicha norma se estable valores de emisión para el amoniaco de 15 mg/m³ y de sulfuro de hidrógeno de 50 mg/m³ (Lastarria, 2013).

Cuadro 6.7. Valores máximos permisibles para la concentración de sustancias causantes de olores molestos en el límite de la propiedad tomado de Lastarria, (2013).

Compuesto	Otra propiedad ppm	Propiedad Industrial ppm
Amoniaco	1	5
Sulfuro de Hidrógeno	0,02	0,2
Metil mercaptano	0,002	0,01
Tolueno	10	60

En Colombia existe un borrador de una norma de olores del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del 8 de julio de 2011, en la cual establece los niveles permisibles para sustancias de olores ofensivas en un tiempo máximo de exposición de 24 horas, para el H₂S es de 7 µg/m³ y para el NH₃ de 100 µg/m³, así como el límite de inmisión para las PTARs es de 3 OU/ m³ y se

estable que el cumplimiento de la normativa se determinará mediante el uso de modelos de dispersión (Lastarria, 2013).

En Chile se cuenta con un borrador sobre el Reglamento de Olores y se encuentra publicada la Estrategia para la Gestión de Olores 2014-2017 la cual tiene como objetivo fortalecer el marco regulatorio a corto, mediano y largo plazo que permita cuantificar, controlar y prevenir la generación de olores (División de Calidad del Aire, Ministerio del Medio Ambiente, 2013).

Brasil, México, Argentina tampoco cuentan con legislación que controle los olores pero al igual que Costa Rica desde sus leyes generales indican la problemática de la contaminación odorífica (Lastarria, 2013).

6.3 TÉCNICAS DE CUANTIFICACION DE COMPUESTOS ODORANTES Y OLORES

Una detallada caracterización en términos de composición y concentración odorante es necesaria para optimizar el diseño y la gestión de sistemas de reducción de olores así como comprender los mecanismos de formación de olores y su degradación (Muñoz et al., 2010).

6.3.1 Muestreo de olores y odorantes.

El objetivo del muestreo es obtener información representativa de las características típicas de una fuente de olor por medio de la recolección de una fracción de volumen adecuado (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013).

El tiempo de muestreo mínimo para una muestra de olor es media hora, y en cada foco lo recomendable es contar con al menos tres muestras, en tres horarios distintos (mañana, tarde y noche) y en días diferentes con el fin de obtener datos representativos (Vergara & Zorich, 2013).

Según Lebrero et al (2011), las muestras gaseosas se pueden almacenar en bolsas o recipientes hechos de Teflón "R, acero inoxidable, o de vidrio. También el material de almacenamiento de la muestra debe de estar libre de olores, ser impermeable, resistente y no adsorber o reaccionar con los compuestos químicos olorosos.

Por convención, el intervalo entre el muestreo y el análisis no debe superar las 30 horas (Stuetz & Frechen, 2001), esto con el fin de reducir el riesgo de modificación de la muestra durante el almacenamiento (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013).

En las últimas décadas, varias técnicas se han estudiado y desarrollado para la caracterización de olores ambientales. El método más antiguo y consolidado de identificación y cuantificación de odorantes implica el uso de técnicas analíticas como es la GC-MS (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013). Nótese que en el Cuadro 6.8 se brinda la descripción de los métodos, las ventajas y desventajas de cada uno.

Independientemente de la técnica de medición adoptado la calidad de los resultados obtenidos depende en gran medida de muestreo adecuado (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013).

Cuadro 6.8. Análisis de técnicas de cuantificación de compuestos odorantes y olores

Técnica	Descripción	Ventajas	Desventajas
Narices electrónicas	Son dispositivos que imitan las narices humanas, contienen un conjunto de óxidos metálicos específicos o materiales poliméricos para identificar varios compuestos que generan un patrón de respuesta el cual se traduce en una señal eléctrica (Haddad, Medhanie, Roth, Harel, & Sobel, 2010)	-Análisis in-situ (Haddad et al., 2010) -Identifica como un todo la mezcla de componentes que forman el olor (Haddad et al., 2010)	-Limitación de los sensores a la variación de las condiciones ambientales (altas temperaturas y humedad) y de la estabilidad en el tiempo (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013)
Cromatografía de gases	-Determina la naturaleza y la concentración de compuestos presentes en una muestras (Hudon, Guy, & Hermia, 2000)	-Herramienta analítica más precisa y potente para la cuantificación e identificación de compuestos (Muñoz et al., 2010).	-No son afectados por la variabilidad del olfato humano (Arshak, Moore, Lyons, Harris, & Clifford, 2004) -Técnica no portátil y cara (Arshak et al., 2004) -Operador calificado para la aplicación de la técnica (Muñoz et al., 2010)
Olfatometría Dinámica	Técnica sensorial que permite determinar la concentración de olor de una muestra de aire mediante la sensación causada en un panel de personas, se expresa en unidades de olor por metro cúbico (OU/m ³)y representa el número de diluciones con aire neutral que son necesarios para llevar la muestra olorosa a su concentración umbral de detección de olor (Sironi, Capelli, Céntola, Del Rosso, & Pierucci, 2010)	-Correlación directa entre el olor y la sensibilidad del detector por ejemplo la nariz humana (NarjouxAdeline, 2007) -Niveles de detección bajos (Brandt, 2011) -Bajo costo	-Afectado por la variabilidad del olfato humano (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013) -Brindan información sobre intensidad y no sobre calidad (Capelli, Sironi, & Del Rosso, 2013) - Requieren de panelistas media sensibilidad (híper e hipo narices sensibles), son difíciles de seleccionar por la variabilidad del olfato, la edad, tipo de olor percibido y por la fatiga olfativa (Muñoz et al., 2010)

6.4 DISPERSIÓN DE OLORES

La dispersión describe el transporte de un contaminante sobre la atmósfera, teniendo en cuenta procesos que influyen en su transporte como la advección, difusión y reacción (Chapela, 2013).

Se ve afectada por factores meteorológicos por ejemplo la estación, la hora del día, las condiciones atmosféricas, la velocidad y dirección del viento, humedad relativa, capa de mezcla, la radiación solar y la temperatura; además por la presencia obstáculos físicos como edificios altos y grandes árboles (Stellacci et al., 2010).

Según Stuetz & French (2001), la dirección del viento presenta gran influencia en el impacto generado, ya que determina la dirección de transporte del olor y permite comprender si las fuentes emisoras se encuentran en el sotavento de los receptores; y la velocidad del viento es importante ya que diluye y dispersa los contaminantes (Gestión de la calidad del Aire, 2015).

Según Souto (2011), cuanto menor sea la altura de emisión mayor puede ser el impacto de dicha emisión sobre el entorno local, por ejemplo en el caso de las PTARs al encontrarse al nivel del suelo, la máxima concentración será cerca de la propia planta.

La topografía de la zona es un factor que afecta la dispersión de los olores (Barclay, Diaz, & Cartelle, 2014), por ejemplo ciudades rodeadas de una topografía compleja como valles o cadenas montañosas tienden a presentar altas concentraciones de contaminantes en comparación de zonas planas (Gestión de la calidad del Aire, 2015) debido a efectos de confinamiento y las inversiones térmicas típicas de sistemas valle-montaña, las cuales limitan la dispersión de contaminantes en altura (Gestión de la calidad del Aire, 2015).

6.4.1 Estabilidad atmosférica

La estabilidad atmosférica hace referencia a cómo es el perfil vertical de la temperatura en la atmósfera (Chapela, 2013). Se puede caracterizar utilizando las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford (Cuadro 6.9), las cuáles se dividen en seis categorías (de A-F) para describir la capacidad de dispersión de la atmosfera (Stuetz & Frechen, 2001). Las variables que influyen en el cálculo son la velocidad del viento, la radiación solar y la cobertura de nubes (Arzate Echeverría, 2004). Según (Barclay et al., 2014) las peores condiciones para la dispersión de los olores ocurren durante la noche debido al aumento de la estabilidad atmosférica asociada con vientos calmos, baja turbulencia y la presencia de inversiones térmicas¹⁰ lo que restringe la dispersión vertical ya que se limita el mezclado, y es por esto que los olores se perciben más en la noche.

Cuadro 6.9. Características de condiciones de estabilidad atmosférica adaptada de Herrera (2014)

¹⁰ Inversión térmica :fenómeno producido cuando la temperatura aumenta con la altitud (Herrera Murillo, 2014)

Clase de estabilidad	Condición	Cuando se producen	Como es el movimiento vertical de una porción de aire	Generalidades
A	Extremadamente inestable			Asciende (en la mañana cuando se da la ruptura de la capa estable esto es debido al calentamiento solar) y
B	Moderadamente inestable			desciende (en la tarde cuando disminuye el flujo de calor solar) (Souto, 2011)
C	Ligeramente inestable	Día	Asciende y descende	Los olores se transportan a cortas distancias (Barclay et al., 2014)
D	Neutra	Día /Noche	No se propicia ni se inhibe	Presencia de viento y cuando hay nubes que impiden el calentamiento o enfriamiento de la superficie
E	Estable	Noche		Viento escaso o nulo.
F	Muy estable	Noche	Se encuentra inhibido	Los olores se transportan a largas distancias (Barclay et al., 2014)

6.4.2 Modelos de dispersión Atmosférica

Según Souto (2011), el objetivo la modelación de la contaminación atmosférica es garantizar la calidad del aire; así como permite establecer normativas para controlar las emisiones por ejemplo regular los límites de concentraciones permisibles. También evalúa las estrategias de control de emisiones; se utiliza para seleccionar la localización de futuros focos emisores con el fin minimizar su impacto sobre el ambiente y permite identificar los responsables de los niveles de contaminación.

Los modelos de dispersión son una herramienta eficaz para estimar la dispersión de olores usando datos de emisión disponibles y para estimar las emisiones máximas de olores que pueden ser permitidas en un sitio a fin de evitar quejas de olor (Latos, Karageorgos, Kalogerakis, & Lazaridis, 2010).

El planteamiento general de los modelos de dispersión consiste en aplicar un modelo matemático a cada fenómeno que experimentan los contaminantes en la atmósfera, y sumar las contribuciones de todos los modelos de proceso en una ecuación de balance o conservación para cada propiedad considerada (Souto, 2011). En la Figura 6.4 se presenta el balance general de un contaminante en la atmósfera.

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j c_i) = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, \dots, c_N, T) + S(\bar{x}, t) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Figura 6.4. Balance general de un contaminante en la atmósfera tomado de Souto, (2011)

En donde el:

- Primer término representa la variación del contaminante i con el tiempo.
- Segundo término la entrada neta del contaminante asociado con el flujo atmosférico (advección y turbulencia).
- Tercer término representa la variación de la concentración del contaminante debido a la difusión molecular.
- Cuarto término representa la velocidad de desaparición del contaminante por reacción química.
- Quinto representa la aparición del contaminante en el entorno considerado, proveniente de focos emisores en el entorno.

La utilización de modelos de dispersión atmosférica se han aplicado para la evaluación de los impactos de olor, en el Cuadro 6.10 se presenta una descripción del modelo, las ventajas y desventajas para cada uno.

El modelo de dispersión seleccionado para el desarrollo del presente trabajo correspondió al modelo de penacho gaussiano, el cual ha sido aplicado para la modelización de múltiples fuentes y receptores de olor (Barrera Curihuentro, 2010).

Cuadro 6.10. Modelos utilizados para la modelación de olores

Modelos	Descripción	Ventajas	Desventajas	Estudios previos
Penacho Gaussiano	Se basan en la clasificación de estabildades de Pasquill para la caracterización lateral y vertical, utiliza coeficientes de dispersión empíricos (Capelli, Sironi, Del Rosso, et al., 2013). Asumen emisiones continuas de gases, condiciones estacionarias, no existen reacciones, el viento es uniforme en todo el dominio (Barrera Curihuentro, 2010)	Simples de usar (Barrera Curihuentro, 2010) Requieren poca información meteorológica (Barrera Curihuentro, 2010) Utilización de distintos tipos de fuentes: puntuales, lineales y áreas (Barrera Curihuentro, 2010)	Sólo simulan trayectorias rectilíneas. (Barrera Curihuentro, 2010) Problemas con velocidades muy bajas vientos calmos y terrenos complejos (Barrera Curihuentro, 2010)	Se ha utilizado para la modelación práctica de múltiples fuentes y receptores de olores (Barrera Curihuentro, 2010)
Calpuff	Avalado por la USEPA (USEPA, 2014) Modelo Langrangiano de calidad del aire para flujo atmosférico no estacionario, adecuado para las estimaciones de una o varias fuentes industriales (Sironi et al., 2010) Simula los efectos de las condiciones meteorológicas que varían en el transporte de la contaminación, transformación y eliminación, incluye tres componentes: modelo meteorológico CALMET, modelo principal para determinar las concentraciones en al menos una hora CALPUFF y CALPOST post-procesador (Vieira de Melo, Santos, Mavroidis, & Reis Junior, 2012a).	Se puede aplicar distancias de ≥ 50 km y en terrenos accidentados y es eficiente para simular a dispersión de olores y compuestos odorantes (Busini et al., 2012) Utiliza datos meteorológicos tridimensionales y calcula la dispersión con vientos calmos (Capelli, Sironi, Del Rosso, et al., 2013). Los coeficientes de dispersión se obtienen a partir de los parámetros de turbulencia y no de clases de estabilidad (Sironi et al., 2010) Es recomendado usarlo en lugares en donde existan brisas marianas, líneas costeras, lagos, entre otros (Barclay et al., 2014)	Tiempo de ejecución en horas, utiliza muchos datos de entrada que no necesariamente son utilizados en la dispersión de olores, requiere de más tiempo para aprender a utilizar el modelo (Guarriello, 2009)	Capelli et al (2011) en un estudio realizado en una zona industrial en Terni, determinaron que en los primero 200 m se encontraron entre 3 OU/m ³ a 10 OU/m ³ desde la fuente de emisión. Sironi et al (2010) reportan de 3 OU/m ³ a 6 OU/m ³ en los primeros 200 m desde la fuente, este estudio fue en el norte de Italia

Continuación del Cuadro 6.10

Modelos	Descripción	Ventajas	Desventajas	Estudios previos
Aermod	Avalado por la USEPA para estimar los impactos en la calidad del aire varias fuentes (USEPA, 2014) Calcula la dispersión de un contaminante en estado estacionario, asume una distribución gaussiana tanto en la vertical como en la horizontal para la estimación de las concentraciones (Vieira de Melo, Santos, Mavroidis, & Reis Junior, 2012b)	Eficacia del modelo para simulación de la dispersión de olores (Busini et al., 2012). Tiempo de ejecución en minutos, pocos datos de entrada (Guarriello, 2009). Recomendado para la mayoría de estudios de emisiones de actividades industriales	Se aplica para pequeñas distancias 50km (Barclay et al., 2014). Sobrestima las concentraciones en condiciones estables (Capelli, Sironi, Del Rosso, et al., 2013) Problemas con vientos calmos (Capelli, Sironi, Del Rosso, et al., 2013)	En 400 m de distancia de la PTAR se puede detectar el H ₂ S con un 50% de probabilidad en un periodo de 5s Latos et al (2010) en los primeros 400 m desde la PTAR la Farfana en Chile, valores 100 OU/m ³ (Barrera Curihuentro, 2010)

6.4.3 Sistemas de control biológicos del olor en PTAR.

Frente a los métodos clásicos de tratamiento de gases, surgieron métodos alternativos que intentaban suplir las carencias de los anteriores. Son denominados métodos de desodorización biológicos al considerar que se trata de tecnologías limpias o tecnologías verdes (Arana, 2010)

El funcionamiento de los sistemas de control de tipo biológico se basa en la amplia capacidad y alta eficiencia de los microorganismos para degradar los contaminantes del aire. En los métodos biológicos se fuerza la corriente de aire contaminada a través de materiales de relleno que sirven como soporte para el crecimiento y desarrollo de biomasa que se alimenta de los componentes contaminantes del aire. Los microorganismos presentes en el material de relleno utilizan el aire contaminado como fuente de carbono y energía (Arana, 2010)

El proceso general de degradación de los contaminantes incluye complejas interacciones físicas, químicas y biológicas que dan como resultado la transformación de los contaminantes en otras sustancias con un menor impacto sobre el medio ambiente y la salud humana (Shareefdeen, 2005).

El tipo de microorganismo presente en cualquiera de los métodos biológicos puede ser del tipo bacterias, hongos y levaduras si bien, la presencia de uno u otro microorganismo está condicionada por el tipo de contaminante presente en el gas a tratar (Arana, 2010).

Los contaminantes producidos como consecuencia de reacciones naturales, como son la mayoría que son provocadores de malos olores, (EDAR, fábricas de compost, industrias agroalimentarias...), son fácilmente biodegradables (Arana, 2010).

La degradación puede ser llevada a cabo usando las poblaciones naturales de microorganismos, o bien, mediante la inoculación de microorganismos específicos (Arana de Pablo, 2010).

En los sistemas biológicos de tratamiento de gases, las partículas contaminantes no pueden ser degradadas directamente desde la fase gaseosa, los contaminantes y el oxígeno han de ser transportados hacia una fase líquida en la que serán accesibles para los microorganismos (Arana, 2010).

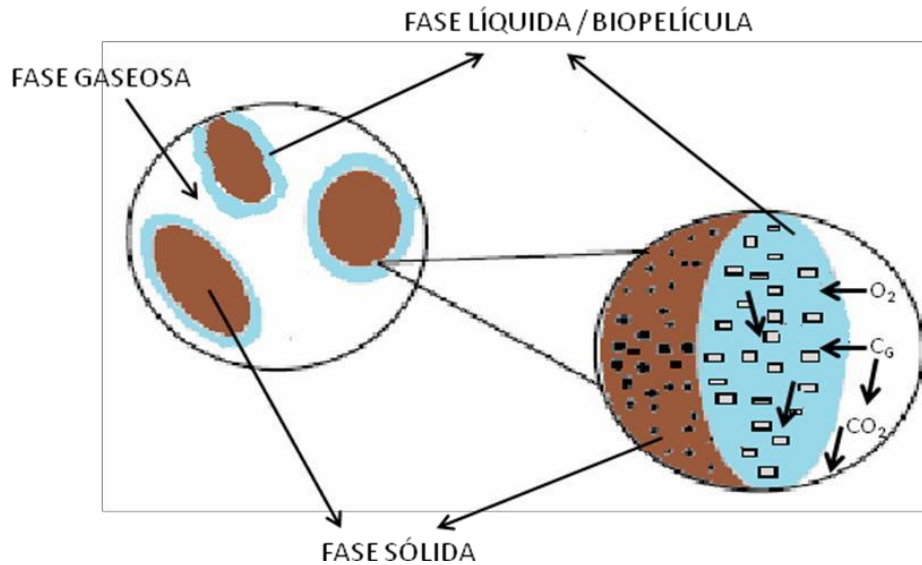


Figura 6.5. Mecanismo de degradación del contaminante. Las partículas contaminantes (CG), han de ser transportadas dentro de la biopelícula que se forma alrededor del sólido de relleno para ser accesibles para los microorganismos. (Modificado de (Devinny, 1999) y (Cárdenas & Revah, 2003).

En función del estado en el que se encuentren la fase líquida y los microorganismos dentro del sistema de tratamiento, se clasifican los métodos de tratamiento de gases de la siguiente manera (Arana, 2010)

Cuadro 6.11. Clasificación de los biofiltros en función de cómo se encuentren la fase líquida y biológica. (Modificado de (Cárdenas & Revah, 2003).)

Tipo de biofiltros.	Fase biológica.	Fase líquida.
BIOLAVADOR	<i>Dispersa</i>	<i>En movimiento</i>
BIOFILTRO DE LECHO ESCURRIDO	<i>Inmovilizada</i>	<i>En movimiento</i>
BIOFILTRO DE LECHO FIJO	<i>Inmovilizada</i>	<i>Inmóvil</i>

Además de los sistemas señalados, denominados genéricamente como biofiltros, existen otros métodos que han de ser incluidos como métodos de tratamiento de tipo biológico. Todos estos métodos están en la actualidad siendo desarrollados como métodos de control de olores. En algún caso, el desarrollo de los mismos comenzó en la década de los noventa, por tanto, son tecnologías que todavía están siendo mejoradas. Aunque no serán descritas en el trabajo de manera extensa, han de ser citados como tratamientos de tipo biológico y como una posible alternativa a tener en cuenta (Arana, 2010):

- Fotobiodegradación. Método desarrollado por científicos japoneses a principio de 1990, utiliza algas como biomasa para la degradación de compuestos olorosos que contengan nitrógeno. La eficacia de este método alcanza el 65 %, aunque actualmente, está siendo desarrollado. Empleado en procesos de combustión principalmente.

- Bioreactores de membrana. Los contaminantes gaseosos son transferidos de fase gaseosa a líquida. Ésta es forzada a atravesar una serie de membranas en las que se encuentran los microorganismos encargados de la degradación de los compuestos contaminantes u oloresos (Shareefdeen, 2005).
- Tanques de lodo activado. Aunque no es una tecnología moderna, (su utilización se remonta a cuatro de década atrás), es uno de los métodos biológicos existentes. Su funcionamiento es muy similar al de los biofiltros, utilizando como medio de soporte de los microorganismos el lodo. Su utilización está condicionada por la gran corrosión que se produce en las instalaciones necesarias y la baja capacidad del sistema para el tratamiento de grandes corrientes de aire y olores de alta intensidad.

En términos generales, el nivel de eficacia alcanzado por los métodos biológicos puede ser comparable al nivel de eficacia alcanzado por cualquiera de los métodos clásicos. El límite de estos procesos es la biodegradabilidad de los contaminantes, en donde los compuestos generados por procesos biológicos son fácilmente biodegradables, mientras que aquellos con estructuras químicas no naturales pueden ser más recalcitrantes (Cárdenas & Revah, 203).

6.4.3.1 *Biofiltros convencionales o de lecho fijo.*

Como se ha señalado anteriormente, en el presente apartado del documento se realiza una descripción de las características y el funcionamiento de los biofiltros convencionales.

Los biofiltros de lecho fijo o inmóvil se componen de un material filtrante, (que puede ser orgánico o sintético), retenido en un recinto a través del cual se hace circular la corriente de aire a tratar.

El material filtrante, que es conocido también como material de relleno o lecho biológico, sirve como soporte para que los microorganismos que se encargarán de la degradación del contaminante, desarrollen una biopelícula a la que serán transportadas las partículas contaminantes. En el caso de que el material de relleno sea de tipo orgánico, éste sirve en ocasiones como fuente de nutrientes para los microorganismos ((Arana, 2010).

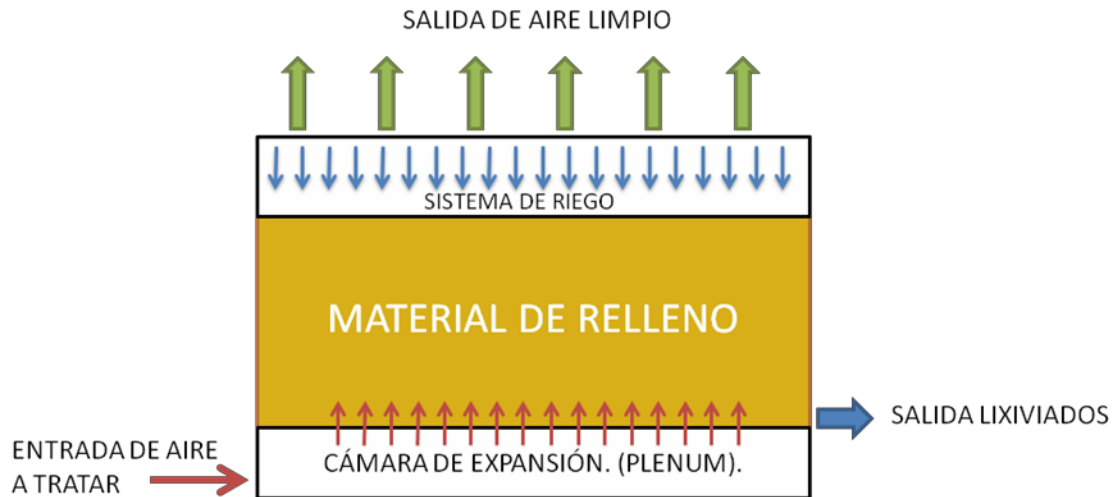


Figura 6.6. Esquema general de funcionamiento de un biofiltro de lecho fijo. (Arana, 2010).

Ejemplos de material filtrante utilizado como soporte de la biomasa en este tipo de biofiltros son diferentes tipos de compost, material vegetal triturado, corteza de pino, e incluso residuos orgánicos. En el caso de utilizarse material filtrante considerado como de tipo inorgánico, suelen emplearse rocas porosas (greda volcánica, perlita...), carbón activo (Arana, 2010).

La utilización de materiales sintéticos presenta la ventaja frente a los materiales orgánicos de no sufrir biodegradación, aumentando así, su vida útil (ésta puede llegar a ser de unos 8 años frente a los 2 años de vida media de los materiales orgánicos). Al evitarse dicha degradación, en los biofiltros que emplean materiales sintéticos no tiene lugar compactación del medio de relleno y la aparición de camino preferenciales (Arana, 2010).

Frente a las ventajas, surge el inconveniente del precio elevado que poseen los materiales de tipo inorgánico. Esta característica hace que sólo puedan ser empleados en biofiltros de pequeño tamaño para el tratamiento de corrientes gaseosas de bajos caudales (Arana, 2010).

