

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“PROPUESTA DE UN PLAN DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN
DE LOS IMPACTOS DEL OLOR PROVENIENTE DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERA AMBIENTAL

EVELIN MIREILLA CHÁVEZ GUERRERO

Lima – Perú

2024

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

TSP_Evelin Chávez v2. RvMC (1).pdf

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

15%

FUENTES DE INTERNET

10%

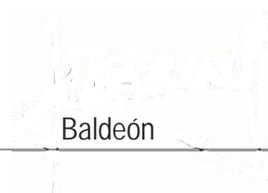
PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad de Guayaquil	<1%
	Trabajo del estudiante	
2	www.lamolina.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
3	ecotoxbrasil.org.br	<1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.oefa.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
5	consultasciudadanas.mma.gob.cl	<1%
	Fuente de Internet	
6	Submitted to Universidad del Norte, Colombia	<1%
	Trabajo del estudiante	
7	repositorio.lamolina.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	rmcab.ambientebogota.gov.co	<1%
	Fuente de Internet	
9	www.vetmeduni.ac.at	<1%
	Fuente de Internet	



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PROPUESTA DE UN PLAN DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN
DE LOS IMPACTOS DEL OLOR PROVENIENTE DE UNA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

EVELIN MIREILLA CHÁVEZ GUERRERO

Sustentada y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. Víctor Augusto Caro Sánchez Benites
PRESIDENTE

Ing. Lawrence Enrique Quipuzco Ushñahua
MIEMBRO

Dra. Fanny Carhuanchó León
MIEMBRO

Mg. Sc. Wilfredo Celestino Baldeón Quispe
ASESOR

AGRADECIMIENTOS

Al Mg. Sc. Wilfredo Baldeón Quispe, por su asesoría en cada una de las etapas del desarrollo de este trabajo.

A CARBONO GROUP S.A.C., por potenciar mis capacidades y habilidades.

A mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCION	1
1.1. Problemática	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
II. REVISIÓN LITERARIA	3
2.1. Aguas residuales	3
2.2. Clasificación de las aguas residuales.....	3
2.3. Composición de las aguas residuales domésticas.....	4
2.4. Plantas de Tratamiento de Agua Residual Doméstica-PTARD	5
2.4.1. Tratamientos preliminares o pre tratamientos	6
2.4.2. Tratamientos primarios.....	6
2.4.3. Tratamientos secundarios o biológicos.....	6
2.4.4. Tratamientos terciarios	7
2.5. PTARD con tratamiento secundario tipo reactor biológico de membranas (MBR)	8
2.6. Olores ofensivos y odorantes.....	8
2.6.1. Proceso de recepción del olor.....	8
2.6.2. Dimensiones de los olores	10
2.6.3. Umbrales de detección, reconocimiento y molestia de los olores	11
2.7. Emisiones de odorantes en las PTARD.....	12
2.8. Tipos de compuestos odorantes en las PTARD.....	13
2.9. Efectos en la salud causados por los olores de una PTARD.....	14
2.10. Formación de H ₂ S en las PTARD	14
2.11. Efectos en la salud generados por el H ₂ S.....	17
2.12. Métodos de medición de olores	19

2.12.1. Métodos Analíticos	19
2.12.2. Métodos Sensoriales	20
2.13. Dispersión de olores y odorantes	21
2.14. Modelos de dispersión atmosféricas.....	26
2.14.1. Modelos gaussianos	28
2.14.2. Modelos Lagrangianos.....	29
2.14.3. Modelos eulerianos e híbridos.....	30
2.15. Factor y tasa de emisión de olor	30
2.15.1. Factor de emisión de olor	30
2.15.2. Tasa de emisión de olor	31
2.16. Normativas regulatorias sobre olores	33
2.17. Medidas relacionadas con el control de olores en las PTARD.....	36
2.17.1. Prevención	36
2.17.2. Mitigación.....	39
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	43
3.1. Área de estudio	43
3.2. Descripción del sistema de tratamiento de la futura PTARD	43
3.3. Diseño de la investigación	44
3.4. Materiales y Equipos	44
3.5. Metodología	44
3.5.1. Esquema metodológico del TSP	44
3.5.2. Determinación del Modelo de dispersión atmosférica	45
3.5.3. Monitoreo de variables meteorológicas.....	49
3.5.4. Determinación de la Tasa de emisión del olor	51
3.5.5. Modelación de la dispersión del contaminante H ₂ S	52
3.5.6. Plan de prevención y mitigación para el control de los olores molestos	52
3.6. Contribución en la solución de situaciones problemáticas que se hayan presentado durante su estancia en la empresa.....	52
3.7. Análisis de su contribución en términos de las competencias y habilidades adquiridas durante su formación profesional,	