En este tipo de biofiltros de lecho inmóvil, no existe una fase acuosa móvil que se haga pasar contra corriente al gas a tratar. Por lo tanto, se ha de suministrar suficiente humedad al medio filtrante para que se pueda crear la biopelícula y los contaminantes puedan ser degradados por los microorganismos que la forman. Esta humedad es aportada al medio por un sistema de riego ubicado en la parte superior del biofiltro. Esta característica hace que los biofiltros de lecho fijo puedan ser utilizados para degradar sustancias contaminantes y olorosas poco solubles en agua. . (Arana, 2010)

El difícil control del nivel de humedad necesario en el material de relleno, mediante la adición de agua por parte del sistema de riego, así como la más que posible presencia de contaminantes capaces de inhibir la actividad microbiana hace que en ciertos casos la instalación de un biofiltro de estas características, se acompañe de un pre tratamiento del gas mediante un humidificador o un lavador (scrubber). . (Arana, 2010)

Aparte de la instalación de un lavador previo, en ocasiones, para el tratamiento de una misma corriente gaseosa se instalan varios biofiltros en serie, tanto de forma horizontal como vertical. . (Arana, 2010)

6.4.3.2 Antecedentes de la biofiltración.

Las primeras reseñas bibliográficas sobre la biofiltración como método de tratamiento de gases aparecen en el año 1923, cuando se empleó suelo poroso para la eliminación de H₂S proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Hasta el año 1934 no se realizó la primera patente de un biofiltro y los primeros manuales de diseño y funcionamiento no se redactaron hasta la década de 1950. . (Arana, 2010)

Hacia 1970 se desarrollaron nuevos diseños que permitían mayor carga de trabajo y el aumento en la eficacia para el tratamiento de olores. Estos diseños fueron desarrollados principalmente en Alemania y los Países Bajos y ya no utilizaban suelo como material de relleno, sino compost y restos de poda. Durante los años 70, las legislaciones de varios países en cuanto a la contaminación atmosférica y la afectación socio-ambiental de los malos olores se endurece, pasando a considerarse sustancias tóxicas varias que hasta entonces no lo habían sido. Las legislaciones más estrictas en este aspecto son redactadas en los Países Bajos y en Alemania lo que genera un incremento del desarrollo de la investigación, de la formación de empresas de diseño de biofiltros y el registro de patentes en estos países. (Arana, 2010)

En la década siguiente, aparecen biofiltros más evolucionados (se emplean ya controles informáticos en el funcionamiento) y se desarrollan los biofiltros cerrados. Se comienza a utilizar nuevos materiales de relleno de tipo sintético. En estos años, se desarrollan los primeros modelos de biofiltros percoladores en la Universidad Tecnológica de Eindhoven, y son varias las plantas de tratamiento de aguas residuales de Alemania que tienen instalados biofiltros para el tratamiento de olores. Las empresas constituidas en la década anterior extienden su tecnología por todo el mundo. (Arana, 2010)

Es durante esta época y la siguiente década, (1990), cuando la tecnología de la biofiltración comienza a interesar en Estados Unidos, formándose varios grupos de investigación en universidades del país. Desde los noventa, el interés por la biofiltración se ha incrementado considerablemente en todo el mundo aumentando el número de aplicaciones y diseños. (Arana, 2010)

En la actualidad, la investigación desarrollada se centra en el diseño de sistemas de control de los parámetros que intervienen en los procesos de degradación de los compuestos y en la aplicación de modelos matemáticos que permitan comprender mejor los sistemas de biofiltración. (Arana, 2010)

6.4.3.3 Fundamentos de los Biofiltros convencionales

Los factores que afectan al funcionamiento del biofiltro una vez puesto en marcha son varios, debiendo estar perfectamente controlados para la correcta degradación de los contaminantes. Los factores que han de ser estudiados son: una correcta selección del medio filtrante, así como la temperatura, la humedad y el pH del medio, una correcta selección de los microorganismos responsables de la degradación de los contaminantes, control de las características del gas portador de dichos contaminantes, así como el control de la presencia de compuestos tóxicos que pudieran inhibir el desarrollo de la comunidad microbiana. Estos factores se describen a continuación. (Arana, 2010):

6.4.3.3.1 Selección del medio filtrante o material de relleno.

La selección del material de relleno del biofiltro está directamente relacionada con el correcto funcionamiento y el grado de eficacia que éste alcance. El material de relleno del biofiltro es el hábitat en el que se va a desarrollar toda la comunidad microbiana que es, finalmente, la encargada de la degradación del contaminante. (Arana, 2010)

La elección de un tipo de material u otro será determinada por el cumplimiento de las condiciones que hagan que el desarrollo de los microorganismos se vea favorecido, sin embargo, se ha de tener en cuenta el aspecto económico. (Arana, 2010)

El gran espacio requerido para la instalación de los biofiltros y en consecuencia, el volumen de material de relleno necesario hace que sea indispensable que el material empleado tenga alta disponibilidad y bajo coste de adquisición. . (Arana, 2010)

Son varios los autores que, actualmente, fijan el criterio para la elección del material filtrante en el cumplimiento de las características siguientes (Devinny, 1999):

- Porosidad homogénea, entre el 40 y el 80% del total del lecho filtrante.
- Alta capacidad de retención de agua.
- pH Neutro.
- Alta superficie específica.
- Alta resistencia a la compactación.
- Presencia de nutrientes inorgánicos como N, P, K y S y alta concentración de microorganismos.
- Alto contenido de materia orgánica, entre el 35 y 55 %.

A estas características habría que sumarles una serie de consideraciones (Saña, 2010):

- La granulometría del material ha de ser en más del 60 % superior a 4 cm.

- El contenido en finos ha de ser el mínimo posible, ya que su presencia afectaría a la pérdida de carga del gas a tratar.
- Se debe evitar la presencia de sustancias inhibidoras de la actividad microbiana como es el caso de las especies resinosas.

Los materiales utilizados para la biofiltración pueden variar de forma importante, pudiendo ser sólidos porosos orgánicos, sólidos inorgánicos naturales o materiales sintéticos (Devinny, 1999).

Los materiales de tipo orgánico más utilizados, son turba, compost, viruta de madera, lodos de plantas de tratamiento de agua, cortezas de distintas especies. Dentro de los medios inorgánicos se incluyen el carbón activo, greda volcánica y la perlita (Kennes y Thallasso., 1998, citado por (Etcharen, 2005).

Todos estos materiales han sido eficazmente utilizados en biofiltración, junto a los de tipo sintético como anillos de polipropileno, y las espumas de poliuretano. La siguiente tabla resume, de forma general, las características de todos ellos. (Arana, 2010)

Cuadro 6.12. Resumen de las características de distintos materiales empleados como medio filtrante en biofiltros convencionales. (Modificado de (Devinny, 1999)).

Parámetro	Compost	Turba	Suelo	Carbón activo, perlita	Material sintético
Densidad poblacional de microorganismos	Alta	Media-baja	Alta	Ninguna	Ninguna
Área superficial	Media	Alta	Baja - Media	Alta	Alta
Permeabilidad al aire	Media	Alta	Baja	Media-alta	Muy alta
Contenido de nutrientes asimilables	Alta	Media-alta	Alta	Ninguna	Ninguna
Absorción de contaminantes	Media	Media	Media	Alta	Alta
Tiempo de vida útil	2-4 años	2-4 años	>30 años	>5 años	>15 años
Costo	Bajo	Bajo	Muy bajo	Medio-alto	Muy alto

A menudo un biofiltro con medio orgánico como material filtrante, presentará alto potencial de compactación y por tanto baja superficie específica y baja porosidad, es por esta razón que se han incorporado materiales inorgánicos en la cama filtrante como la perlita (sílice), granos de cristal, espumas de poliuretano, o poliestireno (Warren *et al.*, 1997, citado por (Etcharen, 2005)).

En general, a la hora de realizar una selección de material filtrante de tipo orgánico e impedir en gran medida la aparición de compactación del lecho filtrante, lo recomendable es el uso de fracción leñosa precompostada. (Saña, 2010)

Cuadro 6.13. Tipos de Biofiltros para el control de olores en Plantas de Tratamiento de Aguas residuales

Tratamiento	Descripción	Ventajas	Desventajas
Biofiltro convencional (Lebrero & Rodríguez, 2011)	La emisión olorosa se hace pasar por el biofiltro (flujo descendiente) el cual contiene un lecho con material orgánico (compostaje) e inorgánico que contiene la comunidad microbiana responsable de eliminar el olor	<p>-Tecnología más empleada para el tratamiento de olores.</p> <p>-El H₂S es removido de un 90 a 100% en una investigación por Lebrero et al.,2011 encontraron que se removió un 99.9%.</p> <p>-Para COVs se han encontrado eficiencias $\geq 80\%$ con un tiempo de residencia de 8s.</p>	-Requieren de gran superficie, dificultad para controlar el pH y la húmeda del lecho, el rendimiento puede disminuir por la acumulación de subproductos inhibitorios
Biofiltro percolador (Biotrickling) (Arana, 2010)	Consiste en una columna de material sintético en la que se desarrolla la biopelícula que contendrá a los microorganismos encargados de la biodegradación del contaminante. A través del lecho se hace circular la corriente gaseosa olorosa (contra corriente) a una corriente de agua (continua) que aporta los nutrientes para los microorganismos y genera la biopelícula alrededor del material de relleno.	<p>-Para COVs solubles se han encontrado eficiencias $\geq 88\%$ con un tiempo de residencia de 4s(Lebrero et al., 2014)</p> <p>- Equipos compactos con respecto a filtros convencionales, así como alta transferencia de oxígeno y contaminante</p>	<p>-Limitaciones en el transferencia de masa de COVs hidrofóbicos de la matriz aire- agua, requieren altos tiempos de retención de los gases.(Lebrero et al., 2014)</p> <p>- Tratamiento de lodos y agua residual producidos, altos costos de inversión, operación y mantenimiento</p>

7. METODOLOGÍA

7.1 LUGAR DE ESTUDIO

La PTAR se ubica en el Distrito de El Roble, Puntarenas, Costa Rica, en las coordenadas geográficas Latitud: 9°58' N y Longitud: 84°44'O (Figura 7.1). Las principales actividades económicas en esta zona son: el turismo, industrias arroceras, harinas de pescado y mariscos, así como actividades ganaderas (Sánchez, 2002).

Costa Rica cuenta con dos épocas la seca (Diciembre-Abril) y la lluviosa (Mayo-Noviembre). En la zona las temperaturas oscilan entre 23°C a 30° C y la humedad relativa es mayor al 70% (Instituto Meteorológico Nacional, 2014).

La precipitación media anual es de 118 mm, la velocidad del viento se encuentra entre 1 a 10 m/s y la dirección de los vientos es hacia el Este (Instituto Meteorológico Nacional, 2014) (Anexo 1)

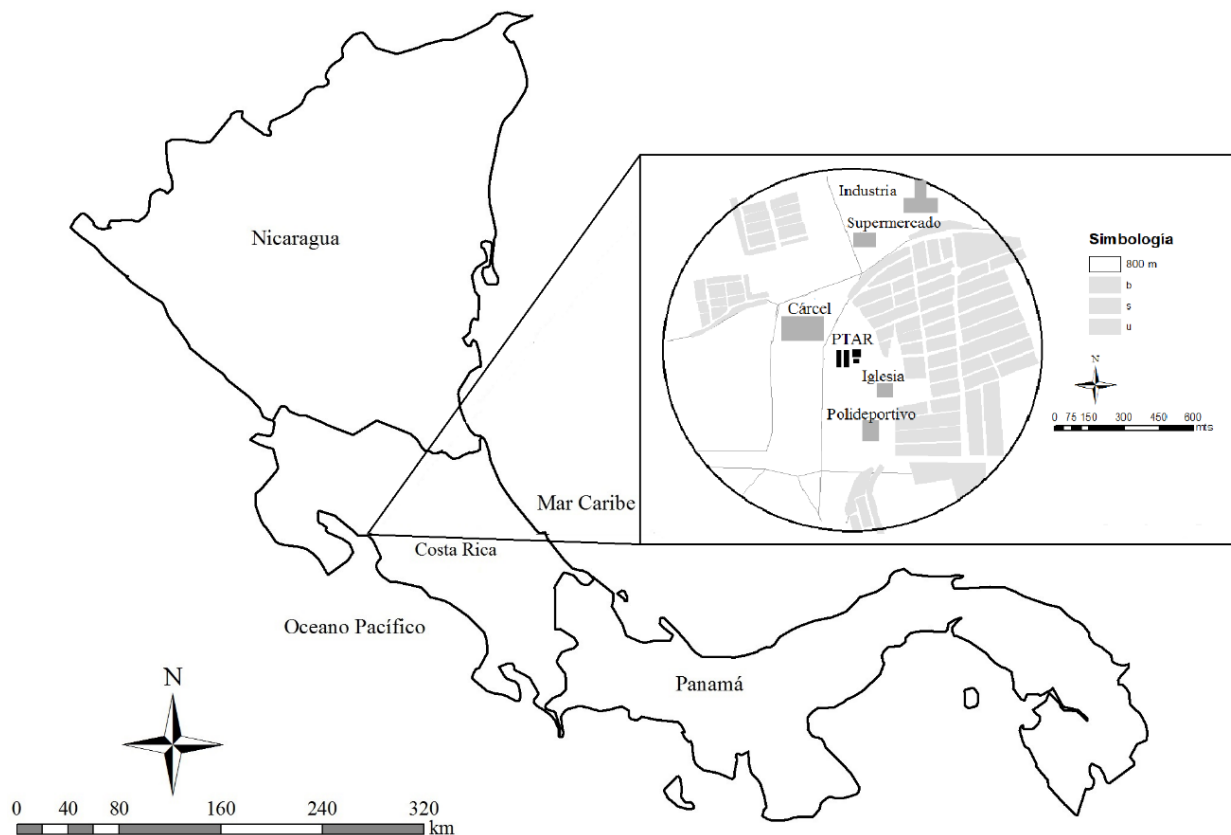


Figura 7.1. Ubicación de la zona de estudio (Coordenadas CRTM05)

La PTAR fue construida en 1991 para el tratamiento de 55 l/s de aguas residuales, luego se amplió su capacidad a 85 l/s, es un sistema de tratamiento biológico integrado de film fijo de lodos activados (IFAS por sus siglas en inglés), ocupa un área de 945 m². Por encontrarse en una zona

de terreno llano requiere la utilización de nueve estaciones de bombeo para impulsar el agua residual.

La PTAR recibe las aguas ordinarias de los distritos de El Roble, Barranca, Chacarita y Puntarenas lo cual equivale aproximadamente 30.000 habitantes, así como las aguas residuales sin tratar del Hospital Monseñor Sanabria, del Hotel Double Tree Resort by Hilton Pacifico Central y del Centro Penitenciario.

También brinda el servicio de impulsión de las aguas residuales de las empresas Inolasa, Sardimar, y el supermercado Maxipalí; dichas aguas han sido tratadas previamente (Lazo, 2012). Esta PTAR se encuentra aproximadamente a 150 m de las primeras casas situadas al Este.

7.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA PTAR EN CUANTO A LA GENERACIÓN DE OLORES

7.2.1 Descripción del sistema de tratamiento

La PTAR es operada por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA). Está compuesta de una cámara de entrada, un tamiz hidrodinámico, dos sedimentadores primarios, dos tanques de aireación y dos sedimentadores secundarios. En el Apéndice 1 se enumera las dimensiones y TRH de las diferentes unidades de la PTAR.

Se realizan diariamente tres purgas de lodos de los sedimentadores primarios, el tratamiento es en una laguna facultativa y el lodo se dispone en otra laguna la cual funciona como lecho de secado. El vertido se realiza en el estero de Chacarita en la provincia de Puntarenas.

En la Figura 7.2 se muestra el esquema del proceso de tratamiento y el valor según la generación de olor en donde uno no se percibe el olor y siete se percibe como muy fuerte, el cual se determinó mediante una encuesta (Apéndice 2) a los colaboradores de la PTAR, del AYA y del proyecto Mitigación de Olores.

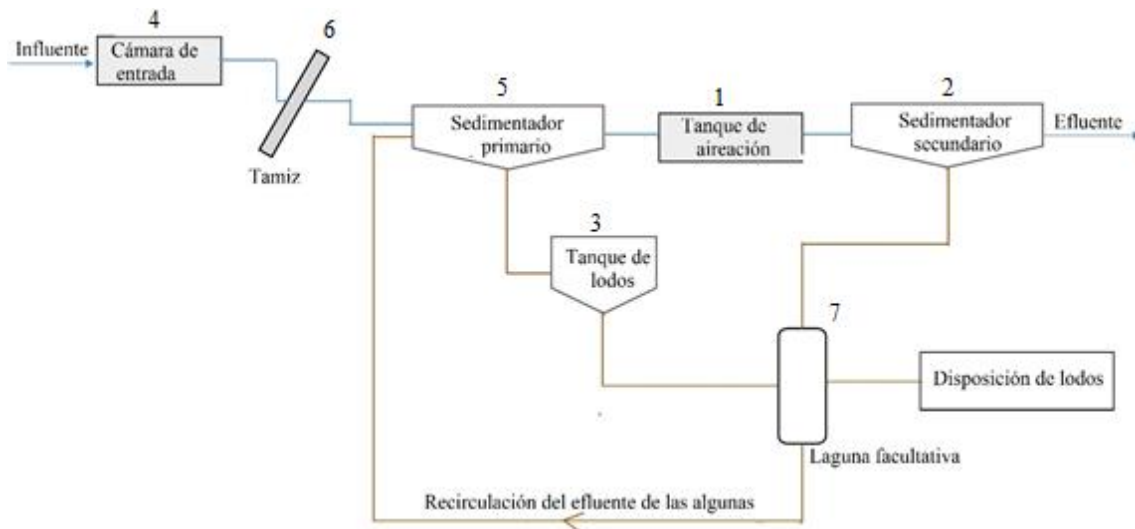


Figura 7.2. Esquema de la PTAR de El Roble de Puntarenas

En el Apéndice 3 se presentan las condiciones actuales de la PTAR en cuanto a la generación de olores, así como los valores de composición media de las aguas residuales antes y después del tratamiento, su eficiencia y condiciones operacionales como pH en el influente, temperatura del agua residual y los caudales del mes de enero y junio del 2013.

Se realizaron dos inspecciones visuales con el fin de ver el estado de las unidades con respecto a la generación de olores e identificar los puntos de emisión de olores. Las visitas al área de estudio se realizaron el 29 de marzo del 2014 y el 26 de mayo 2014.

7.2.2 Determinación de compuestos odorantes y olores

Se realizaron dos campañas de muestreo y análisis de olores, así como de odorantes, ambos fueron realizados por el laboratorio químico LAMBDA S.A., el cual es un laboratorio acreditado ante el ente certificador nacional (ECA).(Anexo 5)

Se recolectó la muestra de olores, H₂S y mercaptanos en un lapso de una hora utilizando una bomba peristáltica de aire con un flujo entre 50 a 100 ml/min, en bolsas TEDLAR[®] de 5 L de capacidad con un espesor de 80 µm (Método USEPA 18 para el uso de bolsas Tedlar) (Amón , 2015).

La muestra de COVs se recolectó en carbón activado; mientras que la muestra de NH₃ se recolectó en un burbujeador con una solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄). El transporte de las muestras fue en una hielera con hielo hasta el laboratorio ubicado a 92 km de la PTAR.

Los métodos analíticos utilizados y recomendados según (Amón , 2015) para determinar las concentraciones de compuestos odorantes y olores se presenta en el Cuadro 7.1.

Cuadro 7.1. Método utilizado para la determinación de las concentraciones de odorantes y olores.

Compuesto odorante	Matriz aire	Matriz agua	Referencia	
	Método	Método		
Sulfuro de hidrógeno	Cromatografía de iones		NIOSH 6013	NMAM
	Límite de detección (LD): 0.1 mg/m3	LD: 0.1 mg/l		
Amoniaco	Espectrofotométrico		NIOSH 6015	NMAM
	LD: 0.05 mg/m3	LD: 0.1 mg/l		
	LD:0.01 mg/m3	LD:0.01 mg/l		
Mercaptanos	Cromatografía de gases y espectrofotometría de masas.		NIOSH 2542	NMAM
	LD: 0.01 mg/m3	LD 0.01 mg/l		
Compuestos orgánicos volátiles	Cromatografía de gases y espectrofotometría de masas.		USEPA 8260C	
	LD 0,01 mg/m3	LD 0,01 mg/l		
Olores	Olfatometría	No aplica	AWMA EE-6	

Se realizó un muestreo el 10 de diciembre del 2014 (en adelante “B”) y el 24 de febrero del 2015 (en adelante “A”).

La selección de los puntos de muestreo se basó en el porcentaje de emisión de olor definido en la Figura 7.2. Debido a que el costo era prohibitivo para realizarlo en toda la PTAR, se seleccionó el tamiz, la salida de los sedimentadores primarios y el tanque de lodos; en cada sitio se generaron campanas para poder capturar los gases (Apéndice 4).

7.2.3 Estimación de emisiones

Según Capelli et al., (2009), se puede calcular la tasa de emisión de olor total (OER_T) de acuerdo a la capacidad de la PTAR y de las OEFs¹¹ de cada fuente de olor (Anexo 2), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$OER_T = C \times (OEF_{LL-AA} + OEF_{PR-T} + OEF_{I-Sed} + OEF_{q-f} + OEF_{II-Sed} + OEF_{Al-lodo} + OEF_{ES-lodo}) \quad (3)$$

Donde:

- C es la capacidad de la PTAR en m³/d.
- OEF_{LL-AA} factor de emisión de olor para la llegada de aguas residuales en OU/m³
- OEF_{PR-T} factor de emisión de olor para el pretratamiento en OU/m³
- OEF_{I-Sed} factor de emisión de olor para sedimentadores primarios en OU/m³
- OEF_{q-f} factor de emisión de olor para unidades tratamiento químico-físico en OU/m³

¹¹ Son el producto de un estudio realizado a 211 PTAR

- OEF_{II-Sed} factor de emisión de olor para sedimentadores secundarios en ou/m^3
- $OEF_{Al-lodo}$ factor de emisión de olor para almacenamiento de lodos en ou/m^3
- $OEF_{ES-lodo}$ factor de emisión de olor para espesamiento de lodos en ou/m^3

7.3 PERCEPCIÓN COMUNITARIA DEL IMPACTO DE LOS OLORES.

7.3.1 Selección del área de aplicación de la encuesta.

Con el fin de determinar el área de impacto y la percepción comunal de las emisiones de la PTAR se diseñó y aplicó una encuesta mostrada en el Apéndice 5.

Se efectuaron inspecciones a radios de 100 m de distancia de la PTAR para la identificación del alcance de la potencial pluma contaminante, mediante un análisis subjetivo.

Se definió un radio máximo de 800 m, el cual se trazó en un plano en el programa ArcGis identificando 59 sectores influenciados a los que se les asignó una codificación con letras de A hasta BT, tal como se muestra en la Figura 7.3.

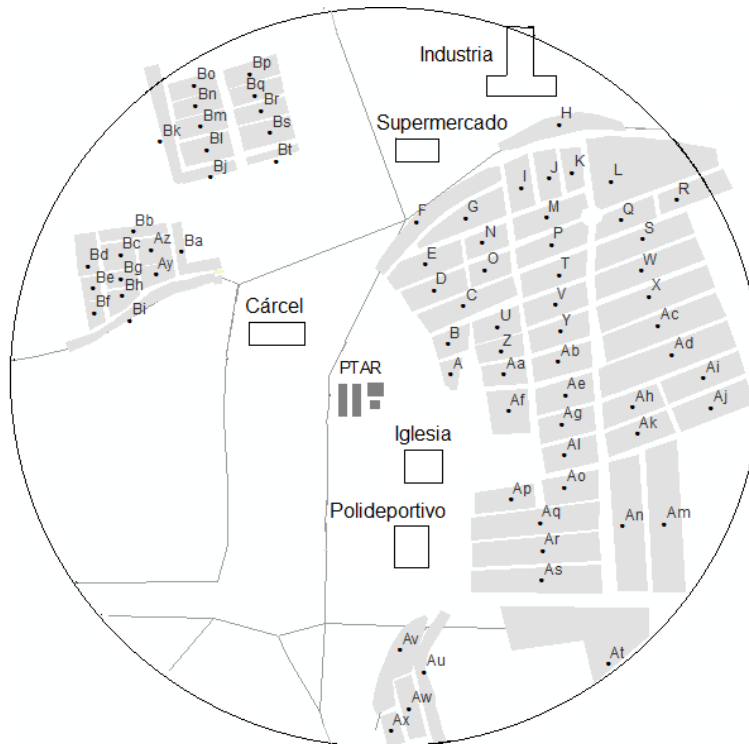


Figura 7.3. Área de aplicación de la encuesta.

7.3.2 Aplicación de la encuesta

La encuesta se aplicó el día 9 de junio del 2014 con un tamaño de muestra de 256 personas considerando un nivel de confianza del 95% y un error del 5%, y se basó en una encuesta preliminar realizada en la zona por parte del AYA (Anexo 3).

Las encuestas en cada manzana se realizaron mediante muestreo sistemático. El número de casas/manzana fue ponderado a partir del número de casas totales de cada manzana (Apéndice 6).

La encuesta diseñada se validó previamente en la comunidad de El Roble para verificar la coherencia y oportunidad de mejora de las preguntas formuladas. La encuesta se realizó a personas de ambos sexos mayores de edad. Para la aplicación de las encuestas se contó con la colaboración de estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental (IA), de los docentes Diana Zambrano y Jorge Calvo, así como del Ingeniero Andrés Lazo del AYA.

7.3.3 Análisis de resultados

Se analizó la información mediante estadística descriptiva. La tabulación de los datos se realizó en el programa SPSS Statistics, el análisis de los resultados en el programa Minitab y los mapas de los resultados en el programa ArcGis.

Se realizaron mapas con las variables de la encuesta: sienten los olores; intensidad del olor y tipo de olor; y para cada sector se identificó la moda.

Se generó la rosa de los vientos para el día de aplicación de la encuesta (9 de junio del 2014). De dicha gráfica se obtiene la frecuencia de ocurrencia de los vientos en diferentes direcciones, así como las clases de velocidad del viento para una localidad en un tiempo dado (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2015). También se obtiene las intensidades típicas y los vientos fuertes-débiles dominantes (Chapela, 2013).

Se realizó un análisis multivariante de componentes principales (ACP) en el programa Minitab con el fin de determinar las correlaciones entre las variables encuestadas y para la correlación “sexo”, “siente los olores” se aplicó una prueba de contraste de hipótesis entre proporciones para identificar si hay diferencias significativas para un $p < 0.05$.

7.3.4 Determinación de estabilidades atmosféricas

Se caracterizó la meteorología del entorno a la PTAR mediante una matriz de estabilidades, que representa la frecuencia absoluta con la que ocurre cada clase de estabilidad de Pasquill (Cuadro 7.2), para lo cual se usó:

- Datos de velocidad del viento y radiación solar brindadas por el IMN para la estación del muelle de Puntarenas

- Datos de nubosidad del IMN para la provincia de Puntarenas. Se consideró la nubosidad como “parcialmente nublado” lo que equivale a un 5-50% de nubes (NOAA, 2015) (Anexo 4).

Cuadro 7.2. Clases de estabildades de Pasquill. Tomado de Arzate Echeverría (2004)

	Día			Noche		
Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura	Radiación solar incidente (1)					
	Fuerte	Moderada	Débil	50	≤Nubosidad≤87	Nubosidad ≤38
	> 50	25 < x < 50	≤ 25			
	cal/cm ² h	cal/cm ² h	cal/cm ² h			
<2	A	A-B	B	F		F
2 a 3	A-B	B	C	E		F
3 a 5	B	B-C	C	D		E
5 a 6	C	C-D	D	D		D
>6	C	D	D	D		D

7.4 Simulación de la dispersión de olores mediante el modelo de penacho gaussiano

7.4.1 Estudio meteorológico

Se realizó un análisis meteorológico previo con el fin de determinar las condiciones meteorológicas típicas que se presentan en El Roble Puntarenas. Para ello se calcularon las estabildades atmosféricas y se generaron las rosas de vientos para representar gráficamente la dirección de transporte dominante de los vientos en el área de estudio.

Este estudio se realizó para el año 2013-2014 y para la época seca y lluviosa. Los datos meteorológicos utilizados fueron brindados por el IMN y corresponden a datos horarios para la estación del Muelle en Puntarenas (Latitud Norte: 9°58'20" y Longitud Oeste: 84°49'51") ubicada aproximadamente a 10 kilómetros de la PTAR.

Los parámetros utilizados fueron dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, radiación solar y cobertura de nubes.

Las rosas de los vientos se realizaron mediante el programa WRPLOT View versión 7.0.0 con los datos de dirección y velocidad del viento. Para determinar las diferencias estadísticas entre los datos de dirección y velocidad del viento se utilizó la prueba no paramétrica Mann-Whitney en el programa Minitab en la que se consideran significativamente diferentes para un $p < 0.05$.

7.4.2 Simulación de la dispersión de olores

El modelo utilizado para realizar la simulación de la dispersión de olores es el modelo de Penacho Gaussiano.

Hipótesis: Dicho modelo supone que el contaminante es arrastrado por el viento medio en una única dirección rectilínea y a una altura efectiva de emisión. Se supone que el contaminante se dispersa como consecuencia de la turbulencia, de modo que las distribuciones vertical y horizontal del contaminante en cada sección transversal del penacho sigue una función gaussiana, caracterizada por su desviación estándar (Souto, 2011).

La expresión analítica de concentración en inmisión, es decir a nivel del suelo y suponiendo que el terreno es llano es:

$$c(x, y, z) = \frac{Q_e}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \left(\exp \left[\frac{-1}{2} \left(\frac{h}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right) \quad (4)$$

Donde:

- c es la concentración de contaminante en x, y, z ($\mu\text{g}/\text{m}^3$),
- x es la coordenada horizontal (m),
- y es la coordenada horizontal transversal (m),
- z la coordenada vertical (m),
- h es la altura efectiva de emisión (m),
- Q_e el caudal másico de contaminante emitido ($\mu\text{g}/\text{s}$),
- u la velocidad del viento a la altura de emisión (m/s),
- σ_y la desviación estándar de la distribución de concentración horizontal transversal, consecuencia de la turbulencia horizontal (m),
- σ_z la desviación estándar de la distribución de concentración vertical, consecuencia de la turbulencia vertical (m).

Para la determinación de σ_z y σ_y se utilizan las siguientes expresiones empíricas:

$$\sigma_y = aX^p \quad (5)$$

$$\sigma_z = bX^q \quad (6)$$

En donde a , p , b , q son parámetros empíricos para la estimación de la dispersión gaussiana se presentan en el Cuadro 7.3

Cuadro 7.3. Parámetros empíricos para la estimación de la dispersión gaussiana adaptado de Souto, (2011)

Clase de estabilidad	a	p	b	q
A	0,4	0,91	0,41	0,91
B	0,36	0,86	0,33	0,86
C	0,36	0,86	0,3	0,86
D	0,32	0,78	0,22	0,78
E	0,31	0,74	0,16	0,74
F	0,31	0,71	0,06	0,71

En el Apéndice 7 se encuentran los valores de la desviación estándar de la distribución de concentración horizontal transversal y vertical para diferentes distancias.

El procedimiento seguido para realizar la modelación se describe en la Figura 7.4. El modelo de penacho gaussiano requiere datos característicos de la fuente de emisión, la altura desde el nivel del suelo a la unidad de tratamiento (3 m), las concentraciones de emisión de los olores y odorantes; el caudal y la velocidad del viento como característica meteorológica.

Las ecuaciones del modelo fueron desarrolladas en Excel y como datos de salida se obtienen las concentraciones en inmisión y su distancia, cuando las concentraciones son superiores a los valores de umbrales de detección se pueden generar mapas de impacto con las líneas isodoras (puntos de igual concentración de olor) en ArcGis para las diferentes estabildades.

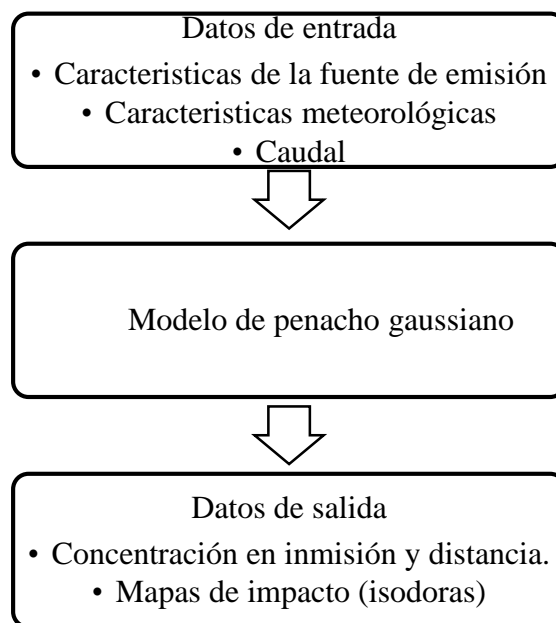


Figura 7.4. Protocolo seguido para la modelación mediante el modelo de penacho gaussiano.

Para el periodo en análisis no se contaba con información de cobertura nubosa, por lo tanto, se tomó como referencia el mes de Setiembre 2014 por proximidad a la época lluviosa, obteniendo que los cielos son parcialmente nublados. Para la nubosidad de la época seca se utilizaron los meses de marzo y abril 2015 por proximidad, obteniendo que los cielos son despejados (Anexo 4).

Para la determinación del caudal de olor (Q_o) cuyas unidades son OU/s para modelos de dispersión, se usó la siguiente ecuación:

$$Q_o = C_{od} \times Q_{Másico} \quad (7)$$

En donde:

- C_{od} es la concentración de olor en OU/m³ en condiciones normales, y
- $Q_{Másico}$ es el caudal másico o flujo de succión de la bomba en m³/s.

8. RESULTADOS

En esta sección se discutirán las condiciones actuales de la PTAR en cuanto a la generación de olores (odorantes, olores y estimación de emisiones), los resultados obtenidos en la encuesta aplicada a la comunidad de El Roble de Puntarenas y los resultados de la modelación.

8.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA PTAR EN CUANTO A LA GENERACIÓN DE OLORES

8.1.1 Determinación de compuestos odorantes y olores

La presencia de odorantes en el ambiente puede ser evaluada mediante la utilización de análisis químicos (Capelli, Sironi, Del Rosso, et al., 2013), es por esto que se midieron diferentes compuestos para la matriz aire y para la matriz agua; así como la utilización de métodos sensoriales para la determinación de olores. Las condiciones para ambos días de muestreo se presentan en el Cuadro 8.1.

Cuadro 8.1. Condiciones operacionales y ambientales en los días de muestreo.

Parámetros	A	B
Hora de muestreo	1:30 pm a 3:30 pm	9:00 am a 11:00 am
Caudal l/s	89±45	103±48
Temperatura del agua °C	30.59 ± 0.47	28.92±0.12
Oxígeno Disuelto mg/l	3.09 ±0.47	3.77±0.78
Temperatura del aire °C	29.0 ±1.6	26.9±1.6
Velocidad del viento m/s	3.3±1.7	2.7±1.4
Dirección del viento	Este	Este

8.1.1.1 Odorantes

A continuación se presenta los resultados de análisis de cada odorante en las diferentes partes del sistema de la PTAR.

8.1.1.1.1 Tamiz

En el Cuadro 8.2 se muestra los resultados en el tamiz. Nótese que en la matriz aire hay mayor concentración de H₂S, ya que según Zhang (2012) en los procesos de pre tratamiento se favorece la liberación de dicho odorante de la fase líquida a la gaseosa debido a la turbulencia y agitación de estas unidades, como por ejemplo las caídas en los tamices (Arriagada Monreal, 2008). Al comparar los resultados obtenidos para la matriz aire se observa que todos los valores de B son mayores a los valores de A, entre las posibles razones se encuentran que las condiciones del muestreo no fueron las mismas por ejemplo al observar el Cuadro 8.1 se nota que el día B se estaba

trabajando con mayor caudal, y a diferentes horas así como no se utilizaron las mismas campanas en los dos días para dicho sitio

La solubilidad del H₂S según la literatura es 5×10^{-3} g/ml y según el Cuadro 6.2 esto representa una afinidad media-baja del compuesto al agua. Mientras al comparar la constante de Henry (2000 Pa m³/mol) con lo reportado en el Cuadro 8.2 se concluye que presenta una afinidad alta al aire, por lo anterior se obtiene mayores valores en la fase aire ya que el compuesto tiende a liberarse y la dirección del flujo es del agua-aire.

Cuadro 8.2. Compuestos odorantes en el Tamiz

Matriz	Compuestos odorantes				
		Sulfuro de Hidrógeno	Amoniaco	Mercaptanos	Compuestos orgánicos volátiles
Aire mg/m ³	A	11520±100	7.6±0.2	0.021±0.002	86±1
	B	47810±500	9.8±0.2	1320±10	145±1
Agua mg/m ³	A	4700±200	4710±200	71±2	72000±1000
	B	4200±200	5050±200	65±1	29000±1000

8.1.1.1.2 Sedimentador

Según un estudio recopilado por Carrera-Chapela et al.(2014) los sedimentadores permiten la separación de sólidos contenidos en las aguas residuales, los sólidos son básicamente materia inorgánica y orgánica que se acumulan en las tolvas de los sedimentadores.

Con el desarrollo de condiciones anaeróbicas/anóxicas - si el caudal de purga de lodos no es el suficiente y si el tiempo de retención no es el apropiado - se promueve la formación de compuestos odorantes y emisiones de olores por acción de microorganismos facultativos que desarrollan vías de degradación anaerobias/anóxicas dependiendo del potencial redox del medio. En estas condiciones, la fermentación de la MO restante produce COVs, tal como se nota en el Cuadro 8.3 que dicho odorante es el mayoritario en ambas matrices.

Se observa un incremento del NH₃ esto se puede deber a la existencia de más MO como proteínas y aminoácidos que cuando se fermentan favorece la producción de NH₃ y compuestos amoniacales.

Entre los factores que favorecen la emisión de COVs en los sedimentadores son la volatilización al ser superficies con grandes áreas y estas están abiertas a la atmósfera (por ser superficies quietas), así como la desorción de compuestos gaseosos del medio líquido (Arriagada Monreal, 2008) ya que el agua durante su transporte en ductos (presión de vapor mayores a la unidad) y llegan a unidades abiertas (presión de vapor menor a la unidad) se produce la desorción de compuestos de alta presión de vapor (Chapela, 2013).

Cuadro 8.3. Compuestos odorantes en la salida del sedimentador

Matriz	Compuestos odorantes				
		Sulfuro de Hidrógeno	Amoniaco	Mercaptanos	Compuestos orgánicos volátiles
Aire mg/m ³	A	0.0047±0.0005	34.2±0.2	0.929±0.002	319±1
	B	0.0035±0.0001	30.3±0.2	0.00016±0.0001	35,8±0.2
Agua mg/ m ³	A	5300±200	44300±200	88±2	425000±1000
	B	6100±200	44100±200	106±1	186000±2000

8.1.1.1.3 Tanque de lodos

En el tanque de lodos se da la liberación de compuestos absorbidos por los lodos (Lehtinen & Veijanen, 2010), la acumulación de los mismos en el fondo favorece la descomposición anaerobia y por lo tanto la producción de H₂S (Madriz Medeiros, 2011), pero depende del tiempo de retención de lodos que debe de ser alto para favorecer la emisión (Chapela, 2013), lo cual se ve reflejada en el Cuadro 8.4 en donde dicho compuesto es el odorante predominante en la matriz aire.

Cuadro 8.4. Compuestos odorantes en el tanque de lodos

Matriz	Compuestos odorantes				
		Sulfuro de Hidrógeno	Amoniaco	Mercaptanos	Compuestos orgánicos volátiles
Aire mg/m ³	A	56820±500	18.3±0.2	1.68±0.02	690± 2
	B	111550±1000	10±0.2	13150± 100	398 ±2
Agua mg/l	A	3000±100	55100±200	163±2	134000±2000
	B	4600±200	100900±200	83±1	68000±1000

8.1.1.1.4 Umbrales de detección

Al analizar los resultados presentes en el matriz aire (en emisión) con los umbrales de detección (Cuadro 8.5), se obtiene que para todos los odorantes en el estudio se tienen mayores concentraciones que los valores de umbral de detección reportados, por lo anterior se puede concluir que los odorantes analizados sí son percibidos en la fuente.

En los tres puntos de muestreo para la matriz agua se obtiene que los compuestos mayoritarios son los COVs y el NH₃, esto se puede atribuir a la degradación y fermentación de la MO presente en las aguas residuales. Su mayor concentración también es consecuencia de la mayor afinidad al agua que los compuestos azufrados (Cuadro 6.1, Cuadro 6.2). por afinidad están más en el agua.

Cuadro 8.5. Umbrales de detección para los diversos odorantes

Odorante	Umbrales de detección	Presente estudio					
		Tamiz mg/m ³		Sedimentador primario mg/m ³		Tanque de lodos mg/m ³	
		A	B	A	B	A	B
Sulfuro de hidrogeno	0.48 mg/m ³	11520±100	47810±500	0.0047±0.0005	0.0035±0.0001	56820±500	111550±1000
Amoniaco	3,55 mg/m ³	7.6±0.2	9.8±0.2	34.2±0.2	30.3±0.2	18.3±0.2	10±0.2
Mercaptanos (como metil-mercaptano)	0.0016 ppm	0.021±0.002	1320±10	0.929±0.002	0.00016±0.0001	1.68±0.02	13150± 100
Compuestos orgánicos volátiles	5-100 ppm	86±1	145±1	319±1	35,8±0.2	690± 2	398 ±2

8.1.1.1.5 Comparación de los resultados obtenidos con estudios previos

Al comparar los resultados obtenidos en estudios previos con los del presente en la fase aire (Cuadro 8.6), se nota que el valor en el tamiz A de H₂S y los seis resultados para el amoníaco se encuentran dentro del rango reportado.

El resto de los datos se encuentran en concentraciones mayores o menores reportadas. Una posible causa de esta diferencia se puede deber a un mal protocolo de muestreo utilizado, ya que al generar campanas sin salida del gas se provocó una concentración de los compuestos. También para el caso del tanque del lodo con los valores altos de H₂S se puede deber a que la MO ésta más concentrada en dicha unidad (Lazo, 2012) .

Es importante mencionar que el muestreo debe de ser isocinético por ejemplo con la utilización de túneles de viento en donde se simula las condiciones atmosféricas asumiendo que el flujo es paralelo sin mezcla vertical. Consiste en filtrar el aire en carbón activado y este se introduce en un conducto utilizando un ventilador, el aire forma un flujo paralelo con la superficie que se encuentra bajo del túnel, las emisiones se mezclan con el aire y una proporción de la mezcla se introduce en la bolsa Tedlar mediante un tubo de teflón (Stuetz & Frechen, 2001).

Sí la concentración del H₂S es de 1400-2800 mg/m³ ocasiona colapso inmediato de la respiración con parálisis (Cuadro 6.3), nótese en el Cuadro 8.6 que para dicho odorante se obtienen concentraciones superiores a dicho rango, sin embargo los colaboradores de la PTAR no han presentado estos síntomas.

Cuadro 8.6. Concentración de odorantes reportados en la literatura para la matriz aire

Odorante	Estudios Anteriores	Presente estudio					
		Tamiz mg/m ³		Sedimentador primario mg/m ³		Tanque de lodos mg/m ³	
		A	B	A	B	A	B
Sulfuro de hidrogeno	280-14000 mg/m ³ ¹² (Stuetz & Frechen, 2001)	11520±100	47810±500	0.0047±0.0005	0.0035±0.0001	56820±500	111550±1000
Amoniac	7.1-35.5 mg/m ³ ⁹ (Stuetz & Frechen, 2001)	7.6±0.2	9.8±0.2	34.2±0.2	30.3±0.2	18.3±0.2	10±0.2
Mercaptanos (como metil-mercaptano)	5.1-25.5 mg/m ³ ⁹ (Stuetz & Frechen, 2001)	0.021±0.002	1320±10	0.929±0.002	0.0002 ±0.0001	1.68±0.02	13150± 100
Compuestos orgánicos volátiles	1.08 mg/m ³ (Lehtinen & Veijanen, 2010)	86±1	145±1	319±1	35,8±0.2	690± 2	398 ±2

Nótese en el Cuadro 8.7 los resultados de dicha investigación comparados con estudios previos reportados para la matriz agua. El H₂S se encuentra dentro del valor reportado por Lebrero et al (2011). Para el NH₃ todos los valores (excepto el tanque de lodos B), se encuentran entre el rango reportado por (Arriagada Monreal, 2008), esto se puede deber a que en dicho día existiera más MO como proteínas y aminoácidos que cuando se fermentan favorece la producción de amoniac y compuestos amoniacaes.

En el caso de los mercaptanos todos los valores obtenidos son menores a los valores reportados por Stuetz & Frechen(2001), la causa de lo anterior es que se esta comparando el total de mercaptanos de este estudio con el metilmercaptano el cual es el odorante más reportado por la literatura. Mientras que para los resultados de los COVs, todos se encuentran por encima del valor reportado por la literatura.

¹² Aire seco y condiciones anaerobias de una PTAR

Cuadro 8.7. Concentración de odorantes reportados en la literatura para la matriz agua

Odorante	Estudios Anteriores	Presente estudio					
		Tamiz mg/l		Sedimentador primario mg/l		Tanque de lodos mg/l	
		A	B	A	B	A	B
Sulfuro de hidrogeno	5.0 a 30.0 mg/l (Lebrero et al., 2011) ¹³	4.700±0.200	4.200 ±0.200	5.300 ±0.200	6.100 ±0.200	3.000 ±0.100	4.600±0.200
Amoniaco	35 a 60 mg/l Arriagada Monreal, 2008) ⁸ 12-40 mg/l (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua , 2015) ⁸	47.100 ±0.200	50.500 ±0.200	44.300 ±0.200	44.100 ±0.200	55.100 ±0.200	100.900 ±0.200
Mercaptanos (como metil-mercaptano)	0.01 a 0.05 mg/l (Stuetz & Frechen, 2001) ⁹	0.071±0.002	0.065±0.001	0.088±0.002	0.106±0.001	0.163±0.002	0.083±0.001
Compuestos orgánicos volátiles	<0.4 mg/l (Fuentes Vivanco, 2014) ⁸	72.000 ±1.000	29.00 ±1.000	425.000 ±1.000	186.000 ±2.000	134.000 ±2.000	68.000 ±1.000

¹³ No indica el lugar

8.1.1.2 Olores

Con respecto a los resultados obtenidos para la concentración de olores en las diferentes unidades se obtiene para ambos días, en el tanque de lodos es donde hay mayor concentración, seguido por el sedimentador primario y en último lugar por el tamiz.

Según Gostelow et al., (2001), en el tanque de lodos existen grandes volúmenes los cuales se acumulan y en condiciones anaeróbicas y/o anóxicas pueden desarrollar olores. Los sedimentadores primarios favorecen la emisión de olores ya formados debido a que por lo general son unidades con grandes superficies abiertas por lo que las aguas residuales están en contacto directo con la atmósfera, favoreciendo la liberación a la misma.

En el tamiz se generan los olores por la acumulación de sólidos cuya naturaleza es MO en descomposición; y por limpiezas irregulares, factores como la turbulencia y caídas del agua favorecen la emisión (Madriz Medeiros, 2011).

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los reportados con la literatura (Cuadro 8.8) se obtiene que los valores del tamiz se encuentra entre el rango reportado por Lehtinen & Veijanen (2010).

Para el tanque de lodos los datos se encuentran por encima de los valores reportados para el espesado de lodos. Se compara con este proceso ya que en dicha unidad es donde inicia el tratamiento de lodos, una posible causa de que los valores sean superiores es que en este tanque se está iniciando la digestión de los lodos y en el espesado ya han recibido un tratamiento.

Para poder comparar los resultados obtenidos en el sedimentador con los datos reportados por Lehtinen & Veijanen (2010), se dividió la concentración de olor entre el área del sedimentador, obteniendo 11 OU/m³ m² para A y 3 OU/m³ m² para B, ambos valores son menores a los valores reportados, esto se puede atribuir a que las áreas son diferentes 285 m² para el sedimentador reportado por Lehtinen & Veijanen (2010) y para el de este estudio es de 205 m².

Cuadro 8.8. Concentración de olor en las diferentes unidades OU/m³

Unidad	A	B	Estudios previos	Referencia
Tamiz	8839	4419	3800-12000 (\bar{x} = 7900) OU/m ³	
Sedimentador primario	2210	552	57- 380 (\bar{x} =157) OU/m ³ m ²	(Lehtinen & Veijanen, 2010)
Tanque de lodos	35355	35355	1,100–7,100 (\bar{x} =4,330) OU/m ³ (espesamiento de lodos)	

8.1.2 Emisiones teóricas

Se determinaron las emisiones teóricas en emisión a partir de un factor de emisión de olores con el fin de relacionar la cantidad de olor liberado a la atmósfera con un índice de actividad específico (capacidad de tratamiento de la PTAR), obteniendo las unidades de olor por metro cúbico de aguas residuales tratadas (Capelli et al., 2009).

Al determinar las concentraciones de olor mediante la utilización de factores de emisión, para el día A las horas a las cuales se presentan las mayores emisiones de olor son a las 10:00, 12:00, 18:00, 21:00 y cuyas concentraciones máximas se encuentran entre 30 a 45 x 10³ OU/m³, lo anterior se evidencia en la Figura 8.1. Es importante resaltar que en dichas horas es cuando se presenta un mayor caudal y estas a su vez se relacionan con las actividades humanas como el lavado de la ropa y la preparación del almuerzo (10:00 a 12:00) y de las 18:00 en adelante la preparación de la cena y el regreso al hogar después de la jornada laboral.

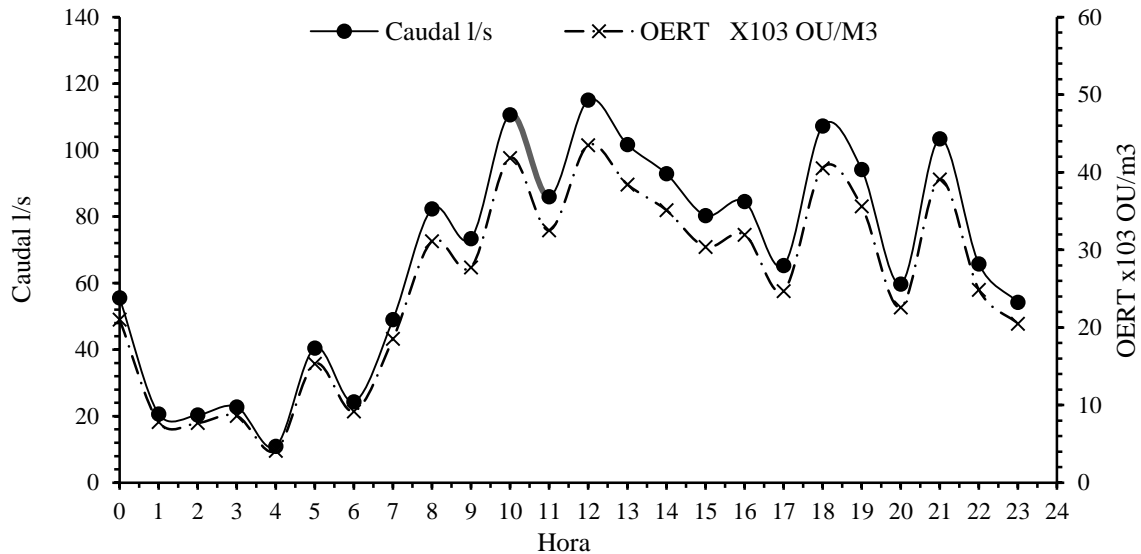


Figura 8.1. Concentración de olor mediante OERT para el día 24 de febrero del 2015.

Para el día B se observa en la Figura 8.2 que las horas de máxima emisión ocurren a las 13:00 y a las 18:00 horas, obteniendo concentraciones superiores a 50 x 10³ OU/m³.

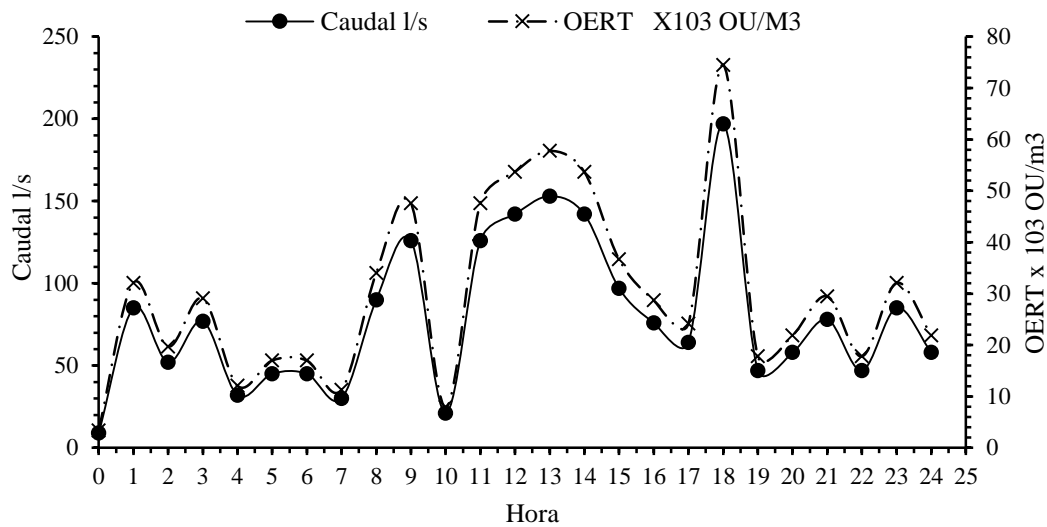


Figura 8.2. Concentración de olor mediante OERT para el día 10 de diciembre del 2015.

Al comparar ambas figuras se observa que las mayores emisiones de olor ocurren cuando se trata mayor caudal, y la emisión se dispara a las 18:00 en donde se trabaja con el caudal pico.

El nivel de olor de la PTAR es bajo ya que según un estudio realizado por (Capelli et al., 2009) indican que un nivel de olor es alto si sus emisiones son mayores a 10^4 OU/m³. Las emisiones de olor aumentan proporcionalmente a la capacidad de tratamiento, por lo anterior se clasifica la PTAR como pequeña (caudal 10^3 a 10^4 m³/d).

La utilización de factores de emisión utilizando un índice de actividad específico es una herramienta práctica y económica para estimar las concentraciones de olor, más cuando los costos asociados a los muestreos y análisis son elevados, como es el caso de la presente investigación.