	considerando la revisión de literatura actualizada pertinente	53
3.8.	Explicar el nivel de beneficio obtenido por el centro laboral de su contribución a la solución de las situaciones problemáticas.....	53
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	55
4.1.	Resultados de mediciones meteorológicas.....	55
4.1.1.	Mediciones de velocidad y dirección del viento	55
4.1.2.	Medición de radiación	57
4.2.	Cálculo de los factores utilizados en el modelamiento	59
4.3.	Modelamiento de los olores	61
4.4.	Plan de prevención y mitigación de olores	64
4.4.1.	Medidas antes de entrada en operación de la PTARD.....	65
4.4.2.	Medidas cuando entre en operación la PTARD	67
V.	CONCLUSIONES	71
VI.	RECOMENDACIONES	73
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
VIII.	ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Concentraciones de los constituyentes de las aguas residuales domésticas	4
Tabla 2: Tipos de tratamientos biológicos para las aguas residuales domésticas	7
Tabla 3: Composición de los odorantes en las PTAR.....	14
Tabla 4: Efectos en la salud a diferentes concentraciones de H ₂ S en el aire.....	18
Tabla 5: Efectos de la topografía local en la dispersión de contaminantes	23
Tabla 6: Tipos de estabilidad atmosférica	25
Tabla 7: Clases de Estabilidad atmosférica, según Pasquill-Gifford-Turner	26
Tabla 8: Tipo de modelo de dispersión para diferentes escalas de trabajo	28
Tabla 9: Distancia de separación de acuerdo con la jurisdicción de Canadá	34
Tabla 10: Distancia de separación de acuerdo con la jurisdicción de Australia	34
Tabla 11: Distancia mínima de separación de PTARD a centros poblados	36
Tabla 12: Valores de p, basados en la estabilidad y tipo de entorno	47
Tabla 13: Valores de I, J, K para σ_y en función de la condición de estabilidad	48
Tabla 14: Valores de I, J, K para σ_z en función de la condición de estabilidad	48
Tabla 15: Método Gráfico para determinar la Categorías de Estabilidad Atmosférica de Pasquill-Gifford-Turner	49
Tabla 16: Estación Punta Lobos del SENAMHI.....	50
Tabla 17: Descripción de la estación de monitoreo de velocidad y dirección del viento	55
Tabla 18: Resultados de Laboratorio de velocidad del viento durante todo el día	56
Tabla 19: Resultados de Laboratorio de velocidad del viento en periodo diurno.....	56
Tabla 20: Descripción de la estación de monitoreo de radiación.....	57
Tabla 21: Resultados de Laboratorio de radiación.....	58
Tabla 22: Valor de las constantes empíricas para una estabilidad D	60
Tabla 23: Análisis de beneficios de las propuestas de control de olores.....	65
Tabla 24: Parámetros analizados vs componente de la PTAR	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de emisión, dispersión y respuesta humana al olor.....	9
Figura 2. Rueda de olor.....	11
Figura 3. Comportamiento del H ₂ S en reactores biológicos	15
Figura 4: Ecuación utilizada para determinar la emisión de H ₂ S en una PTARD, a partir de la temperatura del agua residual doméstica.....	17
Figura 5. Posicionamiento de las barreras vegetativas	42
Figura 6. Funciones de las barreras vivas	42
Figura 7: Etapas de tratamiento en la futura PTARD de Chilca	43
Figura 8. Flujograma de la metodología de trabajo	45
Figura 9. Estación EM-01	55
Figura 10. Rosa de viento de la estación EM-01.....	57
Figura 11. Monitoreo de radiación.....	58
Figura 12: Mapa temático del modelamiento de la dispersión del H ₂ S.....	62
Figura 13. Distancia de impacto según el Límite de inmisión	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Composición del agua residual doméstica	84
Anexo 2 Límites de inmisión (calidad de aire) para el H ₂ S	86

ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DEM	Modelo Digital del Terreno
DGAAM	Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros
DQO	Demanda bioquímica de oxígeno
D.S.	Decreto Supremo
ECA	Estándares de Calidad Ambiental
EPA	Agencia de Protección Ambiental
EPS	Empresa Prestadora de Servicios
HU	Habilitación urbana
IGA	Instrumento de Gestión Ambiental
INACAL	Instituto Nacional de Calidad
IPPC	Directiva Europea de Prevención y Control Integrado de la Contaminación
LMP	Límites Máximos Permisibles
MBR	Reactor biológico de membrana
MINAM	Ministerio del Ambiente
MVCS	Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas residuales
PTARD	Planta de Tratamiento de Aguas residuales Domésticas
OEF	Factores de emisión de olores
OER	tasa de emisión de olores
OMS /WHO	Organización Mundial de la Salud
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
TSP	Trabajo de Suficiencia Profesional
UE	Unión Europea

UNALM	Universidad Nacional Agraria la Molina
US EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
UTM	Universal Transverse Mercator

RESUMEN

En el presente Trabajo de Suficiencia Profesional (TSP) se elaboró un análisis de dispersión de los potenciales olores desagradables provenientes de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARD), que será construida como parte de la Habilitación Urbana (HU)¹ que realiza una empresa inmobiliaria. El análisis consistió en el modelamiento de la dispersión del gas predominante y representativo de este tipo de plantas, el gas odorante sulfuro de hidrógeno (H₂S).

El modelo de dispersión utilizado fue el Penacho gaussiano y la modelación se realizó en el ArcGIS 10.8, los resultados fueron plasmados en un Mapa temático que permitió visualizar la evolución espacial del H₂S y la dirección a la que se dirigen los potenciales impactos significativos sobre los receptores afectados por la contaminación odorífera.

Con el modelamiento se obtuvo información necesaria para elaborar un Plan para controlar los impactos negativos que podrían generarse por los olores provenientes de este sistema de tratamiento. Las medidas propuestas en el Plan consistieron en el planteamiento de medidas preventivas y de mitigación tanto para la etapa de diseño y operación, las que fueron diseñadas de acuerdo a la capacidad económica del administrador final de la PTARD.

Las medidas preventivas se enfocaron en las características del diseño y en medidas operacionales que contribuyan a evitar la generación de olores. Por otro lado, la medida de mitigación se centró en el diseño de una barrera viva que rodeara a la PTARD con la finalidad de reducir los impactos negativos de los olores desagradables que pudieran generarse por las contingencias en la operación y por factores externos no controlados.

Palabras claves: PTARD, modelamiento de dispersión, sulfuro de hidrógeno, tasa de emisión, olores y odorantes, plan de prevención y mitigación.

¹ Transformación de un área de terreno, mediante la implementación de infraestructura y servicios necesarios, para el desarrollo urbano.

ABSTRACT

In this Professional Sufficiency Work (TSP), a dispersion analysis of the potential unpleasant odors coming from a Domestic Wastewater Treatment Plant (WWTPs), to be built as part of the Urban Habitation (HU)² carried out by a real estate company, was elaborated. The analysis consisted of modeling the dispersion of the predominant and representative gas of this type of plant, the odorant gas hydrogen sulfide (H₂ S).

The dispersion model used was the Gaussian Plume and the modeling was performed in ArcGIS 10.8; the results were captured in a thematic map that allowed visualizing the spatial evolution of the H₂ S, and the direction in which the potential significant impacts on the receptors affected by odorous contamination are directed.

The modeling provided the necessary information to develop a plan to control the negative impacts that could be generated by odors from this treatment system. The measures proposed in the Plan consisted of preventive and mitigation measures for both the design and operation stages, which were designed according to the economic capacity of the WWTPs's final manager.

Preventive measures focused on design features and operational measures to help prevent the generation of odors. On the other hand, the mitigation measure focused on the design of a living barrier surrounding WWTPs in order to reduce the negative impacts of unpleasant odors that could be generated by operational contingencies and uncontrolled external factors.

Keywords: WWTPs, dispersion modeling, hydrogen sulfide, emission rate, odors and odorants, prevention and mitigation plan.

² Transformation of an area of land, through the implementation of infrastructure and services necessary for urban development.

I. INTRODUCCION

1.1. Problemática

Las aguas residuales domésticas contienen materia orgánica, que al ser tratada en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARD), se degradan en moléculas de menor tamaño liberadas a la atmósfera, algunas de estas moléculas tienen la capacidad de generar olores desagradables perceptibles por el olfato humano. Los principales compuestos responsables de estos olores en las PTARD son el sulfuro de hidrogeno (H_2S), el amoniaco (NH_3) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Giraldo & Lozada, 2019).