8.2 PERCEPCIÓN COMUNITARIA DEL IMPACTO DE LOS OLORES.

8.2.1 Encuesta a usuarios de la planta de tratamiento

La encuesta fue aplicada a 262 personas de ellas un 68% corresponde a mujeres y un 32% a hombres. En la Figura 8.3 se presentan los porcentajes según el rango de edades, obteniendo mayor porcentaje para el rango de 18 a 28 años y de 29 a 39 años.

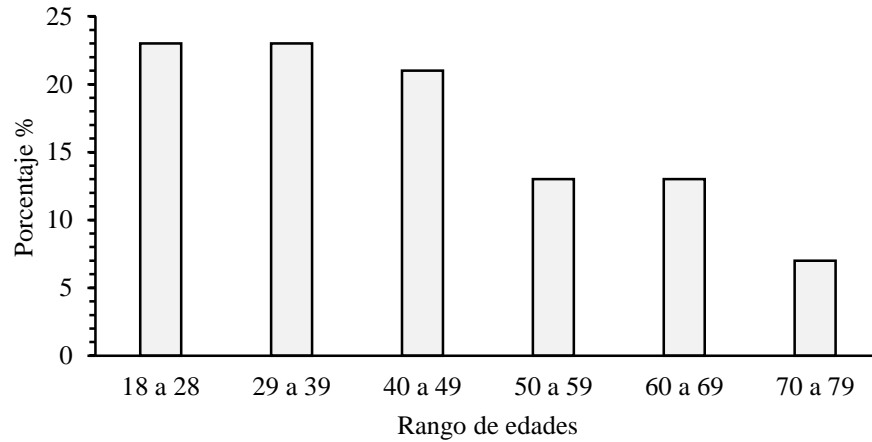


Figura 8.3. Porcentaje de personas, según el rango de edad

En relación a la percepción del olor el 76% de los encuestados efectivamente perciben los olores, por lo cual las preguntas restantes se hacen sólo a 198 personas. En la Figura 8.4 se presenta espacialmente la percepción del olor y se evidencia el radio de influencia a los 600m.

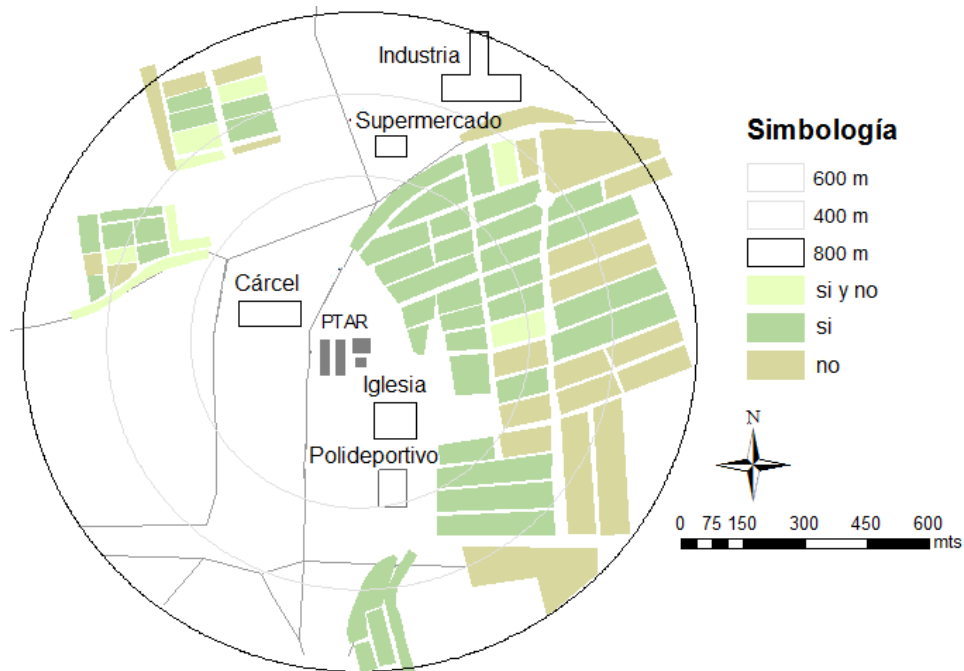


Figura 8.4. Percepción del olor en los diversos sectores

En la Figura 8.5 se muestra la dirección y velocidad del viento para el día de aplicación de las encuestas, donde se muestra con una frecuencia de un 45% que la dirección del viento es hacia el noreste y la velocidad del viento es baja (0.5 a 2.1 m/s) . Al comparar las Figura 8.4 y Figura 8.5 se observa que dicha dirección es donde se sienten más los olores. El radio de influencia puede ser mayor en función de la velocidad del viento ya que intensidades bajas y la presencia de edificaciones bloquea el transporte horizontal (Chapela, 2013).

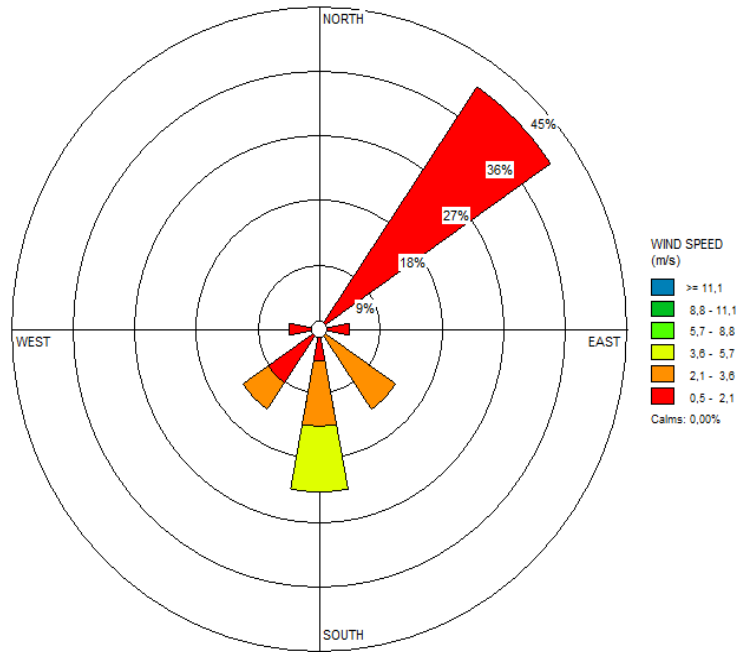
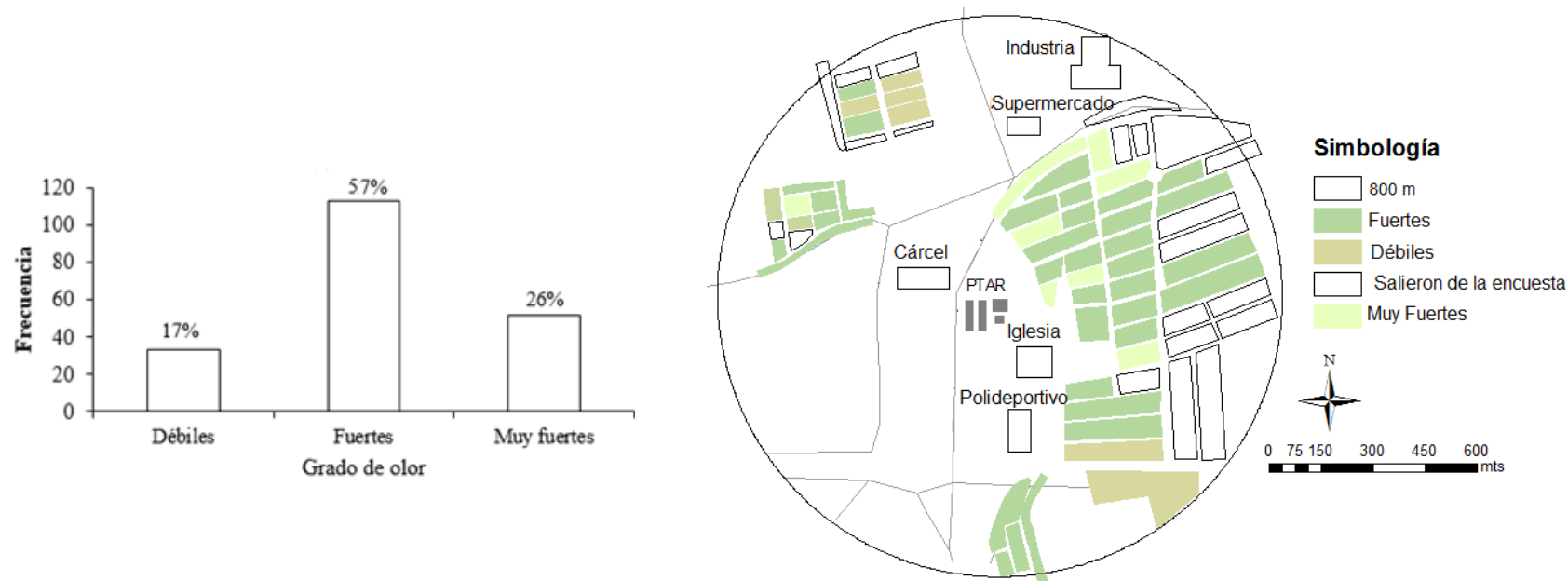


Figura 8.5. Dirección y velocidad del viento para el 9 de junio, 2014.

El nivel de intensidad con el que se percibe el olor es un 57% fuerte, un 26% perciben los olores como muy fuertes y un 17% como débiles como se muestra en la Figura 4.6 a y b.

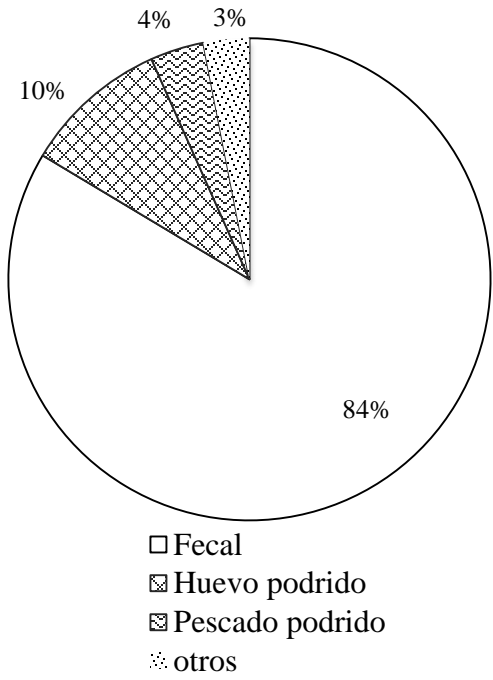


a) Frecuencia

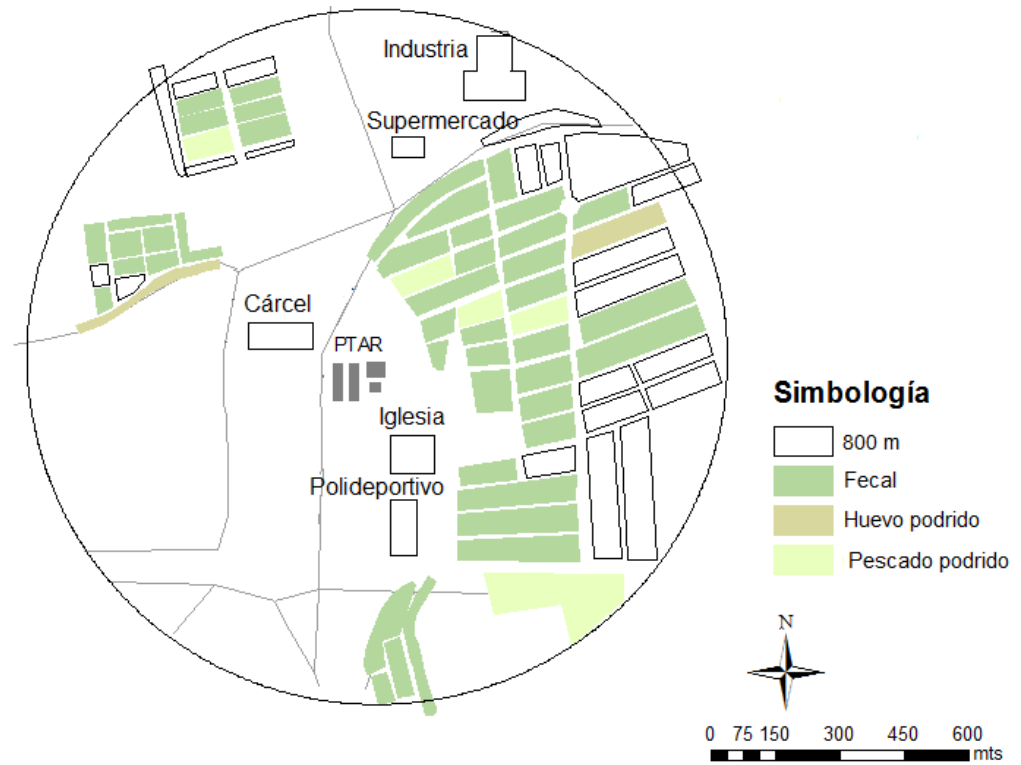
b) Espacial

Figura 8.6. Percepción del nivel de intensidad del olor.

Con respecto a la percepción del tipo de olor se indica que el olor fecal es el predominante con un 84% lo cual se evidencia en Figura 8.7 a y b. Esto induce a una presencia de compuestos nitrogenados como el Indol y Escatol (Lebrero et al., 2011). El H₂S se asemeja al huevo podrido, los mercaptanos a repollo podrido, el NH₃ es un olor irritante y los COVs es variado como a solventes, alcohol, pintura, césped verde, ajo y madera, entre otros (Lehtinen & Veijanen, 2010).



a) Frecuencia



b) Espacial

Figura 8.7. Percepción del tipo de olor.

Las horas en la que más se perciben los olores son las franjas horarias entre 06:00 a 09:00 y de 15:00 a 18:00 como se muestra en la Figura 8.8, esto tiene influencia por el comportamiento de la atmósfera ya que a dichas horas se presenta un comportamiento ligeramente y moderadamente inestables (ver Cuadro 8.9), lo que indica que en horas de la mañana el contaminante empieza a ascender ya que se da la ruptura de la capa estable por el calentamiento solar y en las horas de la tarde la capa estable desciende por el disminución del flujo de calor y por lo tanto el contaminante tiende a estar más cerca de la superficie, es por esto que en ambos lapsos de tiempo los olores se tienden a sentir más.

De las 18:00 a las 21:00 se cuenta con una clase estable (E) la cual se caracteriza por no presentar movimientos verticales sino horizontales lo cual ocasiona que los olores se trasladen a mayores distancias y sean percibidos por la población.

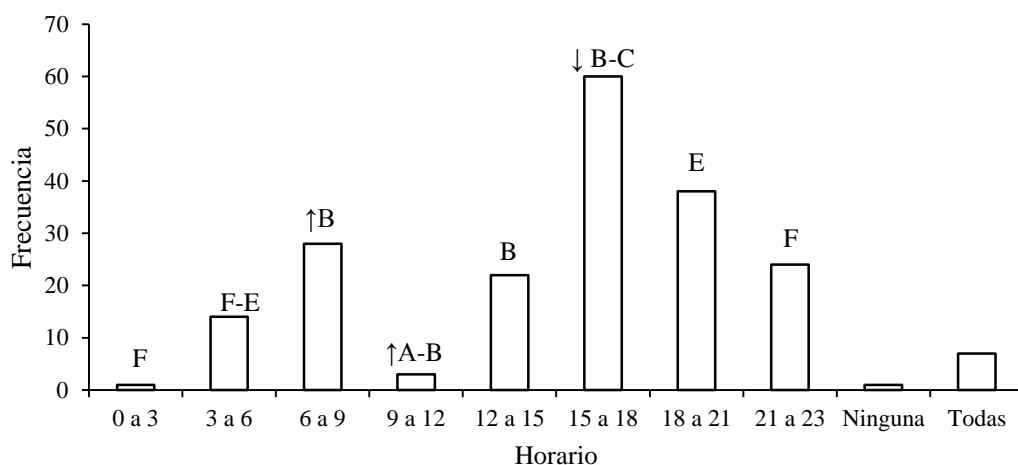


Figura 8.8. Franjas horarias donde se percibe el olor con mayor intensidad.

Cuadro 8.9. Estabilidades atmosféricas en la zona de estudio para el 9 de junio del 2014.

Hora	Estabilidad de Día			Estabilidad noche			
	Velocidad del viento m/s	Radiación solar incidente ca/cm2h	Clase	Hora	Velocidad del viento m/s	Coberturas de nubes	Clase
6-9	2	29	B	0-3	2		F
9-12	3	67	A-B	3-6	2	<30	F
12-3	4	69	B	18-21	4		E
3-6	4	31	B-C	21-23	3		F-E

Al comparar los resultados obtenidos por la estimación de olores con el uso de factores de emisión y los resultados de la encuesta, se concluye que por ambos métodos las 18:00 es la hora la cual se perciben más los olores. Ya que en dicho periodo la planta trabaja con mayor caudal así como hay mayor concurrencia de las personas en las casas.

La época del año en la cual la población percibe más los olores es en la época lluviosa (62%) como se muestra en la Figura 8.9, dicha época se caracteriza por presentar temperaturas del aire más frías en comparación con la temperatura del agua por lo tanto los compuestos se dirigen hacia el aire (Kreuk, 2013), ya que la presión parcial del compuesto en el aire es prácticamente cero cuando la unidad es abierta a la atmósfera por lo tanto la transferencia entre fases sigue la dirección agua-aire (Chapela, 2013).

En invierno se cuenta con una mayor estabilidad atmosférica, debido a que el calentamiento superficial del sol es menor, esto favorece al confinamiento de los contaminantes en la superficie, con ello favorece los movimientos horizontales y un incremento en la concentración en inmisión con respecto al verano (Chapela, 2013).

En la época lluviosa la PTAR trabaja con mayor caudal debido a conexiones ilícitas del agua de lluvia a la red sanitaria (Lazo, 2012), por ende se perciben más los olores.

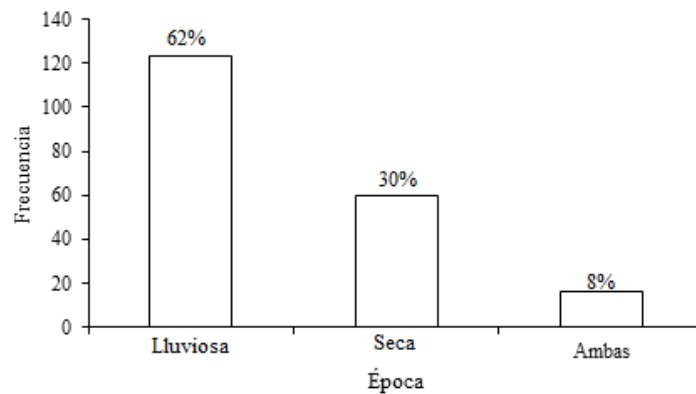


Figura 8.9. Percepción de los olores según la época

Mediante el análisis de componentes principales (Apéndice 10) se determina que hay correlaciones entre las variables “sexo” –“siente los olores”.

Se aplicó una prueba de hipótesis entre proporciones con el fin de determinar si existe diferencia significativa entre las mujeres y hombres que sí sienten los olores, obteniendo con un 95% de confianza que si existe (Apéndice 11), según un estudio realizado por Valencia, Espinosa, Parra, & Peña, 2011, las mujeres tienden a percibir más los problemas ambientales en comparación con los hombres.

8.3 SIMULACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OLORES MEDIANTE EL MODELO DE PENACHO GAUSSIANO

8.3.1 Estudio meteorológico

Se realizó un estudio meteorológico para el año 2013-2014 con el fin de caracterizar las variables meteorológicas de la zona en estudio, las cuales son necesarias para sustentar el modelo y realizar el análisis de estabildades atmosféricas.

La dirección que toma la dispersión del contaminante, está relacionada al comportamiento de los vientos en la zona (Barrera Curihuentro, 2010). En la Figura 8.10 se presenta la rosa de los vientos del 2013 -2014, en donde las direcciones predominantes son desde el sur y el noreste; mientras las más débiles son hacia el este, sur este, norte, oeste y noroeste

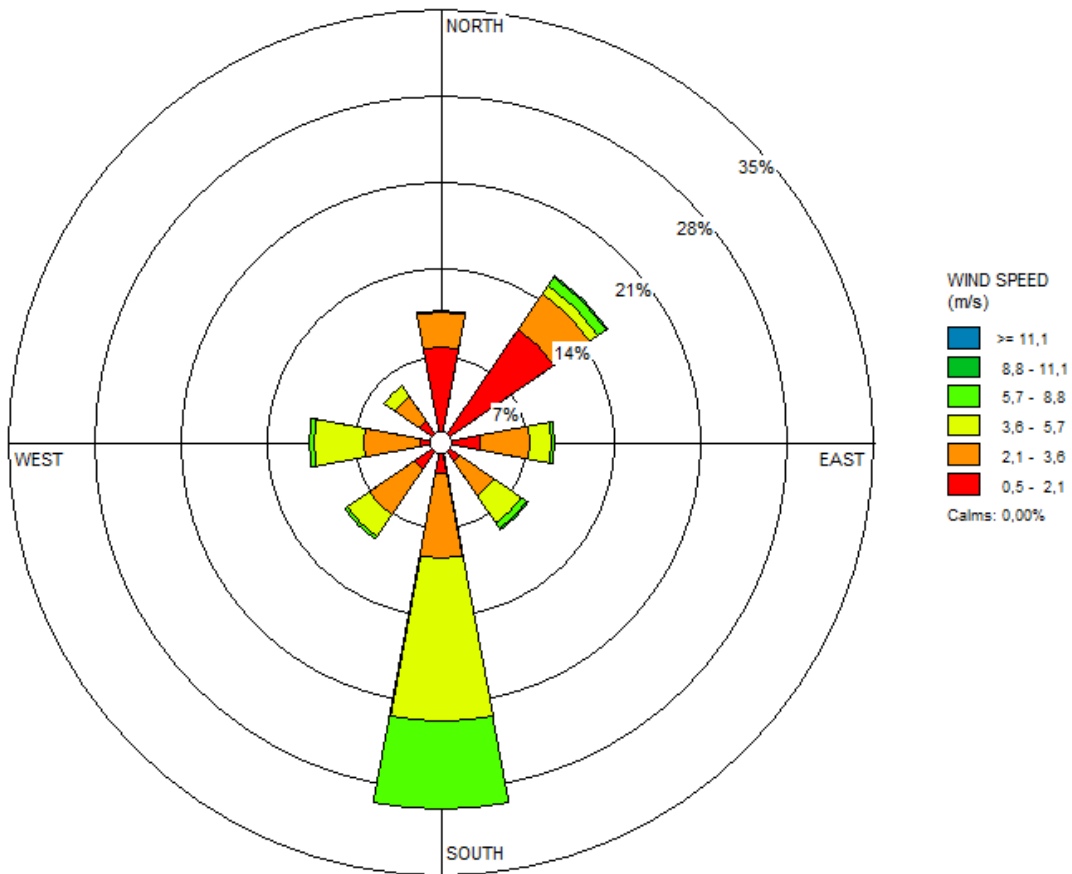


Figura 8.10. Velocidad y dirección del viento de los datos recogidos para el año 2013-2014 en la provincia de Puntarenas, estación del Muelle.

Por lo anterior, se puede concluir que en el periodo del 2013-2014, el 28% de los vientos se desplazó en dirección norte, por ende, si en dicho periodo existieron episodios de olor, es probable que éstos se desplazaron en dicha dirección, y menos de un 21% hacia el noreste.

Las frecuencias de las velocidades del viento para el año 2013-2014 se presentan en el Cuadro 8.10, nótese que para dicho periodo el 33% corresponde a velocidades de 0.5 a 2.1 m/s, 31.6% de 2.1 a 3.6 m/s y el 25.7% a velocidades entre 3.6 a 5.7 m/s.

Cuadro 8.10. Distribución de frecuencias de velocidades del viento en diversos periodos, de la zona de estudio.

Época	Período	0.5 a 2.1 m/s	2.1 a 3.6 m/s	3.6 a 5.7 m/s	5.7 a 8.8 m/s	8.8 a 11.1 m/s	≥11.1 m/s
Ambas		33	31.6	25.7	9.5	0.3	
Seca	2013-2014	29.4	30.7	28.1	11.5	0.3	0
Lluviosa		36.1	32.4	23.6	7.7	0.2	

Se generaron las rosas de los vientos para la época seca y la lluviosa (Figura 8.11 y Figura 8.12.respectivamente), en donde se evidencia que las direcciones predominantes son hacia el sur y el noreste, en el verano un 14% se dirige hacia el oeste y el suroeste, mientras en el invierno un 14% hacia el norte y el sur este.

Analizando las frecuencias de las velocidades de los vientos para las dos épocas (Cuadro 8.10) en la época seca la mayor frecuencia en velocidades es de 2.1 a 3.6 m/s (30.7%), mientras en la época lluviosa la mayor es de 0.5 a 2.1 (36.1%). Al contar con intensidades bajas se promueve el confinamiento del olor (Chapela, 2013) y por ende ocasiona que se perciban más los olores lo cual se evidencia al compararlo con los resultados de la encuesta (Figura 8.13).

Dado lo anterior se realizó una prueba de hipótesis con el fin de establecer si existe diferencia significativa entre las direcciones y velocidades de los vientos entre ambas épocas, obteniendo un $p < 0.05$ para ambos casos, por lo tanto, hay diferencia significativa entre las épocas tanto para la dirección y la velocidad del viento (Apéndice 12).

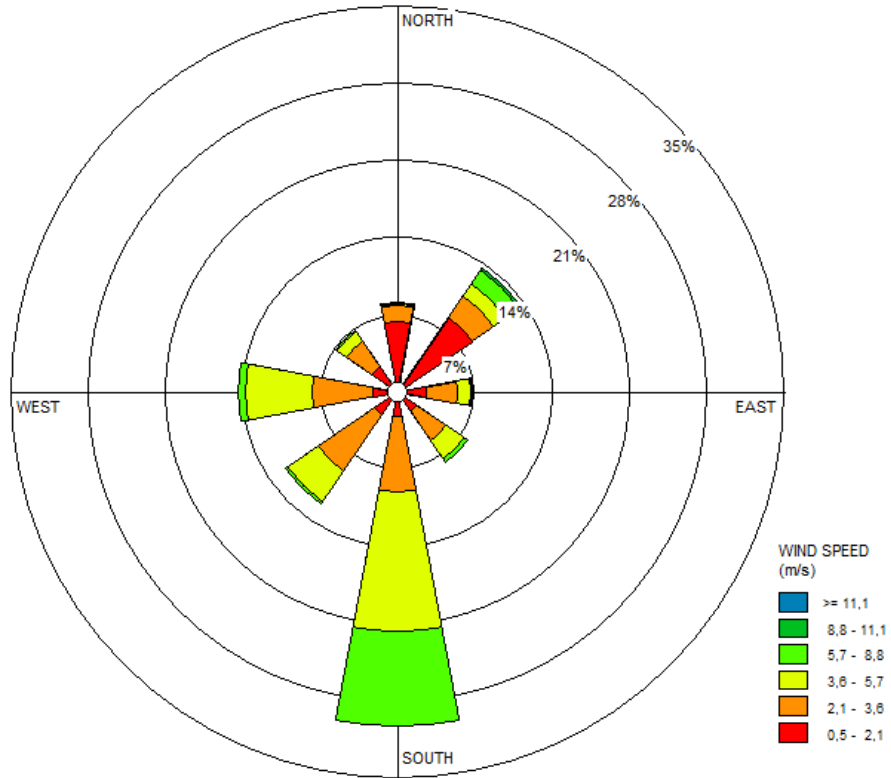


Figura 8.11. Velocidad y Dirección del viento para la época seca 2013-2014

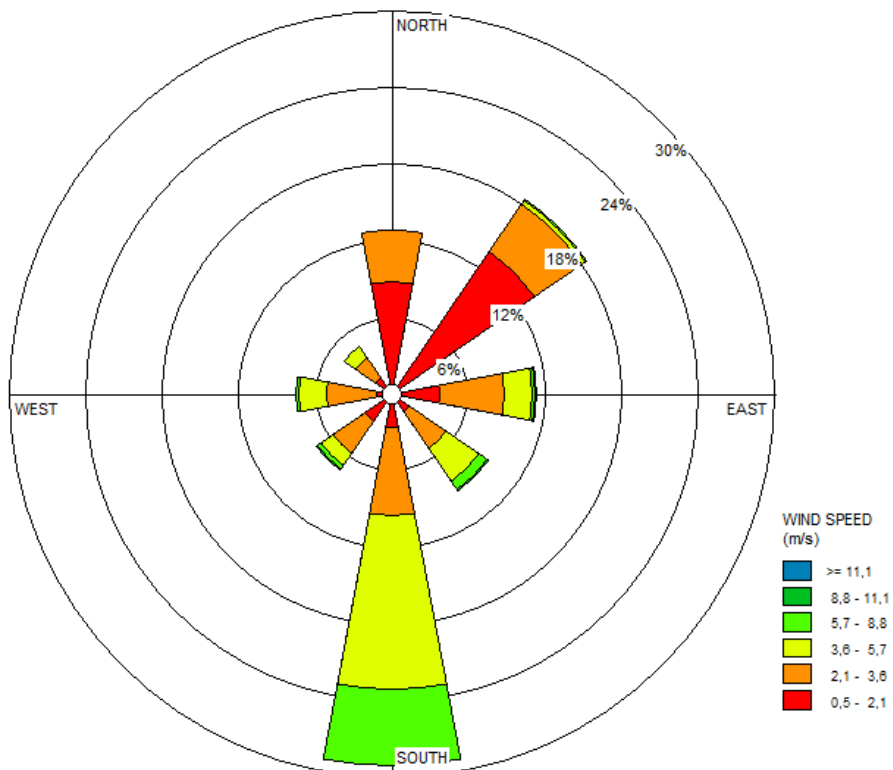


Figura 8.12. Velocidad y Dirección del viento para la época lluviosa 2013-2014

En el caso de la temperatura se encuentra entre 20°C a 36°C, en la Figura 8.13 se observa que los meses con temperaturas más altas son de Enero a Abril.

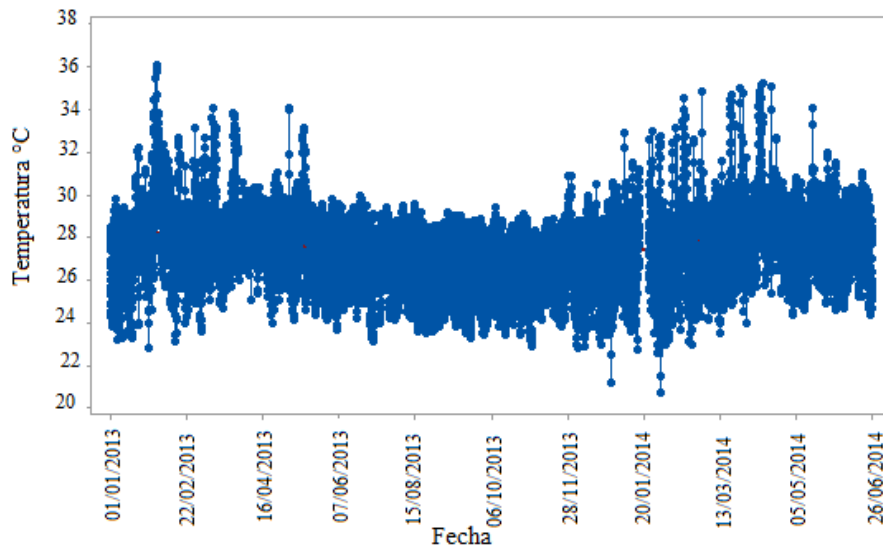


Figura 8.13. Temperaturas para el 2013-2014

En la Figura 8.14 se presentan los valores de porcentaje de humedad, como se observa en los meses de invierno los valores se encuentran entre 60% y 90%, en comparación con verano oscilan entre 30% y 90%.

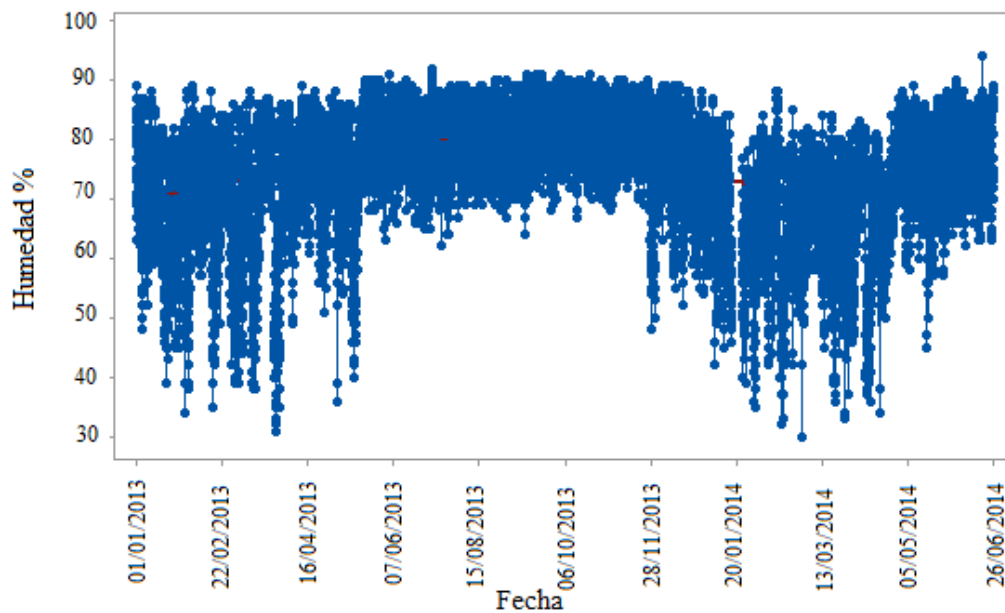


Figura 8.14. Porcentaje de Humedad para el 2013-2014.

Se determinaron las clases de estabildades atmosféricas para el día y la noche, en tres escenarios: Ambas épocas, en época seca y lluviosa. Nótese en el Cuadro 8.11 que se obtiene una clase atmosférica B para los tres periodos de tiempo en el día, favoreciendo su movimiento vertical; así como menor es la distancia horizontal de alcance de los olores (Barclay et al., 2014).

Cuadro 8.11. Estabildades atmosféricas en el día para diferentes periodos del 2013-2014.

Época	Período	Velocidad del viento m/s	Radiación solar incidente ca/cm ² h	Clase
Ambas	6:00 am a 6:00 pm	3,72	19,1	B
Seca	6:00 am a 6:00 pm	3,97	38,92	B-C
Lluviosa	6:00 am a 6:00 pm	3,51	32,35	B

En el Cuadro 8.12 se presentan las estabildades atmosféricas para la noche, en ambas épocas y en la época seca se obtiene la clase F, mientras en la época lluviosa una clase E, por lo que se espera que existan más movimientos horizontales y los olores se trasladen a mayores distancias.

Cuadro 8.12. Estabildades atmosféricas en la noche para diferentes periodos del 2013-2014.

Época	Periodo	Velocidad del viento m/s	Nubosidad	Clase
Ambas	7:00 pm a 5:00 am	2.51	<30	F
Seca	7:00 pm a 5:00 am	2.63	<30	F
Lluviosa	7:00 pm a 5:00 am	2.42	>45	E

En el día sin importar la época del año se puede concluir que es muy probable la presencia de una clase moderadamente inestable, en cambio en la noche en la época seca se espera una clase muy estable y en época lluviosa una clase estable.

8.3.2 Simulación de dispersión de olores y odorantes.

El caudal de olor se determine de acuerdo a la ecuación (7), obteniendo valores en todos los casos menores a una 1 OU/s. En el día A en el sedimentador es donde se encuentra el mayor caudal de olor y para el día B es en el tamiz. En el Apéndice 9 se encuentran los flujos de succión.

Al comparar los resultados con los reportados por Stuetz & Frechen (2001) se encuentran valores por debajo a los reportados por la literatura (Cuadro 8.13), la principal causa es el bajo caudal másico (Cuadro 8.14) obtenido de acuerdo a la metodología utilizada, ya que lo que se hizo fue encapsular los olores, por lo tanto se recomienda la utilización de un túnel de viento o una campana de flujo para un futuro trabajo.

Cuadro 8.13 .Comparación de caudal de olor en OU/s según diferentes metodologías para la toma de la muestra.

Proceso unitario	Campana de flujo ¹	de Túnel de viento ¹	Presente estudio	
			A	B
Tamiz			0.00269	0.00537
Sedimentador primario	6780	76,076	0.04596	0.00072
Tanque de lodos	4820	100,800	0.00928	0.03712

¹(Stuetz & Frechen, 2001)

Cuadro 8.14. Caudal de odorantes en µg/s

Proceso unitario	Sulfuro de Hidrógeno		de Amoniaco		Mercaptanos		Compuestos orgánicos volátiles	
	A	B	A	B	A	B	A	B
	Tamiz	14.03408	58.24385	0.00925	0.01194	0.00003	1.60681	0.10477
Sedimentador primario	0.000006	0.000004	0.04452	0.03944	0.00121	0.000000	0.41523	0.04660
Tanque de lodos	59.73794	117.27855	0.01924	0.01051	0.00176	13.82530	0.72543	0.41844

En las PTAR generarán emisiones que alcanzarán su máxima concentración a distancias cercanas de la misma (Souto, 2011) . Nótese en el Cuadro 8.15 y Cuadro 8.16 que en las clases E y F se obtienen distancias más largas en comparación con las demás clases, con lo anterior se evidencia lo expuesto por Barclay et al, (2014) en donde indica que en dichas clases los olores se transportan a largas distancias.

La distancia más larga es a 150 m, la cual coincide con la ubicación de las primeras casas, sin embargo, al comparar los resultados de la sección 8.2, se evidencia que los olores se perciben hasta los 600 m de la PTAR en dirección hacia el este.

Al comparar los Cuadro 8.15 y Cuadro 8.16 con los valores de umbral de detección; se obtiene que todos los olores y los odorantes para todas las clases de estabilidad se encuentran por debajo del umbral de detección, la causa principal es el bajo caudal másico obtenido debido a la metodología del muestreo realizado. Por lo tanto, no fue posible identificar episodios de molestia por olores y odorantes.

Cuadro 8.15. Resumen de la concentración máxima de olor y odorantes, así como las distancia obtenidas por el modelo de penacho gaussiano para las diferentes clases de estabilidad para el día 24-2-2015.

Clase	Concentración máxima/ distancia (m)				
	Olor OU/m ³	Sulfuro de hidrógeno μg/m ³	Amoniaco μg/m ³	Mercaptanos μg/m ³	Compuestos orgánicos volátiles μg/m ³
A	0.00047	0.42142	0.00059	0.00002	0.01007
	6m	6m	6m	6m	6m
B	0.00041	0.37639	0.00053	0.00001	0.00899
	9m	9m	9m	9m	9m
C	0.00038	0.34234	0.00048	0.00001	0.00818
	15m	11m	10m	10m	10m
D	0.00031	0.28268	0.00039	0.00001	0.00675
	22 m	19m	18m	17m	18m
E	0.00024	0.21227	0.00030	0.00001	0.00507
	46 m	34m	33 m	33m	33m
F	0.00009	0.07959	0.00011	0.00001	0.00190
	150 m	175 m	150 m	150m	150 m

Cuadro 8.16. Resumen de la concentración máxima de olor y odorantes, así como las distancia obtenidas por el modelo de penacho gaussiano para las diferentes clases de estabilidad para el día 10-12-2014

Clase	Concentración máxima/ distancia (m)				
	Olor OU/m ³	Sulfuro de hidrógeno μg/m ³	Amoniaco μg/m ³	Mercaptanos μg/m ³	Compuestos orgánicos volátiles μg/m ³
A	0.00043	1.73422	0.00061	0.15249	0.00634
	6m	6m	6m	6m	6m
B	0.00038	1.54893	0.00055	0.13619	0.00566
	9m	9m	9m	9m	9m
C	0.00035	1.40880	0.00049	0.12387	0.00515
	10m	11m	10m	10m	10m
D	0.00029	1.16328	0.00041	0.10228	0.00425
	18 m	19m	18m	18m	18m
E	0.00022	0.87354	0.00031	0.07681	0.00319
	33 m	34m	33 m	33m	33m
F	0,00008	0.32754	0.00012	0.02880	0.00120
	150 m	175 m	150 m	150m	150 m

Se estimó el caudal volumétrico necesario para que las concentraciones concuerden con los resultados de la sección 8.2. En el apéndice 13 se muestran los resultados de inmisión para los días A y B, se generan los mapas de impacto con las isodoras para el odorante H₂S y los olores para las

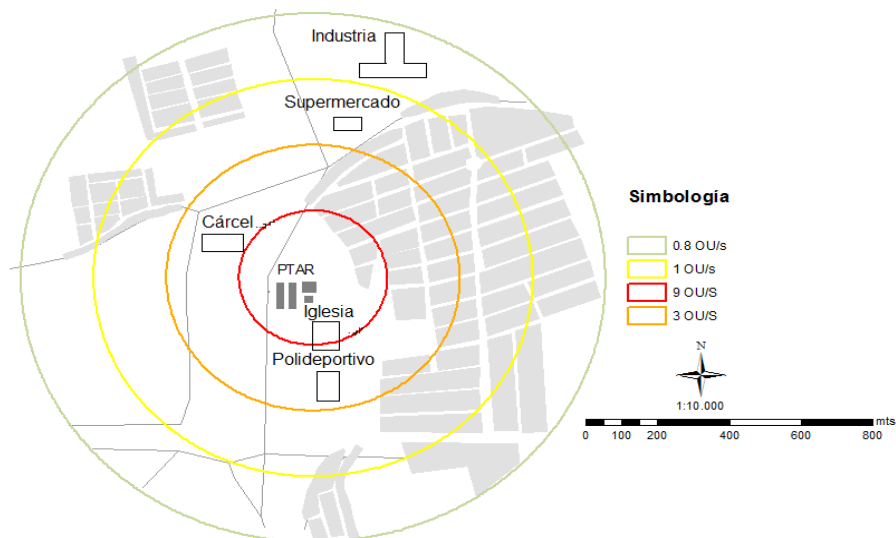
clases de estabilidad B y F. La separación entre isodoras es de 200m, empezando en 200 y terminando en 800 m.

En la Figura 8.15 se observa que para la isodora de 200 m para todos los casos a,b,c,d se obtiene un valor superior a 1 OU/s, por lo tanto bajo dichas condiciones los olores si sería percibidos, y si se compara con la legislación (Cuadro 6.5) no se cumpliría con los límites permisibles de olor establecidos por Holanda, Alemania, Australia y Nueva Zelanda.

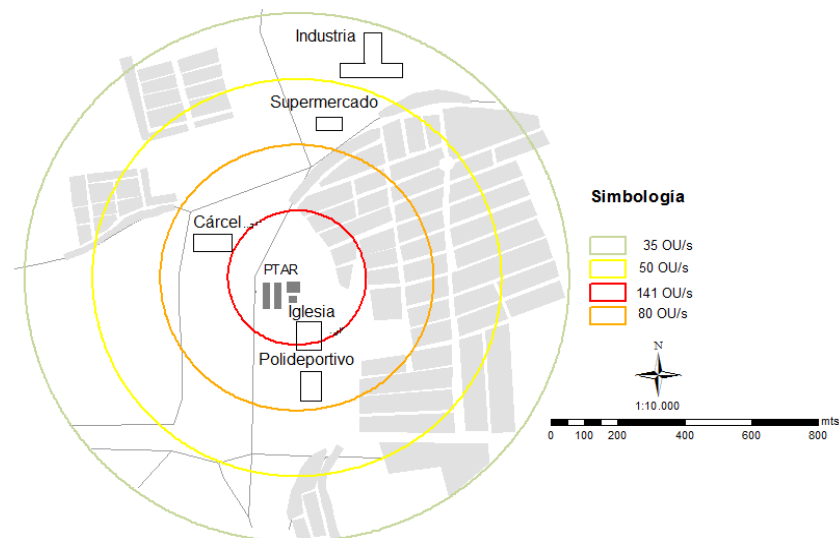
Con la isodora de 600 m (amarilla) para la clase b (casos a y c) se obtiene una 1OU/s, aquí ya se empieza a dejar de percibir los olores lo cual se evidencia con la isodora de 800 m (verde) se obtienen valores menores a 1 OU/s, esto coincide con los valores de los resultados obtenidos en la percepción comunal.

Para el caso de la clase f (b y d) desde la isodora de 600 m se obtienen valores mayores a 1 OU/s ya que esta es una clase más estable y por lo tanto permite la concentración de los contaminantes debido a que el movimiento vertical se encuentra inhibido.

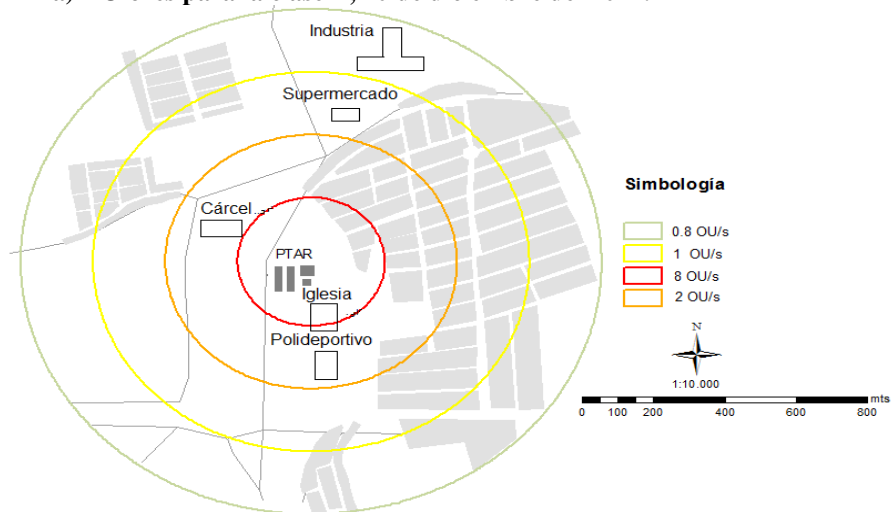
Para el caso de H₂S, Holanda ha establecido un límite en inmisión de 10 mg/m³ (10012.90µg/m³) en la Figura 8.16 se obtiene que para todos los casos a,b,c,d se cumple con el límite establecido.



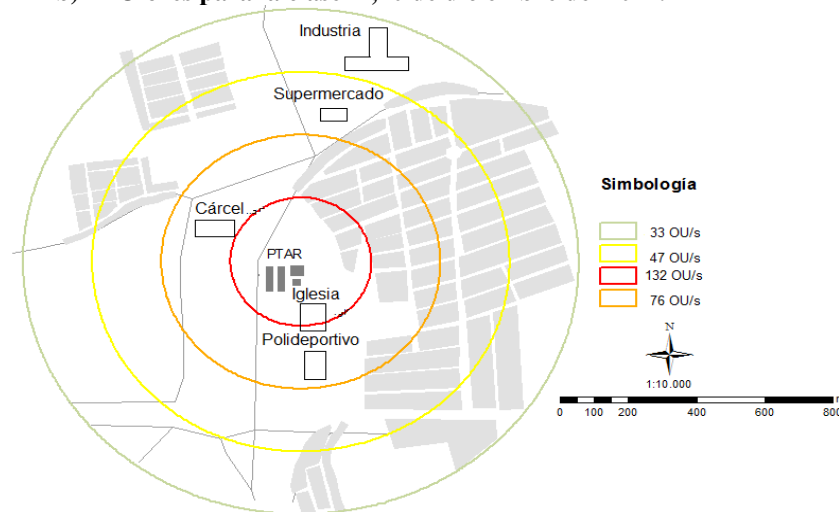
a) Olores para la clase B, 10 de diciembre del 2014.



b) Olores para la clase F, 10 de diciembre del 2014.

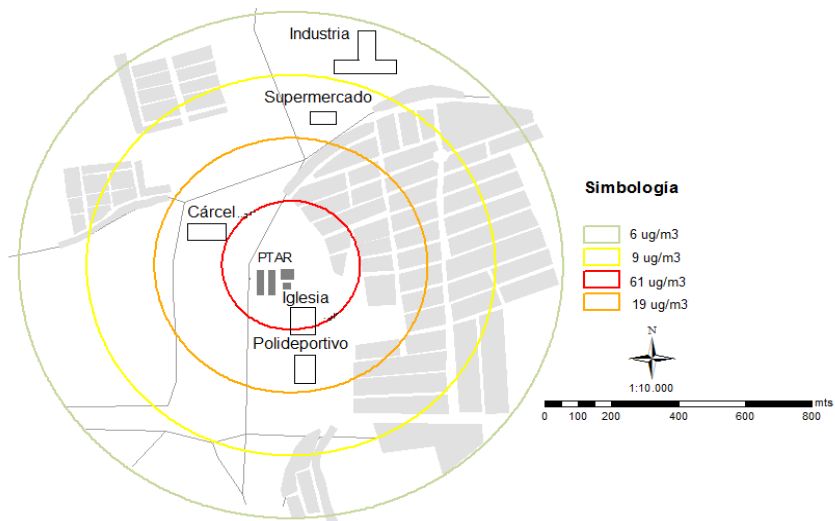


c) Olores para la clase B, 24 de Febrero del 2015.

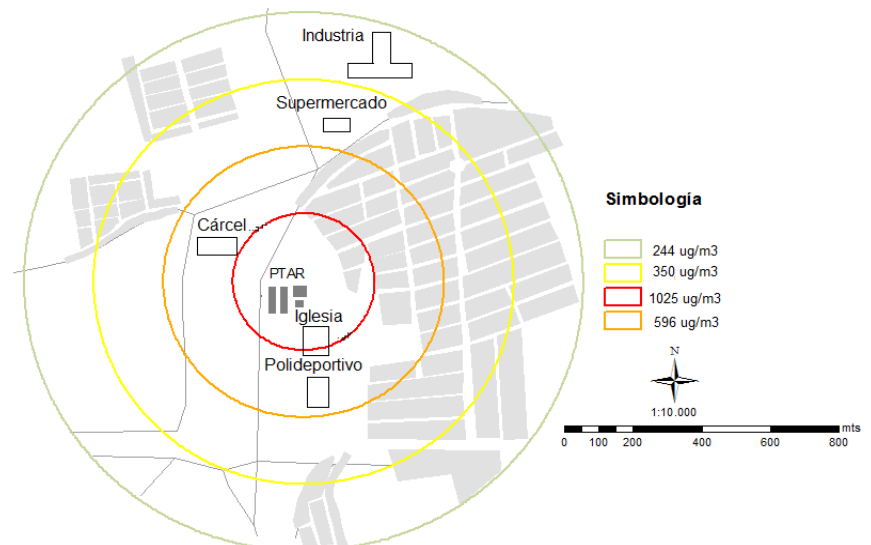


d) Olores para la clase F, 24 de Febrero del 2015

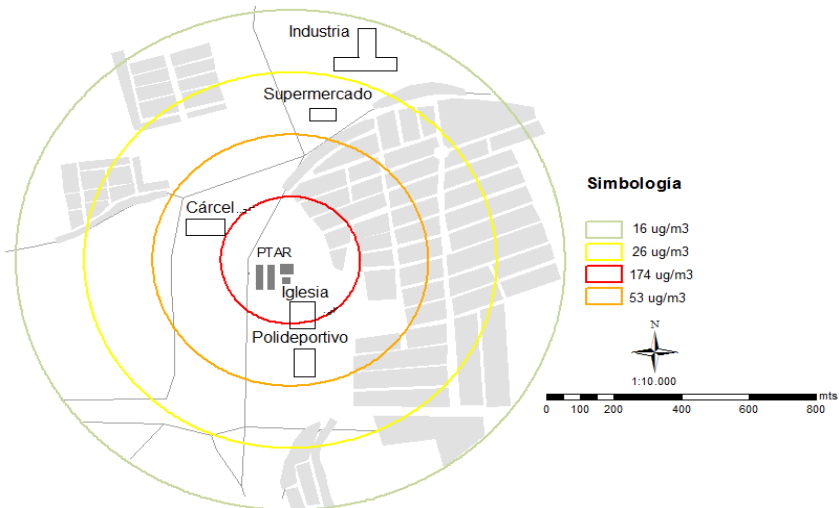
Figura 8.15. Mapa de impacto de olores para diferentes clases atmosféricas



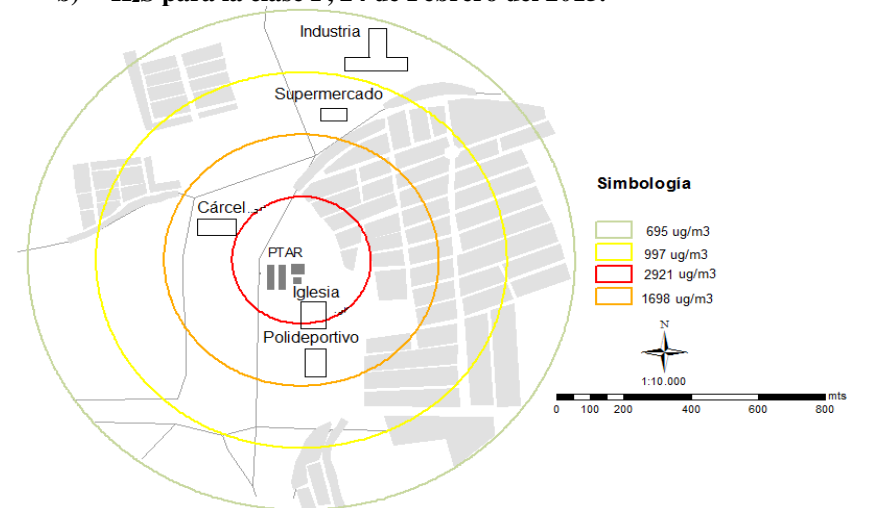
a) H₂S para la clase B, 24 de Febrero del 2015



b) H₂S para la clase F, 24 de Febrero del 2015.



c) H₂S para la clase B, 10 de Diciembre del 2014.



d) H₂S para la clase F, 10 de Diciembre del 2014.