Los malos olores pueden afectar la calidad de vida humana, produciendo molestias y afecciones a la salud que llegan a ser mortales en caso de exposición a altas concentraciones. Dado los potenciales impactos negativos que generan los olores, se han establecido normativas reguladoras internacionales con varios enfoques, que tienen como objetivo prevenirlos y/o minimizarlos. Las más utilizadas se centran en establecer límites máximos de concentración del olor o de odorantes en la ubicación del receptor, también llamados límites en inmisión.

En el Perú, no existen normativas reguladoras específicas para olores u odorantes, a diferencia de otros países latinoamericanos como Chile, Colombia, Panamá y algunos estados de Brasil, donde se establecen emisiones máximas de olores (Brancher *et al.*, 2017). Sin embargo, se puede utilizar como una normativa referencial para el control de olores el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de Aire, aprobado por el D.S N°003-2017-MINAM, que establece la concentración máxima en inmisión del H_2S , gas odorante más representativo en una PTARD. Además, en el rubro Vivienda y Construcción, la Norma OS.090 del Reglamento Nacional de Edificaciones (D.S N° 011-2006-VIVIENDA , 2006, pág. 96) recomienda que, para reducir el riesgo de generación de malos olores atribuidos a la operación de las PTARD dentro de zonas urbanas, se debe construir estas instalaciones a una distancia mínima de 100 m (para las PTARD de tipo lodos activados) de los receptores.

Para conocer la extensión y dirección de los impactos negativos generados por los oloresprovenientes de una PTARD se requiere de un análisis de dispersión basado en

modelos matemáticos. Entre estos, los modelos gaussianos son ampliamente reconocidos como los más apropiados en el tema de olores (Capelli *et al.*, 2013). La aplicación de este modelo requiere datos meteorológicos, información topográfica, detalles sobre la fuente de emisión y una tasa de emisión derivada de mediciones de olores en la PTARD (concentración de olor) y el flujo de aire asociado a la PTARD (Capelli *et al.*, 2013). Cuando se lleva a cabo el análisis para una nueva PTARD, se utilizan tasas de emisión hallados a través de los resultados de medición de olores en instalaciones existentes que compartan características similares. Estas tasas de emisión también pueden basarse en un solo compuesto (un solo contaminante) representativo de la fuente de emisión que genera los malos olores.

Dada la preocupación por los problemas causado por los olores, una empresa inmobiliaria encargada de desarrollos urbanos solicitó información sobre la dirección y alcance máximo de los impactos generados por los olores provenientes de una PTARD de tipo MBR (Reactor biológico de membranas, sistema de tratamiento basado en lodos activados), que será instalada en una urbanización de Chilca. Para determinar esta distancia crítica, se realizó un análisis de dispersión atmosférica del H₂S mediante la aplicación de un modelo numérico.

Utilizando los resultados del modelo de calidad del aire se propuso un Plan para la prevención y mitigación de los impactos por olores desagradables generados por la futura PTARD, con la finalidad de evitar molestias y afecciones a la salud de los pobladores de la urbanización de Chilca, donde será construida e instalada.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Proponer un Plan de prevención y mitigación de los impactos de los olores provenientes de la PTARD de una urbanización de Chilca.

1.2.2. Objetivos Específicos

- i. Monitorear las variables meteorológicas (radiación solar, dirección y velocidad del viento) que inciden en la dispersión del H₂S.
- ii. Modelar el transporte y dispersión del H₂S proveniente de la PTARD.
- iii. Elaborar el Plan de prevención y mitigación para el control de los olores de la PTARD con fines de reducir la afectación a la población de una urbanización de Chilca.

II. REVISIÓN LITERARIA

2.1. Aguas residuales

De acuerdo con la definición del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014), las aguas residuales son aquellas cuyas características iniciales han sido modificadas y por su naturaleza requieren una depuración antes de ser reusadas y descargadas a un cuerpo natural de agua o al sistema de alcantarillado.

Asimismo, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS, 2006) también aborda esta temática, definiendo las aguas residuales como aquellas que han sido usadas por actividades domésticas o industriales y en su composición alberga material orgánico o inorgánico disuelto en suspensión.

2.2. Clasificación de las aguas residuales

De acuerdo al OEFA (2024) las aguas residuales pueden clasificarse en:

- **Aguas residuales domésticas**

Son aquellas provenientes de origen doméstico y comercial que contienen residuos provenientes de actividades humanas.

Estas aguas se dividen a su vez en aguas negras y grises. Las aguas negras son las que se componen de los desechos fisiológicos y las aguas grises son las aportaciones de desechos grasos provenientes de la cocina o agua con mezclas de jabón y/o detergentes (Macías & Padilla, 2021).