Figura 8.16. Mapa de impacto de H₂S para diferentes clases atmosféricas

8.4 ACTIVIDAD METANOGENICA

Como parte del monitoreo planteado se realizaron dos pruebas de la actividad metanogénica del lodo proveniente de la laguna. Esta prueba es importante para ver el comportamiento de la producción de metano, la cual es donde se fundamenta en la actividad metabólica de las bacterias anaerobias presentes en el lodo, biomasa, y su eficiencia en la degradación de la materia orgánica. Los resultados de las lecturas de las mediciones a través del tiempo se presentan en las figura 8.17 y 8.18 siguientes:

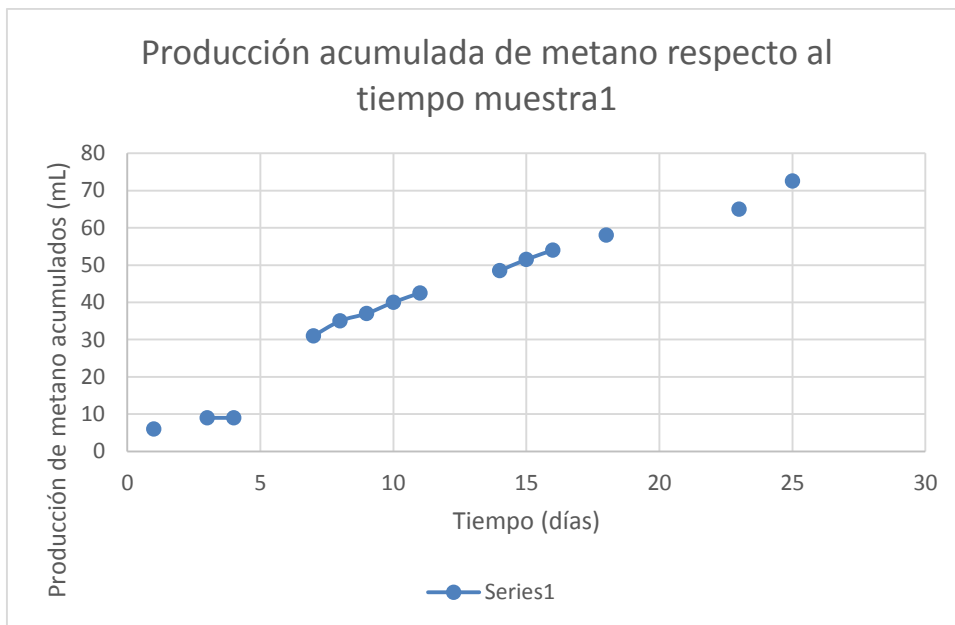


Figura 8.17. Producción de metano (prueba metanogénica muestra 1)

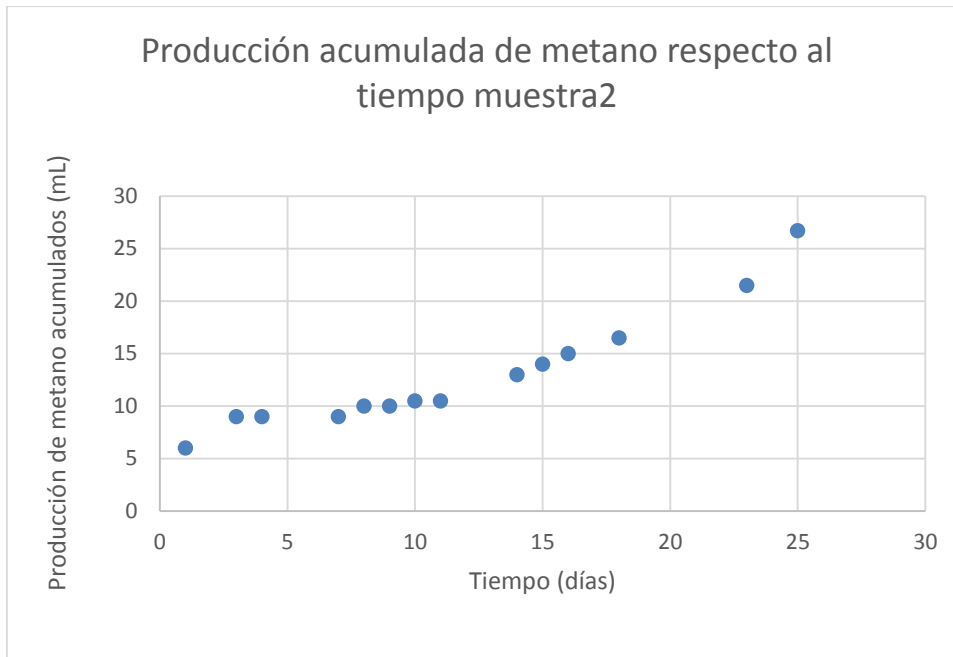


Figura 8.18. Producción de metano (prueba metanogénica muestra 2)

También se tiene que $AME = M * ((24 * 2,66) / (\text{gramos de sólidos volátiles} * 1000)) = \text{kg de metano (CH}_4\text{)} / \text{kg sólidos volátiles día}$. Se agregaron 10 g de SV según se determinó experimentalmente M (pendiente de la gráfica).

Para la muestra 1 el valor de $M=2,77$ y para la muestra 2 el valor de $M=0,86$, obteniéndose para muestra 1 un $AME=0,018$ y para la muestra 2 un $AME=0,0055$.

Con base estos resultados se observa una baja actividad metanogénica específica del lodo

8.5 BIOFILTRO

Para el proyecto se decide escoger el parámetro de H₂S para su medición, para lo cual se construyó un prototipo con dos filtros, cada uno de tubo de PVC de 10 cm de diámetro y de 1 m de altura, (ver cuadro 8,17), estableciendo tres tipos de materiales uno orgánico (residuos de madera y compost) y uno inorgánico (arena y residuos de madera) para el primer filtro, y para el segundo carbón activado, se diseñaron de tal forma que tenga un manguera o tubo de entrada de gas en la parte inferior, en la parte superior se coloca un extractor que succiona el gas y que lo obliga a pasarlo por el medio filtrante, también en la parte inferior se coloca una manguera con una llave

por goteo que humedece el medio filtrante y a la vez tiene una salida del gas ya tratado donde se conecta al medidor de gases (H₂S) para observar cómo cambia su valor. (ver figuras 8.19 y 8.20)

Cuadro 8.17. Diseño y composición del medio filtrante del Biofiltro prototipo propuesto

Lecho	Espesor (cm)	Composición	Finalidad	Elección	Materiales (cm)	Tipo	malla	Área (cm ²)	Volumen (ml)
Superficial	10 a 15	75% suelo + 25% de fertilizantes	Plantación de cobertura vegetal	10	10	Compost		95	950
Medio orgánico	30 a 50	Mezcla homogénea (20% tierra o arena + 40% compuesto orgánico + 40% mazorcas de maíz, bagazo, virutas de madera, hojas, ramas, etc.)	Para permitir el crecimiento de organismos oxidantes de amoníaco y metano, además	30	6	Arena	1,18 mm N° 16		570
					12	Compost			1140
					12	Madera			1140
Medio inorgánico	30 a 50	Mezcla homogénea (80% granito triturado, gneis y basalto clasificación de 02e03 + virutas de madera,	Habilitar el crecimiento de los organismos oxidantes de H ₂ S	30	6	madera			570
					24	piedrilla			2280
Drenante	20 a 30	Sílice Boulder con un tamaño de partícula de 3 o 4 o granito triturado, gneis o basalto en el caso de los biofiltros estructurados	Permite el drenaje del agua de riego y condensados de la línea de gas	20	20	grava			1900
Impermeable		Plástico, albañilería, hormigón, arcilla compactada, suelo-cemento (suelo + 15% de cemento + agua)	Evite las filtraciones de líquido a través del suelo						

Tiempo de contacto del aire + gas residual en la capa media apoyo biofiltro

Altura del lecho	90	cm
	0,9	m
Flujo de la bomba lambda	0,05	m ³ /min
	0,000833333	m ³ /s
15 a 25 H₂S (s)	20	s
Volumen	0,016666667	m ³
	16,66666667	litros
Área	0,018518519	m ²
	185,1851852	cm ²
Diámetro	0,005897617	
	0,076795946	m
	7,679594626	cm

4 pulgadas



Entrada de gas a filtro



Salida de gas de filtro



Material de compost



Colador entre medios filtrantes



Material de grava



Material orgánico



División de medio filtrante



Configuración de medios filtrantes

Figura 8.19. Componentes utilizados en la construcción del Biofiltro



Componentes de estructura de base



Proceso de construcción de base del filtro



Montaje de filtros en base



Montaje del filtro en el sitio

Figura 8.20. Construcción de base y montaje de Biofiltros

En la figura 8.21 se observan los primeros intentos de medición con el medidor de gases Drager, tanto en tamiz como en el tanque de lodos.



Medición inicial de gases



Aparato medidor de gases



Medición inicial del tanque de lodos



Medición de gases en el tamiz

Figura 8.21. Mediciones iniciales con aparato Dräger

9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Actualmente la planta de tratamiento no cuenta con un sistema de control de olores, se ha utilizado microorganismos eficientes (EM) pero no fue cuantificable la eficiencia en la reducción del olor ya que estos se utilizan desde el 2012, se observa que estos funcionan más para el control de moscas.
- Existe una relación directa entre el aumento del caudal y lo emisión de olores, la planta de tratamiento trabaja a caudales mayores de su valor de diseño (30%), a las 18:00 horas es la mayor emisión de olores según el uso de factores de emisión y corresponde a la hora de caudal pico.
- Para las diferentes componentes de la planta, se comprobó que en el tamiz y en el tanque de lodos el H₂S es el compuesto mayoritario en la matriz aire, mientras que en el sedimentador son los COVs. Para todas las unidades en la matriz agua los odorantes mayoritarios son COVs y el NH₃. Con respecto a los olores en el tanque de lodos es donde hay mayor concentración de olores (35355 OU/m³).
- Los mayores factores de emisión de olores, corresponden a las 12:00, 18:00 y 21:00. Para el día A las concentraciones máximas se encuentran entre 30 y 45 x 10³ OU/m³ y para el día B la concentración máxima es superior a 70 x 10³ OU/m³.
- El 76% de los encuestados indican que sí sienten los olores emitidos por la PTAR cuyo radio de influencia más intenso es de 600 m. El 57% indican que los olores son fuertes. El 83% revela que el olor al cual se les asemeja es fecal indicando presencia de compuestos nitrogenados como Indol y Escatol.
- Las franjas horarias a los cuales se sienten más los olores son: 6:00 a 9:00, 15:00 a 18:00 y 18:00 a las 21:00, en el cual el comportamiento de la atmosfera asociado a factores climáticos se encuentra entre ligeramente y modernamente inestables.
- Al comparar los resultados obtenidos por la estimación de olores el uso de factores de emisión y los resultados de la encuesta, se concluye que por ambos métodos las 18:00 es la hora la cual se perciben más los olores.
- La época lluviosa es donde la población perciben más los olores.

- Existen correlaciones entre el sexo y la percepción de los olores, ya que las mujeres tienden a percibir más los olores en comparación con los hombres, lo cual se concluye con un 95% de confianza, además por estar las mujeres con más tiempo de permanencia en la casa.
- En todas las clases de estabilidad, los olores y los odorantes se encuentran por debajo del umbral de detección, la causa principal es el bajo caudal másico obtenido debido al muestreo erróneo.
- Con el fin de analizar cualitativa y cuantitativamente la problemática por olores en las plantas de tratamiento, se deben realizar mediciones constantes en emisión de olores, realizar modelaciones de los contaminantes y evaluar la percepción comunal, para establecer las posibles repercusiones en la población
- Con base en los resultados de la prueba de producción de metano se observa una baja actividad metanogénica en el lodo de la laguna, sin embargo si esta no tiene salida de agua esta actividad puede cambiar sus valores, con el correspondiente resultado de obtener malos olores.
- A pesar de que se construyó a tiempo el prototipo, no se pudo probar ni validar, dado que el medidor de gases y los sensores para medir el H_2S no llegaron en el tiempo efectivo de la realización de este proyecto, por lo tanto no se tiene los resultados requeridos.

10. RECOMENDACIONES

- Para los muestreos en un futuro proyecto, se debe utilizar un túnel de viento para capturar los olores y odorantes, con el fin de evitar la concentración de los mismos y poder determinar el caudal másico así como obtener resultados fáciles de usar en la modelación de los mismos.
- Al ser los caudales picos una causa de la emisión de olores, se recomienda la disminución del mismo por medio del uso de aparatos de bajo consumo, educación ambiental con la comunidad y prácticas de reducción en el uso de agua.
- Con el fin de identificar y cuantificar el compuesto mayoritario y no la familia como total, se debe realizar un análisis de mercaptanos y compuestos orgánicos volátiles individuales ó azufre reducido total.
- Para futuras investigaciones es necesario incluir variables en la encuesta como hábitos de la población, tiempo de permanencia en los hogares y horas de llegada al hogar para establecer relaciones la percepción y episodios de olor.
- Involucrar más a la comunidad en lo futuro, para la realización de campañas de percepción en inmisión, ya sea utilizando encuestas y dejándolas en la diversas casas, comercios, industrias, entre otros y mediante herramientas de análisis estadístico detectar las áreas más afectadas.
- Realizar inspecciones de campo, contando con un panel de olor previamente entrenado y conformado por miembros de la comunidad con el fin de identificar odorantes cuyo umbral de detección sea bajo en condiciones reales de la zona en estudio.
- Mejorar la gestión en el manejo de los lodos extraídos del tanque, ya que las prácticas actuales a pesar de que existe proliferación de moscas, ocasionan problemas de generación de olores.
- Con el fin de contar con más información de campo es necesario tener datos meteorológicos actualizados y correspondientes a la zona de influencia, para la utilización de otros modelos de dispersión como el Calpuff que requieren datos

meteorológicos en tres dimensiones y realizar comparaciones entre los diferentes modelos para ver cual se ajusta más a la realidad de la zona de estudio.

- A nivel país de acuerdo a la investigación realizada no existe estudios con relación a la modelación de la dispersión de olores ni de la contaminación odorífica por lo tanto es importante contar con una línea de investigación para darle seguimiento a esta problemática existente en las PTARs.
- Es importante que el país inicie gestiones para contar con una legislación que controle la emisión e inmisión de compuestos odorantes y olores en PTARs así como en industrias con actividades potenciales para la generación de los mismos como lo son fábricas de alimentos para animales; planteles y establos de crianza y engorde de animales; curtiembres; fabricación de productos lácteos; pesqueras y procesamiento de productos del mar; refinerías de petróleo; rellenos sanitarios; entre otros.
- Para realizar un muestreo más eficiente de las emisiones de olor, es importante confinar las salidas de gases y olores en los componentes de la planta que evidencien más problemas de olores
- Es importante que el país inicie gestiones para contar con una legislación que controle la emisión e inmisión de compuestos odorantes y olores en PTARs así como en industrias con actividades potenciales para la generación de los mismos como lo son fábricas de alimentos para animales; planteles y establos de crianza y engorde de animales; curtiembres; fabricación de productos lácteos; pesqueras y procesamiento de productos del mar; refinerías de petróleo; rellenos sanitarios; entre otros

11. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al grupo de estudiantes asistentes de la Carrera de Ingeniería Ambiental, en especial a la Ing. Luz Sáenz Sánchez, también a los Ing Alvaro Araya y al Ing. Andres Lazo ambos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado, UEN de Recolección y Tratamiento. Subgerencia Sistemas Periféricos, por todo el apoyo como institución contraparte del proyecto y a los Ing. David Hernández e Ing. Diana Zambrano por ser parte en la realización de este proyecto.

También agradecemos al Ms.C. Fabio Carrera Chapela de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, por compartir su experiencia y conocimiento en el tema de olores en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

12. REFERENCIAS

- Amón , R. (18 de Abril de 2015). Especificaciones del muestreo de olores y odorantes PTAR del Roble de Puntarenas. San Francisco de Dos Ríos , San José, Costa Rica.
- Arriagada Monreal, A. (2008). *TECNOLOGIAS PARA EL TRATAMIENTO DE OLORES EN AGUAS SERVIDAS*. Universidad de Chile.
- Arana, P. (2010). *Biofiltro Edificio de Tamices de la E.D.A.R de Arazuri: Estudio y propuesta de mejoras*. Universidad Pública de Navarra.
- Arshak, K., Moore, E., Lyons, G. M., Harris, J., & Clifford, S. (2004). A review of gas sensors employed in electronic nose applications. *Sensor Review*, 24(2), 181–198. doi:10.1108/02602280410525977
- Arzate Echeverría, C. I. (2004). *Realización de software educativo para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos*. Universidad de las Américas Puebla. Retrieved from http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/arzate_e_ci/capitulo5.pdf
- Barclay, J., Diaz, C., & Cartelle, D. (2014). Revision of Regulatory Dispersion Models, an Important Key in Environmental Odour Management. In C. Diaz (Ed.), (Vol. 3). Santiago de Chile. Retrieved from http://www.olores.org/index.php?option=com_content&view=article&id=359&lang=es
- Barrera Curihuentro, M. (2010). *APLICACIÓN DEL MODELO ISC- AERMOD PARA LA ESTIMACIÓN DE DISPERSIÓN DE OLORES. CASO ESTUDIO: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS LA FARFANA*. Universidad de Chile, Santiago.
- Bolaños Retana, A., Dall´Anesse Ruíz, E., & Marín Vargas, F. (2010). Derecho Ambiental: Contaminación por olores en Costa Rica y el derecho a un ambiente sano. Retrieved from <http://secretaria-general-uci.blogspot.com/2010/01/derecho-ambiental-contaminacion-por.html>
- Brandt, R. (2011). *FIELD OLFACTOMETRY ODOR MEASUREMENT*. Pensilvania.
- Burgess, J. E., Parsons, S. a., & Stuetz, R. M. (2001). Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: A review. *Biotechnology Advances*, 19(1), 35–63. doi:10.1016/S0734-9750(00)00058-6
- Busini, V., Capelli, L., Sironi, S., Nano, G., Rossi, N., & Bonati, S. (2012). Comparison of CALPUFF and AERMOD Models for Odour Dispersion Simulation, 30, 205–210.

- Calidad del aire. (10 de Febrero de 2015). *Ayuntamiento de Madrid*. Obtenido de <http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/ContaAtmosferica/portadilla.html>
- Capelli, L., Sironi, S., & Del Rosso, R. (2013). Odor sampling: techniques and strategies for the estimation of odor emission rates from different source types. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 13(1), 938–55. doi:10.3390/s130100938
- Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., & Céntola, P. (2009). Predicting odour emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors. *Water Research*, 43(7), 1977–85. doi:10.1016/j.watres.2009.01.022
- Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., Céntola, P., Rossi, A., & Austeri, C. (2011). Olfactometric approach for the evaluation of citizens' exposure to industrial emissions in the city of Terni, Italy. *The Science of the Total Environment*, 409(3), 595–603. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.10.054
- Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., & Guillot, J.-M. (2013). Measuring odours in the environment vs. dispersion modelling: A review. *Atmospheric Environment*, 79, 731–743. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.07.029
- Cárdenas, B., & Revah, S. (2003). *Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas*. (I. N. Ecología, Ed.) Mexico.
- Carrera-Chapela, F., Donoso-Bravo, A., Souto, J. a., & Ruiz-Filippi, G. (2014). Modeling the Odor Generation in WWTP: An Integrated Approach Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(6), 1932. doi:10.1007/s11270-014-1932-y
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua . (15 de Abril de 2015). *Universidad de Salamanca*. Obtenido de Aula Virtual: http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/Demos/Simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s6.htm#Anchor4
- Chapela, F. C. (Pontificia U. C. de V. (2013). *Generación y modelación de olores en PTAS*. Valparaíso.
- Definición abc. (15 de 3 de 2015). *Definición abc*. Obtenido de Definición de Adaptación Sensorial: <http://www.definicionabc.com/salud/adaptacion-sensorial.php>

- Devinny, J. (1999). *Biofiltration for air pollution control*. (C. Press, Ed.)
- Dincer, F., & Muezzinoglu, A. (2007). Odor Determination at Wastewater Collection Systems: Olfactometry versus H₂S Analyses. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 35(6), 565–570. doi:10.1002/clen.200700057
- División de Calidad del Aire, Ministerio del Medio Ambiente. (Setiembre de 2013). *Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile*. Obtenido de http://www.sinia.cl/1292/articles-55384_EstrategiaGestionOlores2014_2017_final.pdf
- EPA. (1997). Preferred and a Lternative Methods for Estimating Air Emissions From Wastewater Collection and Treatment, II, 5.B.26–5.B.31.
- EPA. (15 de Marzo de 2015). *U.S Enviromental Protection Agency*. Obtenido de Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
- Etcharen, P. (2005). *Diseño de un sistema de biofiltración para la eliminación de olores en la fábrica Lubascher y Krause*. Universidad Católica de Temuco, Facultad de Ingeniería.
- Fallas, F. R. (2012). “ Gestión de la s Excretas y Aguas Residuales en Costa Rica ” Situación Actual y Perspectiva. San José: Foro Centroamericano y Republica Dominicana de Agua Potable y Saneamiento.
- Fuentes Vivanco, W. (12 de Junio de 2014). Obtenido de Caracterización de Aguas Residuales: <http://es.slideshare.net/Casskiss/caracterizacion-de-aguas-residuales>
- Gestión de la calidad del Aire. (15 de Abril de 2015). Obtenido de Transporte y Dispersión deContaminantes: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/gestion_calidad/Cap07.pdf
- Gil, M. (2013). Productos y opciones para reducción de malos olores en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. (C. personal, Entrevistador)
- Gostelow, P., Parsons, S. A., & Stuetz, R. M. (2001). REVIEW PAPER ODOUR MEASUREMENTS FOR SEWAGE TREATMENT, 35(3), 579–597.

- Guarriello, N. S. (2009). *DETERMINING EMISSIONS FROM LANDFILLS AND CREATING ODOR BUFFER DISTANCES*. University of Central Florida. Retrieved from http://etd.fcla.edu/CF/CFE0002527/Guarriello_Nicholas_S_200905_MS.pdf
- Haddad, R., Medhanie, A., Roth, Y., Harel, D., & Sobel, N. (2010). Predicting odor pleasantness with an electronic nose. *PLoS Computational Biology*, 6(4), e1000740. doi:10.1371/journal.pcbi.1000740
- Henry, J., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental* (2 ed.). Mexico: Pearson Education.
- Herrera Murillo, J. (2014). *FUNDAMENTOS DE METEOROLOGIA APLICADOS A LA CONTAMINACION DEL AIRE*. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica. Retrieved from http://www.edeca.una.ac.cr/files/presentacion_meteorologia_y_calidad_del_aire.pdf
- Hudon, G., Guy, C., & Hermia, J. (2000). Measurement of Odor Intensity by an Electronic Nose. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(10), 1750–1758. doi:10.1080/10473289.2000.10464202
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático . (15 de Abril de 2015). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático* . Obtenido de Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental : http://sinaica.inecc.gob.mx/rosa_de_viento.html
- Körner, I. (2008). *Aerobic and anaerobic waste treatment:emissions from composting*. Hamburg University of Technology.
- Kreuk, M. (2013). CTB3365x Introduction to Water Treatment. *Biological Treatment*. Paisajes Bajos. Retrieved from https://courses.edx.org/courses/DelftX/CTB3365x/2013_Fall/courseware/4f76e0aec3b54abca0533dc488fbbdbe/c4c2adfb41b44516b3c3f986c176d49e/
- Lastarria, J. (2013). *ESTUDIO: ANTECEDENTES PARA LA REGULACIÓN DE OLORES EN CHILE*. Santiago de Chile: Subsecretaria del medio ambiente. Retrieved from http://www.sinia.cl/1292/articles-55386_InformeFinal2013ECOTEC.pdf
- Latos, M., Karageorgos, P., Kalogerakis, N., & Lazaridis, M. (2010a). Dispersion of Odorous Gaseous Compounds Emitted from Wastewater Treatment Plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1-4), 667–677. doi:10.1007/s11270-010-0508-8
- Latos, M., Karageorgos, P., Kalogerakis, N., & Lazaridis, M. (2010b). Dispersion of Odorous Gaseous Compounds Emitted from Wastewater Treatment Plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1-4), 667–677. doi:10.1007/s11270-010-0508-8

- Lazo, A. (2012). *Evaluación Operativa y Oportunidades de Mejora Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Roble de Puntarenas*. San José.
- Lebrero, R., Bouchy, L., Stuetz, R., & Muñoz, R. (2011). Odor Assessment and Management in Wastewater Treatment Plants: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(10), 915–950. doi:10.1080/10643380903300000
- Lebrero, R., & Rodríguez, E. (2011). *A comparative assessment of biofiltration and activated sludge diffusion for odour abatement*. Obtenido de <http://www.elsevier.com/locate/jhazma>
- Lehtinen, J., & Veijanen, A. (2010). Odour Monitoring by Combined TD–GC–MS–Sniff Technique and Dynamic Olfactometry at the Wastewater Treatment Plant of Low H₂S Concentration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 218(1-4), 185–196. doi:10.1007/s11270-010-0634-3
- Madriz Medeiros, D. (2011). *Investigación sobre la eliminación de olores en depuradoras*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Metcalf, & Eddy. (2004). *Wastewater engineering treatment and reuse*. United States: MacGraw Hill.
- Morgan Sagastume, J. M., Revah Moiseev, S., & Noyola Robles, A. (2000). Malos olores en plantas de tratamiento de aguas residuales: su control a través de procesos biotecnológicos. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/impactos/mexicona/R-0032.pdf>
- Muñoz, R., Sivret, E. C., Parcsi, G., Lebrero, R., Wang, X., Suffet, I. H. M., & Stuetz, R. M. (2010). Monitoring techniques for odour abatement assessment. *Water Research*, 44(18), 5129–49. doi:10.1016/j.watres.2010.06.013
- Nacional, I. M. (2014, April). Solicitud de datos meteorológicos. Estación 78027. San José. doi:10.1007/s10973-006-3070-2
- NarjouxAdeline. (2007). Metrology of odors – Olfactometry vs chemical analysis. Retrieved from http://www.odotech.com/pdf/misc/Odotech_TechnicalNote_chimicalvsolfacto.pdf
- NOAA. (3 de Febrero de 2015). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Obtenido de Introducción a las nubes : http://www.nws.noaa.gov/om/brochures/Cloudchart_ESP.pdf
- OMI, I. (2013). *Ecosorb odor control products*. Obtenido de <http://www.odormanagement.com>

- Omri, I., Aouidi, F., Bouallagui, H., Godon, J. J., & Hamdi, M. (2013). Performance study of biofilter developed to treat H₂S from wastewater odour. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 20(2), 169–176. doi:10.1016/j.sjbs.2013.01.005
- Rodríguez, J. (30 de Abril de 2015). *Ingeniero Ambiental*. Obtenido de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales:
<http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- Sancha, A. (2004). COMPORTAMIENTO DE CONTAMINANTES EN MEDIO ACUATICO. Retrieved from http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HVij4aN00QAJ:https://www.u-cursos.cl/diplomados/2004/2/DMA24/1/material_docente/bajar?id_material=41637+&cd=2&hl=es&ct=clnk
- Sánchez, E. (2002). Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales En America Latina: Realidad y Potencial. San José. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/proyecto/generales/casos/puntarenas.pdf>
- Saña, J. (2010). *Jornada sobre tratamiento del aire en instalaciones de compostaje*. (M. d. Panplona, Ed.) España.
- Shareefdeen, Z. (2005). *Biotechnology for odor and pollution control*. Springer.
- Sironi, S., Capelli, L., Céntola, P., Del Rosso, R., & Pierucci, S. (2010). Odour impact assessment by means of dynamic olfactometry, dispersion modelling and social participation. *Atmospheric Environment*, 44(3), 354–360. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.10.029
- Souto, J. (2011). Dispersión atmosférica. *Dispersión Atmosférica*. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Stellacci, P., Liberti, L., Notarnicola, M., & Haas, C. N. (2010). Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants. *Desalination*, 253(1-3), 51–56. doi:10.1016/j.desal.2009.11.034
- Stuetz, R., & Frechen, F.-B. (2001). *Odours in Wastewater Treatment*. London: IWA.
- Torres S., A. G., Úbeda S., Y., Calvet S., S., & López J., P. A. (2008). Guía técnica para la gestión de las emisiones odoríferas generadas por las explotaciones ganaderas intensivas. *Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo Y Vivienda. Universidad Politécnica de Valencia*.

- Ugalde Castillo, G. (10 de Marzo de 2015). Solicitud de denuncias por problemas de olores en la PTAR del Roble de Puntarenas. Barranca, Puntarenas, Costa Rica.
- USEPA. (25 de Octubre de 2014). *U.S Environmental Protection Agency*. Obtenido de Preferred/Recommended Models: http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm
- Valencia, J., Espinosa, A., Parra, A., & Peña, M. (2011). Percepción del riesgo por emisiones atmosféricas provenientes de la disposición final de residuos sólidos. *Rev. Salud ...*, 13(6), 930–941. Retrieved from <http://www.scielosp.org/pdf/rsap/v13n6/v13n6a06.pdf>
- Vergara, H., & Zorich, V. (2013). Experiencias en la aplicación de la Normativa Alemana VDI 3880:2011, en muestreos de olores en Chile. Santiago de Chile. Retrieved from http://www.olores.org/index.php?option=com_content&view=article&id=276&lang=es
- Vieira de Melo, A. M., Santos, J. M., Mavroidis, I., & Reis Junior, N. C. (2012a). Modelling of odour dispersion around a pig farm building complex using AERMOD and CALPUFF. Comparison with wind tunnel results. *Building and Environment*, 56, 8–20. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.017
- Vieira de Melo, A. M., Santos, J. M., Mavroidis, I., & Reis Junior, N. C. (2012b). Modelling of odour dispersion around a pig farm building complex using AERMOD and CALPUFF. Comparison with wind tunnel results. *Building and Environment*, 56, 8–20. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.017
- Ziya Öztürk, Z., Tasaltin, C., Engin, G. Ö., Gürek, A. G., Atilla, D., Ahsen, V., & Ince, M. (2009). Evaluation of a fast wastewater odour characterisation procedure using a chemical sensor array. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151, 369–375. doi:10.1007/s10661-008-0278-6

13. APÉNDICES

APÉNDICE 1: TIEMPO DE RETENCIÓN EN LAS UNIDADES

Para la determinación del tiempo de retención se utilizaron los valores de caudales diarios de la PTAR del 20 al 27 de Agosto del 2014 (Cuadro A.2.2), para las lagunas y el tanque de lodos se utiliza el caudal de purga el cual es de 12 l/s.

$$tr (h) = \frac{\text{volumen del reactor } m^3}{\text{caudal de entrada } \frac{m^3}{h}}$$

Ejemplo de calculo para los sedimentadores primarios

$$tr (h) = \frac{609 \frac{m^3}{h}}{253 \frac{m^3}{h}} = 2.4$$

Cuadro A.1.1 Tiempos de retención de diferentes unidades de la PTAR adaptado de Lazo (2012)

Unidad	Dimensiones			Área superficial	Volumen	TR he	
	Largo m	Ancho m	Profundidad m	m ²	m ³	Real	Teórico
Sedimentadores primarios	19.4 ¹	5.8 ¹	4.3 ¹	209 ²	690 ²	2.4	1.5 a 2.5 ¹
Tanque de aireación	24 ¹	5.8 ¹	3.25 ¹	278 ²	905 ²	3,6	6 a 8 ¹
Sedimentadores secundarios	8 ³	3 ³	4.3 ³	290 ²	965	3.8	1.5 a 2.5 ¹
Lagunas	78 ¹	27 ¹	1.75 ¹	2106	3686	86	≥72 ¹
Tamiz	2.3	1.9	2.04	4.37	8.91	0.03	
Tanque de lodos	7.5	5.2	2.1	39	82	1.9	

1 para cada módulo 2 los dos módulos 3 cada tolva de sedimentación

Cuadro A.1.2 Caudal diario de la PTAR del 20 al 27 de Agosto del 2014.

Caudal l/s	Promedio diario l/s	Máximo l/s	Mínimo l/s
20/8/2014	77.6	233.7	0.2
21/8/2014	70.8	189.3	0
22/8/2014	73.5	220.8	0.1
23/8/2014	68.6	210.6	0.0
24/8/2014	58.2	154.9	0.0
25/8/2014	72.3	236.6	0.0
26/8/2014	72.4	187.6	0.1
27/8/2014	68.0	213.8	0.0
Promedio l/s	70.2	206.0	0.05
Promedio m ³ /h	253	742	0.18

APÉNDICE 2: PERCEPCIÓN DE UNIDADES

Encuesta de percepción de unidad generadora de olor

Nombre completo: _____

Descripción: La presente encuesta busca conocer la percepción de la unidad generadora de más olor en la PTAR de El Roble de Puntarenas.

Instrucciones: Enumerar del número uno al siete de acuerdo a la unidad en la cual usted percibe menos los olores, donde uno es la unidad que genera menos olor.

Cuadro A.1 Clasificación de unidades de acuerdo a la percepción humana.

Unidad	Numeración	Posible causa
Cámara de entrada		
Tamiz		
Sedimentadores primarios		
Tanques de aireación		
Sedimentadores secundarios		
Lagunas		
Tanque de lodos		

APÉNDICE 3: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Cuadro A.3.1 Descripción de las unidades de la PTAR

Unidad	Figura	Descripción
Cámara de entrada	 <p data-bbox="451 676 824 701">Figura A.3.0.1 Cámara de entrada</p>	<p data-bbox="878 457 1382 569">Es el punto de unión de las aguas procedentes de las estaciones de bombeo, no brinda amortiguamiento de caudal. La unidad es abierta a la atmósfera como se muestra en la figura A.3.1</p>
Tamiz Hidrodinámico	 <p data-bbox="440 1348 841 1373">Figura A.3.2 Tamiz Hidrodinámico</p>	<p data-bbox="878 709 1382 848">Esta unidad se encarga de retirar los sólidos gruesos (> 5cm) y medianos (>2.5 cm), no se cuenta con sistema de tratamiento de olores y las unidades son abiertas a la atmósfera lo cual se evidencia en la figura A.3.2.</p> <p data-bbox="878 854 1382 993">Los residuos son almacenados en un recipiente y luego son dispuestos en un terreno aledaño a la PTAR sin ningún tratamiento previo, lo cual favorece a la generación de olores y la presencia de roedores.</p> <p data-bbox="878 999 1382 1138">Según Arriagada (2008) los residuos recolectados durante el tratamiento primario emiten olores debido al contenido de MO y al agua que provocan la descomposición de los mismos (Arriagada Monreal, 2008)</p>
Sedimentadores primarios	 <p data-bbox="428 1690 850 1715">Figura A.3.3 Sedimentador primario</p>	<p data-bbox="878 1381 1382 1520">Son dos módulos que trabajan en paralelo, los lodos primarios son impulsados hasta un tanque de lodos, la unidad es abierta a la atmósfera y no cuenta con algún sistema de tratamiento de olores (figura A.3.3).</p>

Continuación del cuadro A.3.1

Unidad	Figura	Descripción
Tanque de lodos		<p>Es un tanque cerrado y aquí se da la aplicación del producto EM (Microorganismos eficientes) esta es la alternativa utilizada por el AYA desde 2012 para mitigar los olores y para la proliferación de vectores, es aplicado una vez a la semana en la matriz agua como se observa en la figura A.3.4, este producto es un acelerador en la fermentación de la MO mediante un conjunto de bacterias lácticas (<i>Lactobacillus spp.</i>), bacterias fototróficas (<i>Rhodospseudomonas spp.</i>) y Levaduras (<i>Saccharomycetes spp.</i>) (EMPROTEC, 2014)</p>
Reactor biológico aerobio		<p>Es un sistema de lodos activados de aireación extendida, ésta compuesto por dos unidades en paralelo, el suministro de aire se da mediante discos difusores (96 en cada unidad), se da el retorno de lodos a dicha unidad. Como se muestra en la figura A.3.5 las unidades son abiertas a la atmósfera y no se cuenta con un sistema de tratamiento de olores.</p>
Sedimentadores secundarios		<p>Son dos módulos que trabajan en paralelo, se encargan de sedimentar los sólidos biológicos formados en el reactor. No se cuenta con tratamiento de olores (figura A.3.6). Los lodos secundarios son enviados a las lagunas para su tratamiento.</p>

Figura A.3.4 Aplicación del EM en el tanque de lodos primarios.

Figura A3.3 Tanques de aireación

Figura A 3.4 Sedimentadores secundarios

Continuación del cuadro A.3.1




Unidad	Figura	Descripción
Lagunas de lodos		<p>Se cuenta con dos lagunas de estabilización para el tratamiento de lodos, una funciona como laguna facultativa y la otra como lecho de secado, el efluente de estas unidades es recirculado al sedimentador primario. Los lodos son removidos dos veces al año con un cargador retroscavador y son dispuestos en un terreno aledaño a la PTAR. El efluente de esta unidad es recirculado hasta los sedimentadores primarios según Arriaga (2008), esta práctica aumenta la emisión de olores desde el clarificador ya que la biomasa activa causa un rápido decaimiento del oxígeno disuelto con la adicional generación de sulfuro No hay tratamiento de olores y las unidades son abiertas a la atmósfera (figura A.3.7).</p>
		
		

Figura A.3.5 Tratamiento de lodos

Cuadro A.3.2 Composición promedio en (mg/l) del agua residual de la PTAR del año 2007 al 2013.

Parámetro	Entrada	Salida	% Eficiencia
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	488± 128	142± 94	71
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO)	270± 79	48± 34	82
Nitrógeno Orgánico	13±7	7±5	46
N-NH ₃	27± 12	17± 14	38
Nitrógeno Total	39± 17	24± 18	39
Fósforo	7± 5	3± 2	51
TSS	180± 46	53± 31	70

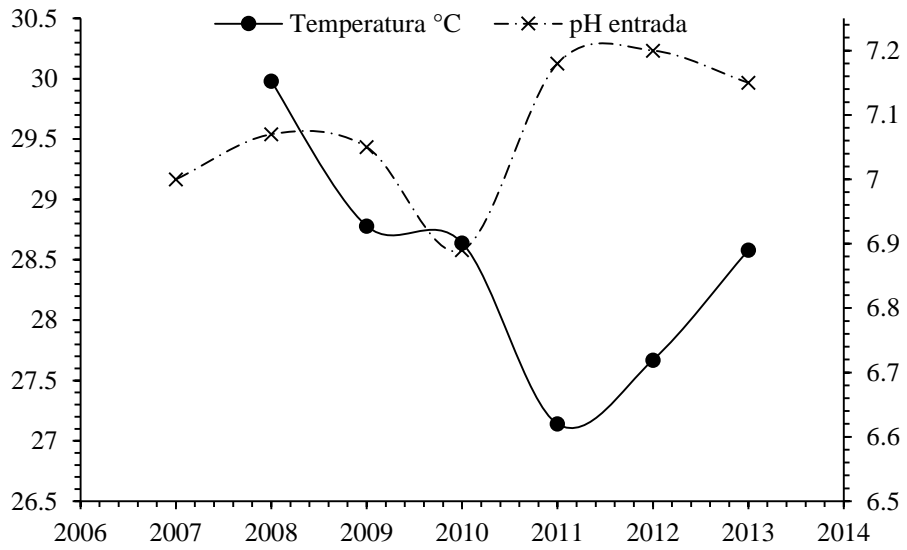


Figura A.3.6 Valores históricos de pH en el influente y temperatura en °C

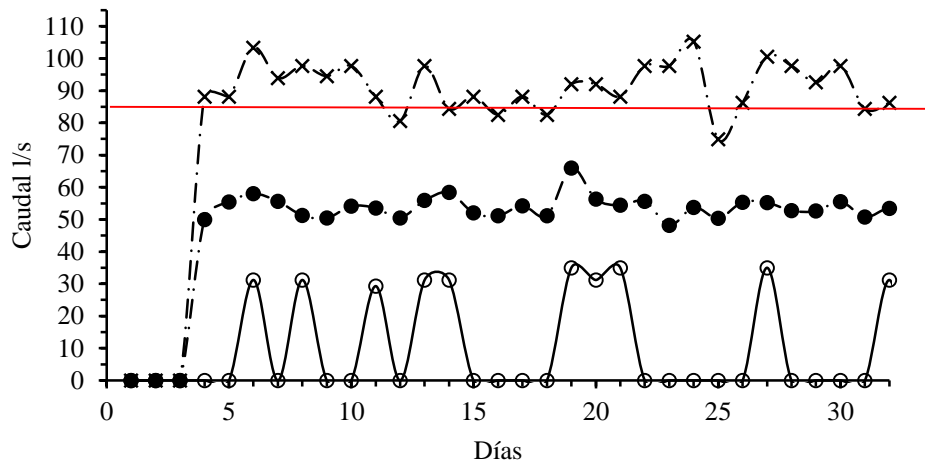


Figura A. 3.7 Valores de caudal para enero 2013

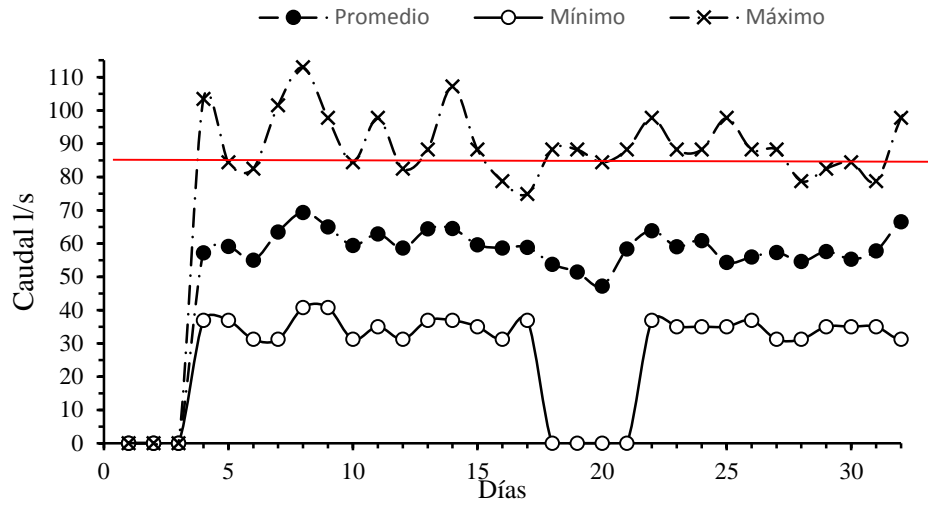


Figura A.3.8 Valores de caudal (l/s) para Junio 2013

APÉNDICE 4: PUNTOS DE MUESTREO



P1: Tamiz

P2: Salida sedimentador

P3: Entrada a la laguna

Primario

Figura A.4.1 Puntos de muestreo

APÉNDICE 5: ENCUESTA DE PERCEPCIÓN DE OLORES

Encuesta de percepción de olores en la Planta de Tratamiento de El Roble de Puntarenas

Fecha de aplicación de la encuesta: _____ **Nomenclatura:** _____
Femenino () **Edad:** _____
Masculino () **Tiempo de vivir en el Roble:** _____
Distancia a la PTAR del el Roble: _____

Descripción: La presente encuesta busca conocer la percepción de la población de El Roble de Puntarenas sobre la temática de malos olores provenientes del sistema de tratamiento de aguas residuales.

1) **¿Siente usted los olores provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales?**

a. Si b. No c. No se

Si su respuesta es positiva continuar con la pregunta 2, si es negativa o no se fin de la encuesta.

2) **Los olores provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales son:**

a. Muy Fuertes b. Fuertes c. Débiles

3) **A que olor se le asemejan: (respuesta múltiple)**

a. Huevo podrido b. Vegetales podridos c. Pescado podrido
d. Fecal e. Picante/Irritante f. Ajo
g. Ninguno de los anteriores h. Otros: _____

4) **¿A qué hora ha percibido más los olores?**

a. 0:00-3:00 am b. 3:00-6:00 am c. 6:00-9:00 am d. 9:00-12:00 pm
e. 12:00-3:00 pm f. 3:00-6:00 pm g. 6:00-9:00 pm h. 9:00-11:00 pm

5) **¿Cuándo son más fuertes los olores?**

a. Invierno b. Verano

APÉNDICE 6: CUANTIFICACION DE CASAS A ENCUESTAR POR SECTOR

Cuadro A.6.1 Cuantificación de casas a encuestar por sector

Sector	Conteo de casas	Wi	Número de casas a muestrear por sector
A	12	0.01	2
B	15	0.01	2
C	21	0.01	3
D	37	0.02	6
E	51	0.03	8
F	37	0.02	6
G	38	0.02	6
H	15	0.01	2
I	24	0.01	4
J	25	0.01	4
K	21	0.01	3
L	20	0.01	3
M	43	0.02	7
N	28	0.01	4
O	26	0.01	4
P	32	0.02	5
Q	26	0.01	4
R	13	0.01	2
S	26	0.01	4
T	15	0.01	2
U	26	0.01	4
V	41	0.02	7
W	44	0.02	7
X	45	0.02	7
Y	34	0.02	5
Z	25	0.01	4
AA	26	0.01	4
AB	35	0.02	6
AC	54	0.03	9
AD	54	0.03	9
AE	33	0.02	5
AF	8	0.00	1
AG	34	0.02	5
AH	25	0.01	4
AI	41	0.02	7
AJ	34	0.02	5
AK	29	0.01	5
AL	35	0.02	6
AM	62	0.03	10
AN	54	0.03	9
AO	33	0.02	5
AP	37	0.02	6

Continuacion del cuadro A.6.1

Sector	Conteo de casas	Wi	Número de casas a muestrear por sector
AQ	77	0.04	12
AR	50	0.02	8
AS	59	0.03	9
AT	18	0.01	3
AU	41	0.02	7
AV	43	0.02	7
AW	36	0.02	6
AX	13	0.01	2
AY	17	0.01	3
AZ	18	0.01	3
BA	12	0.01	2
BB	21	0.01	3
BC	21	0.01	3
BD	11	0.01	2
BE	8	0.00	1
BF	8	0.00	1
BG	14	0.01	2
BH	7	0.00	1
BI	26	0.01	4
BJ	12	0.01	2
BK	17	0.01	3
BL	24	0.01	4
BM	18	0.01	3
BN	17	0.01	3
BO	20	0.01	3
BP	3	0.00	0
BQ	10	0.00	2
BR	23	0.01	4
BS	27	0.01	4
BT	9	0.00	1
TOTAL	2014	1.00	323

APÉNDICE 7: DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL PARA LAS DIFERENTES ESTABILIDADES

Cuadro A.7.1 Desviación estándar para la concentración horizontal y vertical, para las diferentes estabilidades

Estabilidad Distancia X (m)	A		B		C		D		E		F	
	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z	σ_y	σ_z
10	3,25132206	3,33260511 6	2,607969456	2,390638668	2,60796946	2,17330788	1,92819068	1,32563109	1,70357671	0,8792654	1,58987029	0,3077168
100	26,4277379	27,0884313 7	18,89306857	17,31864619	18,8930686	15,7442238	11,6184978	7,9877172	9,36185033	4,83192275	8,15383077	1,5781608
200	49,658922	50,9003950 2	34,29164326	31,43400632	34,2916433	28,5763694	19,9504812	13,7159558	15,6359362	8,07016064	13,33807	2,5815619
300	71,819162	73,6146410 1	48,59893809	44,54902658	48,5989381	40,4991151	27,3718756	18,8181645	21,1072387	10,8940587	17,7876176	3,4427647
400	93,3113738	95,6441581 3	62,24064625	57,05392573	62,2406462	51,8672052	34,2575872	23,5520912	26,1147629	13,4785873	21,8184697	4,2229296
500	114,320126	117,178129 4	75,40787535	69,12388573	75,4078753	62,8398961	40,7705511	28,0297539	30,8034597	15,8985598	25,5640935	4,9478890
600	134,951473	138,325259 8	88,20893449	80,85818995	88,2089345	73,5074454	47,0010926	32,3132512	35,2528002	18,1949936	29,0970581	5,6316886
700	155,274167	159,156021 1	100,7132974	92,32052261	100,713297	83,9277478	53,006173	36,4417439	39,5124759	20,3935359	32,4624506	6,2830549
800	175,336317	179,719724 8	112,9691574	103,555061	112,969157	94,1409645	58,8247606	40,4420229	43,6162461	22,5116109	35,6907426	6,9078856
900	195,173421	200,052756 7	125,0118145	114,5941633	125,011815	104,176512	64,4850641	44,3334815	47,5884052	24,5617575	38,8037659	7,5104063
800	175,336317	179,719724 8	112,9691574	103,555061	112,969157	94,1409645	58,8247606	40,4420229	43,6162461	22,5116109	35,6907426	6,9078856
900	195,173421	200,052756 7	125,0118145	114,5941633	125,011815	104,176512	64,4850641	44,3334815	47,5884052	24,5617575	38,8037659	7,5104063
1000	214,812719	220,183036 5	136,8681827	125,4625008	136,868183	114,056819	70,008372	48,1307557	51,4471941	26,5533905	41,8178494	8,0937773
1100	234,275749	240,132642 6	148,5594251	136,179473	148,559425	123,799521	75,4112731	51,8452503	55,2067627	28,493813	44,7456169	8,6604419
1200	253,579958	259,919456 7	160,1025954	146,7607125	160,102595	133,41883	80,7070271	55,4860812	58,8783751	30,3888388	47,5970875	9,2123395
1300	272,739752	279,558246 2	171,5117127	157,21907	171,511713	142,926427	85,9064541	59,0606872	62,4711894	32,2431945	50,3803841	9,7510420
1400	291,767224	299,061404 9	182,7984932	167,5652854	182,798493	152,332078	91,0185361	62,5752436	65,9927825	34,060791	53,1022104	10,277847

Apéndice 9. Flujo de succión Cuadro A.9.1 Cuantificación de casas a encuestar por sector.

Punto de muestreo	Sedimentador	Tanque de lodos	Tamiz
Flujo de succión ml/min	78	63	73
Flujo de succión m ³ /s	0,0000013	0,00000105	1,21667E-06

APÉNDICE 10: ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

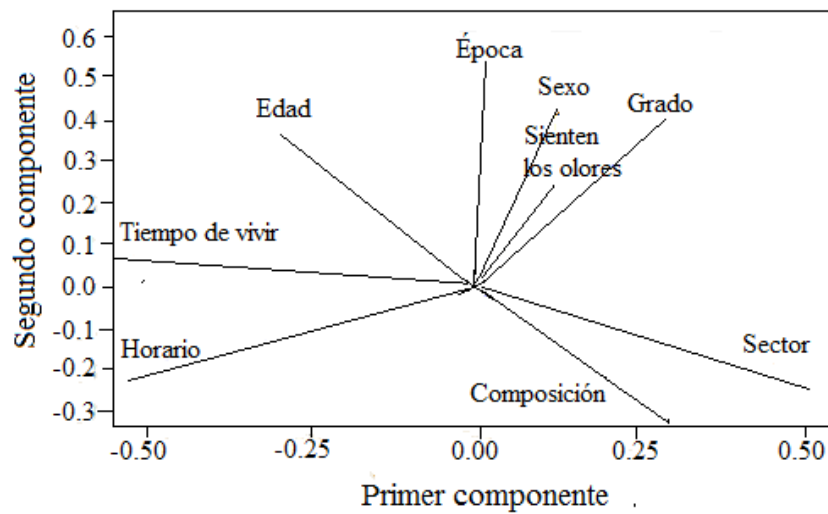


Figura A.10.1 Análisis del componente principal.

APÉNDICE 11: PRUEBA DE CONTRASTE DE HIPÓTESIS ENTRE PROPORCIONES

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis nula: proporción de mujeres (P_M) que siente los olores es igual a la proporción de hombres (P_H) que sienten los olores $H_0: P_M = P_H$
- Hipótesis alternativa: proporción de mujeres que siente los olores es diferente a la proporción de hombres que sienten los olores $H_1: P_M \neq P_H$

	Mujer	Hombre	Observado
P	0,5	0,24	0,26
X (Cantidad de mujeres y hombres que sienten los olores)	87	20	
N (cantidad de mujeres y hombres)	174	82	

$$\hat{p} = \frac{X_M + X_H}{N_M + N_H}$$

$$\hat{p} = \frac{87 + 20}{174 + 82} = \frac{107}{256} = 0,418 \text{ (éxito)}$$

$$\hat{q} = 1 - 0,418 = 0,582 \text{ (fracaso)}$$

$$-1,96 = \frac{d_{c2}}{\sqrt{\frac{\hat{p} \times \hat{q}}{N_M} + \frac{\hat{p} \times \hat{q}}{N_H}}}$$

$$d_{c2} = \frac{-1,96}{\sqrt{\frac{0,418 \times 0,582}{174} + \frac{0,418 \times 0,582}{82}}} = -0,1294$$

$$d_{c1} = \frac{1,96}{\sqrt{\frac{0,418 \times 0,582}{174} + \frac{0,418 \times 0,582}{82}}} = 0,1294$$

$$\text{Intervalo de aceptación} = [-0,1294, 0,1294]$$

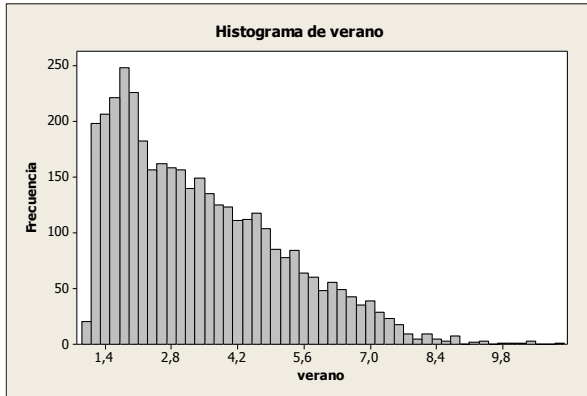
Como observado (0,26) se encuentra fuera del intervalo de aceptación se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alternativa con un 95% de confianza.

Existe diferencia significativa entre los secos para sentir los olores estos se afirma a un 95% de confianza.

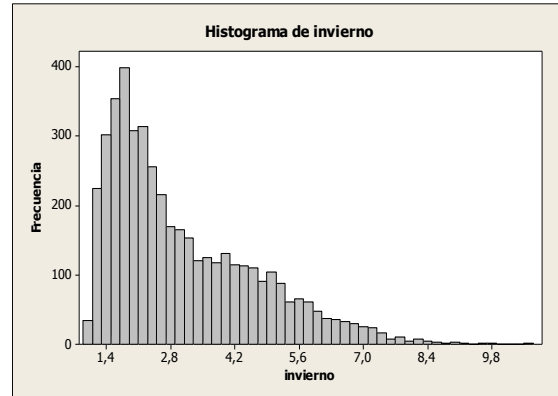
APÉNDICE 12: PRUEBA DE HIPOTESIS PARA VELOCIDAD Y DIRRECCION DEL VIENTO.

Velocidad del viento

Normalidad de los datos



Verano



Invierno

Planteamiento de hipótesis:

$$H_0: Velocidad_{invierno} = Velocidad_{verano}$$

$$H_1: Velocidad_{invierno} \neq Velocidad_{verano}$$

Prueba de Mann-Whitney e IC: verano. invierno

N Mediana

verano 3811 3,0000

invierno 4484 2,5000

La estimación del punto para ETA1-ETA2 es 0,3000

95,0 El porcentaje IC para ETA1-ETA2 es (0,2000,0,4000)

W = 16814969,5

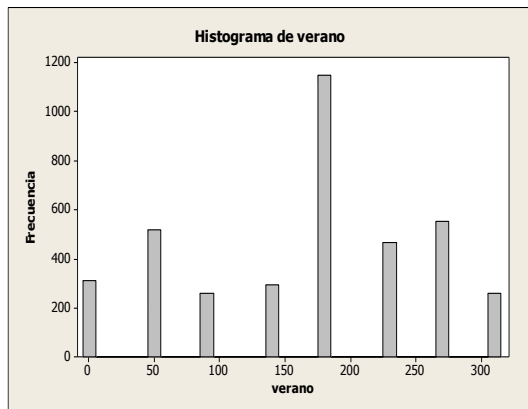
Prueba de ETA1 = ETA2 vs. ETA1 no es = ETA2 es significativa en 0,0000

La prueba es significativa en 0,0000 (ajustado por empates)

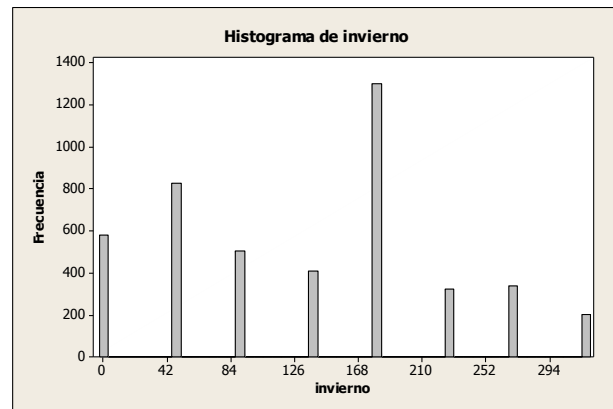
Conclusión: $p < 0.05$ se acepta la hipótesis alternativa, existe diferencias entre los datos de velocidad del viento en invierno y verano

Dirección del viento

Normalidad de los datos



Verano



Invierno

Planteamiento de hipótesis:

$$H_0: \text{Dirección}_{\text{invierno}} = \text{Dirección}_{\text{verano}}$$

$$H_1: \text{Dirección}_{\text{invierno}} \neq \text{Dirección}_{\text{verano}}$$

Prueba de Mann-Whitney e IC: verano. invierno

N Mediana

verano 3811 180,00

invierno 4484 135,00

La estimación del punto para ETA1-ETA2 es 45,00

95,0 El porcentaje IC para ETA1-ETA2 es (45,00,45,00)

W = 17505232,5

Prueba de ETA1 = ETA2 vs. ETA1 no es = ETA2 es significativa en 0,0000

La prueba es significativa en 0,0000 (ajustado por empates)

Conclusión: $p < 0.05$ se acepta la hipótesis alternativa, existe diferencias entre los datos de dirección del viento en invierno y verano

APÉNDICE 13: VALORES DE CONCENTRACIÓN AL VARIAR EL FLUJO DE SUCCIÓN

Cuadro 0.1 Estimación de la dispersión de los olores y odorantes, al modificar el flujo de succión para los resultados del 10 de diciembre del 2014.

Clase	Distancia m	Flujo de succión m ³ /s Caudal OU/s	Olor OU/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Sulfuro de hidrógeno µg/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Amoníaco µg/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Mercaptanos µg/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Compuestos orgánicos volátiles µg/m ³
A	10		585.4795		11583.3892		1638726.806		3155.3396		21031.5597
	100		13.2073		261.2994		36966.5860		71.1785		47.4523
	200		3.7571		74.3315		10515.8356		20.2481		13.4987
	300		1.7979		35.5697		5032.1245		9.6893		6.4595
	400		1.0654		21.0784		2982.0154		5.7418		3.8279
	500		0.7099		14.0454		1987.0324		3.8259		2.5507
	600		0.5095		10.0800		1426.0517		2.7458		1.8306
	700		0.3849		7.6146		1077.2515		2.0742		1.3828
	800		0.3019		5.9720		844.8671		1.6268		1.0845
B	10	2 m ³ /s 8065 2 OU/s	694.3050	0.01 m ³ /s 1595 655	13736.4405	4500 m ³ /s 225740 748	1943323.5660	0.03 m ³ /s 434659, 835	3741.8353	0.5 m ³ /s 28977 3,22	2494.5568
	100	28.6411	566.6480	80164.9062	154.3561	102.9040					
	200	8.7853	173.8120	24589.5537	47.3467	31.5645					
	300	4.3840	86.7353	12270.6286	23.6269	15.7512					
	400	2.6752	52.9280	7487.8398	14.4177	9.6118					
	500	1.8233	36.0738	5103.4361	9.8266	6.5511					
	600	1.3329	26,3700	3730.6202	7.1832	4.7888					
	700	1.0226	20.2316	2862.2145	5.5111	3.6741					
	800	0.8128	16.0817	2275.1136	4.3807	2.9204					
C	10		647.3399		12704.3579		1811870.919		3488.7255		2325.8170
	100		31.4061		631.9864		87904.0030		169.2576		112.8384
	200		9.6546		239.9857		27022.6527		52.0316		34.6878

	300	4.820 1	110.709 7	13491.26 59	25.9772	17.3181
	400	2,941 9	65.0244	8234.232 9	15.8549	10.5699
	500	2.005 3	39.6733	5612.669 6	10.8071	7.2047
	600	1.465 9	29.0028	4103.089 1	7.9004	5.2670
	700	1.124 7	22.2523	3148.086 9	6.0616	4.0410
	800	0.894 0	17.6883	2502.404 4	4.8183	3.2122
D	10	287.4 945	4242.91 74	804682.1 523	1549.401 3	1032.93 42
	100	95.52 54	1917.64 29	267370.5 525	514.8173	343.211 5
	200	33.94 33	822.506 7	95005.50 94	182.9314	121.954 3
	300	18.23 56	412.470 5	51040.62 23	98.2778	65.5185
	400	11.69 53	255.674 7	32734.60 44	63.0299	42.0199
	500	2.005 3	163.754 1	23166.64 85	44.6070	29.7380
	600	6.236 8	123.391 5	17456.46 25	33.6121	22.4080
	700	1.124 7	97.1065	13737.86 73	26.4520	17.6347
	800	0.894 0	78.8965	11161.65 54	21.4916	14.3277
E	10	18.83 47	163.089 6	52717.22 10	101.5061	67.6708
	100	173.4 339	3472.66 93	485432.4 661	934.6917	623.127 7
	200	70.35 71	1670.71 77	196925.8 798	379.1773	252.784 9
	300	39.83 21	891.705 1	111488.0 459	214.6683	143.112 2
	400	26.36 53	572.482 3	73795.29 37	142.0915	94.7277
	500	19.08 24	377.534 4	53410.59 96	102.8412	68.5608
	600	14.63 10	289.465 5	40951.30 49	78.8510	52.5673
	700	11.67 87	231.057 3	32688.17 72	62.9405	41.9603
	800	9.603 1	189.991 6	26878.51 53	51.7511	34.5027
F	10	4.46x 10-17	4,78x10 -19	1,2489x1 0-13	2.4x10- 16	1.60x10- 16
	100	121.3 740	2373.38 77	339719.4 857	654.1239	436.082 6
	200	140.6 373	2921.11 06	393636.4 051	757.9399	505.293 3
	300	106.2 701	2263.13 38	297444.5 695	572.7243	381.816 2

	400		80.22 21		1697.85 60		224537.4 92		432.3430		288.228 6
	500		62.58 11		1238.13 21		175161.1 914		337.2698		224.846 5
	600		50.37 49		996.639 8		140996.7 597		271.4868		180.991 2
	700		41.61 63		823.356 2		116481.9 675		224.2840		149.522 6
	800		35.11 28		694.688 2		98279.02 93		189.2345		126.156 4

Cuadro 0.2 Estimación de la dispersión de los olores y odorantes, al modificar el flujo de succión para los resultados del 24 de Febrero del 2015

Clase	Distancia m	Flujo de succión m ³ /s Caudal OU/s	Olor OU/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Sulfuro de hidrógeno µg/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Amoníaco µg/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Mercaptanos µg/m ³	Flujo de succión m ³ /s Caudal µg/s	Compuestos orgánicos volátiles µg/m ³
A	10	29280	551.2287	0.01684281383	4064.2568	4500270798781.6	1608396.5330	45118502.628	703.8407	0.5548206.075	3256.0440
	100		12.4347		91.6820		36282.3923		15.8773		73.4502
	200		3.5373		26.0806		10321.2040		4.5166		20.8943
	300		1.6927		12.4803		4938.9878		2.1613		9.9985
	400		1.0031		7.3958		2926.8229		1.2808		5.9251
	500		0.6684		4.9281		1950.2555		0.8534		3.9481
	600		0.4797		3.5368		1399.6578		0.6125		2.8335
	700		0.3624		2.6717		1057.3133		0.4627		2.1404
B	10	29280	653.6878	0.01684281383	4819.6967	4500270798781.6	1907355.683	45118502.628	834.6665	0.5548206.075	3861.2580
	100		26.9656		198.8195		78681.1791		34.4312		159.2825
	200		8.2713		60.9853		24134.4395		10.5613		48.8579
	300		4.1275		30.4328		12043.5184		5.2703		24.3809
	400		2.5187		18.5708		7349.2516		3.2161		14.8779
	500		1.7167		12.6572		5008.9795		2.1919		10.1402
	600		1.2549		9.2524		3661.5723		1.6023		7.4125
	700		0.9628		7.0987		2809.2394		1.2293		5.6870
C	10	29280	609.4703	0.01684281383	4457.5705	4500270798781.6	1778336.019	45118502.628	778.2069	0.5548206.075	3600.0701
	100		29.5688		221.7447		862770.0372		37.7552		174.6596
	200		9.0898		84.2036		26522.5055		11.6063		53.6923
	300		4.5381		38.8447		13241.5637		5.7946		26.8063
	400		2.7698		22.8151		8081.8301		3.5366		16.3609

	500	1.8880	13.9201	5508.7878	2.4107	11.1520
	600	1.3802	10.1762	4027.1474	1.7623	8.1525
	700	1.0589	7.8077	3089.8207	1.3521	6.2550
	800	0.8417	6.2063	2456.0888	1.0748	4.9721
D	10	270.6759	1488.7099	789788.7428	345.6147	1598.8513
	100	89.9371	672.8422	262421.9413	114.8369	531.2480
	200	31.9576	288.5924	93247.1058	40.8053	188.7679
	300	17.1689	144.7233	50095.9402	21.9222	101.4144
	400	11.0111	89.7084	32128.7381	14.0597	65.0415
	500	7.7927	57.4563	22737.8700	9.9502	46.0306
	600	5.8719	43.2943	17133.3707	7.4976	34.6849
	700	4.6211	34.0717	13483.6008	5.9005	27.2926
	800	3.7545	27.6824	10955.0706	4.7940	22.1775
E	10	17.7328	57.2231	51741.5076	22.6423	104.7457
	100	163.2879	1218.4534	476447.8669	208.4954	964.5229
	200	66.2412	586.2037	193281.0894	84.5806	391.2790
	300	37.5019	312.8721	109424.5764	47.8846	221.5195
	400	24.8230	200.8665	72429.4581	31.6954	146.6265
	500	17.9660	132.4653	52422.0528	22.9400	106.1234
	600	13.7750	101.5646	40193.3603	17.5888	81.3676
	700	10.9955	81.0709	32083.1701	14.0397	64.9493
	800	9.0413	66.6622	26381.0360	11.5444	53.4059
F	10	4.20x10-17	1.67x10-19	1.22X10-13	5,36x10-17	2.48x10-16
	100	114.2735	832.7491	333431.8108	145.9111	675.0006
	200	132.4099	1024.9283	386350.8102	169.0687	782.1300
	300	100.0533	794.0644	291939.6539	127.7538	591.0031
	400	75.5291	595.7257	220381.6539	96.4399	446.1414
	500	58.9200	434.4247	171919.2314	75.2325	348.0340

	600		47.42 79		349.69 04		138387.1 300		60.5588		280.151 4
	700		39.18 18		288.89 05		114326.0 683		50.0295		231.442 1
	800		33.05 87		243.74 48		96460.03 80		42.2113		195.274 1

14. ANEXOS

**ANEXO 1: VALORES PROMEDIOS PARA EL PERIODO DEL AÑO 2004 AL
2013 DE DATOS METEOROLÓGICOS**

Cuadro A.0.1.1 Valores promedios para el periodo del año 2004 al 2013 de datos meteorológicos brindados por el Instituto Meteorológico Nacional (2014)

Año	Radiación solar MJ/m	Precipitación mm	Porcentaje de Humedad %	Temperatura °C		Velocidad (km/h) y Dirección del viento
				Mínima	Máxima	
2004	19.4	99.3	76	24.3	29.8	11.5 Sur
2005	18.5	132.9	78	24.2	29.5	10.9 Sur
2006	20.4	83.0	78	24.0	29.6	10.9 Sur
2007	19.5	142.0	81	23.2	28.9	11.7 Variable
2008	19.5	166.2	81	22.8	28.6	No se cuenta con la información
2009	20.1	79.8	79	24.3	29.8	
2010	18.7	177.5	80	22.5	29.2	
2011	14.8	140.8	79	23.9	28.8	
2012	15.3	74.0	75	24.1	30.0	10.4 Variable
2013	16.9	82.6	76	24.6	29.8	10.9 Sur

**ANEXO 2: FACTORES DE EMISIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OLORES
PARA UNA PTAR.**

Cuadro A.2.0.1 Factores de emisiones teóricos tomado de Capelli et al., (2009)

Unidad	Media geométrica de OEF	Mediana de OEF	% desviación
LL-AR	1.09E+04	3.09E+03	40
PR-T	1.05E+05	3.42E+05	26
I-Sed	1.9E+05	1.18E+05	17
Q-F	8.25E+03	1.09E+04	15
II-Sed	1.31E+04	1.34E+04	13
Al-lodo	4.25E+04	4.99E+04	19
Es-lodo	8.26E+03	1.02E+04	17

ANEXO 3: ENCUESTA APLICADA PREVIAMENTE POR EL AYA



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Encuesta de Olores Vecinos de PTAR


Fecha: _____
Nombre: Rodrigo Padilla Jimenez
Cédula: 1-205-651, Teléfono: 2663 7249
Dirección: Casa # 585, de los tanques Aguas Negras 50 E.

PREGUNTAS

1. Como son o eran los Olores hace un año atrás que se producian en la PTAR.
()Muy Fuerte (X)Fuerte ()Poco ()Nada ()NR
2. Como se sienten los Olores que provienen de la PTAR actualmente.
()Muy Fuerte (X)Fuerte ()Poco ()Nada ()NR
3. Cree usted que ha mejorado el grado de Olores en general.
()Mucho (X)Poco ()Nada ()NR
4. En cual de las 2 Estaciones del año la PTAR huele más.
()Invierno (X)Verano ()NR
5. En un día completo (24 horas), que momento huele más la PTAR.
(X)Mañana ()Tarde ()Noche ()NR
6. El AyA aplica Bacterias para combatir los malos olores; considera usted que hace bien en buscar medios para reducir los malos Olores generados en la PTAR.
(X)Muy bueno ()Bueno ()Regular ()Malo ()NR
7. Respecto a la pregunta anterior, es suficiente o puede mejorar: Mejorar

Opinión general con respecto a Olores en la PTAR:

Quejencia sobre basura, y malos Olores, ante ministerio de Salud.


Firma vecino (a)


Firma AYA


Firma EMPROTEC

Figura A.3.1 Machote de encuesta aplicada previamente por el AYA

ANEXO 4: PORCENTAJE DE COBERTURA DE NUBES

Cuadro A.4.1 Porcentaje de cobertura de nubes tomado de (NOAA, 2015)

Cubierta de nube	Porcentaje de nubes %
Claro	(0-5)
Parcialmente nublado	(5-50)
Mayormente nublado	(50-95)
Completamente nublado	(95-100)

Cuadro A.4.2 Nubosidad en Costa Rica (Instituto Meteorológico Nacional, 2015)

Época	Nubosidad
Setiembre 2014	Parcialmente Nublado
Marzo 2015	Despejado
Abril 2015	Despejado

ANEXO 5: RESULTADOS DE DEL MUESTREO Y ANÁLISIS DE OLORES, ASÍ COMO DE ODORANTES

RESULTADO DE ANALISIS # 334558



--RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO--

FECHA: 10 DE MARZO DEL 2015.

SOLICITANTE: INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS.
BARRANCA - PUNTARENAS.

ATENCION: Ing. KARLA ORDOÑEZ.

REFERENCIA: Resultados Analíticos del muestreo de gases de la planta de tratamiento de Acueductos y Alcantarillados ubicada en El Roble de Puntarenas. Muestreo realizado por personal del Laboratorio Químico Lambda en Puntarenas el día 25 DE FEBRERO DEL 2015.

Determinación	<u>GAS</u> punto 1 entrada de agua a la ptar	<u>GAS</u> punto 2 tanque lodos primarios	<u>GAS</u> punto 3 salida sedimentador primario	<u>AGUA</u> punto 1 entrada de agua a la ptar	<u>AGUA</u> punto 2 tanque lodos primarios	<u>AGUA</u> punto 3 salida sedimentador primario
pH ± 0,02	----	----	----	7,01	7,04	7,03
Temperatura ± 0,2	29,4 C	29,1 C	31,5 C	32,7 C	32,9 C	36,8 C
Amoníaco	7,6 ± 0,2 mg/m3	18,3 ± 0,2 mg/m3	34,2 ± 0,2 mg/m3	47,1 ± 0,2 mg/l	55,1 ± 0,2mg/l	44,3 ± 0,2 mg/l
Sulfuro de hidrógeno	11520 ± 100 mg/m3	56820 ± 500 mg/m3	0,0047 ± 0,0005 mg/m3	4,7 ± 0,2 mg/l	3,0 ± 0,1 mg/l	5,3 ± 0,2 mg/l
Metano	0,0165 ± 0,0002 %	0,213 ± 0,001 %	0,142 ± 0,001 %	0,008 ± 0,001 mg/l	0,022 ± 0,001 mg/l	0,035 ± 0,001 mg/l
Mercaptanos ± 1 %	0,021 ± 0,002 mg/m3	1,68 ± 0,02 mg/m3	0,929 ± 0,002 mg/m3	0,071 ± 0,002 mg/l	0,088 ± 0,002 mg/l	0,163 ± 0,002 mg/l
VOC's	86 ± 1 mg/m3	690 ± 2 mg/m3	319 ± 1 mg/m3	72 ± 1 mg/l	134 ± 1 mg/l	425 ± 2 mg/l

RAFAEL E. ARON PÉREZ
 N.I. COCR 337

Tels: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
 e-mail: lambda@encsa.cr • www.laboratoriolambda.com

LAMBDA R-04



Tels.: 2286-1168 / 2226-4462 • Fax: (506) 2226-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
 e-mail: lambda@racsa.co.cr • www.laboratoriolambda.com

RESULTADO DE ANALISIS # 334,659

---RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO---

FECHA: 10 DE MARZO DEL 2015.

SOLICITANTE: INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y
 ALCANTARILLADOS. BARRANCA - PUNTARENAS.

ATENCION: Ing. KARLA ORDOÑEZ.

REFERENCIA: Resultados Analíticos del muestreo de gases de la planta de tratamiento de Acueductos y Alcantarillados ubicada en El Roble de Puntarenas. Muestreo realizado por personal del Laboratorio Químico Lambda en Puntarenas el día 25 DE FEBRERO DEL 2015.

**OLOR POR OLFATOMETRIA
 AWMA EE-6**

Muestra	gas punto 1 entrada de agua a la pta	gas punto 2 tanque lodos primarios	gas punto 3 salida sedimentador p primario
Factor de Dilución:			
50000	(-)	(-)	(-)
25000	(-)	(+)	(-)
12500	(-)	(+)	(-)
6250	(+)	(+)	(-)
3125	(+)	(+)	(-)
1563	(+)	(+)	(+)
781	(+)	(+)	(+)
391	(+)	(+)	(+)
195	(+)	(+)	(+)
98	(+)	(+)	(+)
49	(+)	(+)	(+)
24	(+)	(+)	(+)
12	(+)	(+)	(+)
6	(+)	(+)	(+)
Promedio de la Mejor Estimación de Umbral de Olor	8839	35355	2210



LAMBDA R-04



Tel: 2236-1168 / 2236-4462 • Fax: (506) 2236-4462 • Apartado: 877-1011 San José, Costa Rica
 e-mail: lambda@nasa.co.cr • www.laboratoriolumbda.com

---RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO---

FECHA: 10 DE MARZO DEL 2015.

SOLICITANTE: INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS.
 BARRANCA – PUNTARENAS.

ATENCION: Ing. KARLA ORDOÑEZ.

REFERENCIA: Resultados Analíticos del muestreo de gases de la planta de tratamiento de Acueductos y Alcantarillados ubicada en El Roble de Puntarenas. Muestreo realizado por personal del Laboratorio Químico Lambda en Puntarenas el día 25 DE FEBRERO DEL 2015.

Determinación	GAS punto 1 entrada de agua a la ptar	GAS punto 2 tanque lodos primarios	GAS punto 3 salida sedimentador primario	AGUA punto 1 entrada de agua a la ptar	AGUA punto 2 tanque lodos primarios	AGUA punto 3 salida sedimentador primario
pH	9,8 mg/m3	10,0 mg/m3	30,3 mg/m3	7,01	7,04	7,03
Temperatura	29,4 C	29,1 C	31,5 C	32,7 C	32,9 C	36,8 C
Amoníaco	7,6 mg/m3	18,3 mg/m3	34,2 mg/m3	47,1 mg/l	55,1 mg/l	44,3 mg/l
Sulfuro de hidrógeno	11520 mg/m3	56820 mg/m3	0,0047 mg/m3	4,7 mg/l	3,0 mg/l	5,3 mg/l
Metano	0,0165 %	0,2132 %	0,1422 %	0,008 mg/l	0,022 mg/l	0,035 mg/l
Mercaptanos	0,021 mg/m3	1,68 mg/m3	0,929 mg/m3	0,071 mg/l	0,088 mg/l	0,163 mg/l
VOC's	86 mg/m3	690 mg/m3	319 mg/m3	72 mg/l	134 mg/l	425 mg/l


 KARLA ORDOÑEZ
 N. 11068-337

---RESULTADO DE ANALISIS QUIMICO---

FECHA: 15 DE ENERO DEL 2015.**SOLICITANTE:** INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA.**ATENCION:** Srita. Luz Saenz

REFERENCIA: Resultados Analíticos del muestreo de gases de la planta de tratamiento de Acueductos y Alcantarillados ubicada en El Roble de Puntarenas. Muestreo realizado por personal del Laboratorio Químico Lambda en Puntarenas el día 10 de Diciembre del 2014.

Determinación	Cantidad de muestras agua / aire	gas punto 1 entrada de agua a la ptar	gas punto 2 tanque lodos primarios	gas punto 3 salida sedimentador primario	agua punto 1 entrada de agua a la ptar	agua punto 2 tanque lodos primarios	agua punto 3 salida sedimentador primario
Amoniaco	3/3	9,8 mg/m3	10,0 mg/m3	30,3 mg/m3	50,5 mg/l	100,9 mg/l	44,1 mg/l
Sulfuro de hidrógeno	3/3	47810 mg/m3	111550 mg/m3	0,0035 mg/m3	4,2 mg/l	4,6 mg/l	6,1 mg/l
Metano	0 / 2	0,3450%	0,1960%	0,1130%	na	na	na
Mercaptanos	3/3	1320 mg/m3	13150 mg/m3	0,00016 mg/m3	0,065 mg/l	0,083 mg/l	0,106 mg/l
VOC's	3/3	145 mg/m3	398 mg/m3	35,8 mg/m3	29 mg/l	68 mg/l	186 mg/l



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
 LABORATORIO QUÍMICO LAMBDA
 RAFAEL Y AMON PEREZ
 N.º COCR-537

LAMBDA R-04