- **Aguas residuales industriales**

Este tipo de aguas residuales contienen desechos de un proceso productivo o actividad industrial. Por ejemplo, aquellas provenientes de la industria agrícola, textil, automotriz, entre otras industrias.

- Aguas residuales municipales

Es el conjunto de aguas residuales industriales ya tratadas y aguas residuales domésticas que se mezclan con el agua de lluvia y llegan al alcantarillado público.

2.3. Composición de las aguas residuales domésticas

El 99.9 % del agua residual doméstica está constituido de agua pura (Loaiza, 2021) y el porcentaje restante de materiales en suspensión y solución, compuestos principalmente de materia orgánica y nutrientes (ver Tabla 1 y Anexo 1). Los porcentajes de composición de estos constituyentes varían de acuerdo a las fuentes aportantes (UNESCO, 2017).

Tabla 1: Concentraciones de los constituyentes de las aguas residuales domésticas

Constituyentes	Concentración (mg/L)		
	Alta	Media	Baja
<u>Sólidos totales (ST)</u>	1200	720	350
S. en suspensión (SS)	350	220	100
-Volátiles	275	165	80
-Fijos	75	55	20
ST. Disueltos (SDT)	850	500	250
-Volátiles	325	200	105
-Fijos	525	300	145
<u>S. Sedimentables (ml/l)</u>	20	10	5
<u>DBO5</u>	400	220	110
<u>Carbono orgánico total</u>	290	160	80
<u>DQO</u>	1000	500	250
<u>Nitrógeno total</u>	85	40	20
-Orgánico	35	15	8
-Amoniacal	50	25	12
-Nitrito	0	0	0
-Nitrato	0	0	0

Continuación ...

Constituyentes	Concentración (mg/L)		
	Alta	Media	Baja
<u>Fósforo (total en la forma P)</u>	15	8	4
<u>Orgánico</u>	5	3	1
<u>Inorgánico</u>	10	5	3
<u>Cloruros^a</u>	100	50	30
<u>Sulfato^a</u>	50	30	20
<u>Alcalinidad (CaCO₃)</u>	200	100	50
<u>Aceites y grasas</u>	150	100	50

^a Los valores se deben aumentar según estos se encuentren presentes en el suministro de agua (agua de consumo humano)

FUENTE: Adaptado de Muttamara, 1996.

Dentro de los sólidos suspendidos volátiles, presentes en el agua residual doméstica, se encuentra el H₂S en una concentración menor a 1 mg/L (Giraldo y Lozada, 2019; Macías y Padilla, 2021); sin embargo, el H₂S también se encuentra como sólido disuelto volátil (Loaiza, 2021).

2.4. Plantas de Tratamiento de Agua Residual Doméstica-PTARD

El Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM define a las PTARD como “Infraestructuras y procesos que permiten la depuración de las aguas residuales Domésticas o Municipales”, entendiéndose la depuración como la eliminación de los contaminantes del agua para aminorar los riesgos en el medio donde se dispongan finalmente (ANA, 2104 citado en Silva, 2019). Teniendo en cuenta que las PTARD utilizadas en el saneamiento público tratan contaminantes su implementación requiere una previa evaluación de impactos ambientales (Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000 citado en Loaiza, 2021).

El agua residual doméstica que ingresa a una PTARD pasa por tratamientos preliminares, primarios, secundarios y avanzados o terciarios, para depurar la carga contaminante.

2.4.1. Tratamientos preliminares o pre tratamientos

Proceso de separación física de sólidos grandes, sustancias arenosas, aceites y grasas que acompañan al agua residual. Este tratamiento es esencial al inicio de la depuración para evitar el daño de los equipos, infraestructuras, sistemas auxiliares y en los procesos que se encuentran aguas abajo del pretratamiento.

En este tratamiento se utilizan principalmente rejillas, trampas de grasas y desarenadores.

2.4.2. Tratamientos primarios

Proceso de remoción de los sólidos suspendidos y sedimentables (más finos), sin considerar los sólidos disueltos (MVCS, 2016). En este tratamiento se puede llegar a remover hasta la mitad del total de sólidos presente en el efluente (Loaiza, 2021).

Este tratamiento se realiza mediante operaciones físicas como la floculación, el tamizado y la sedimentación.

2.4.3. Tratamientos secundarios o biológicos

Proceso de tratamiento de la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual, por medio de microorganismos que pueden trabajar de forma aerobia o anaerobia. Es en este proceso donde empieza la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO), cuyo valor decrece a medida que se remueve la materia orgánica.

En este tratamiento, se debe adecuar la temperatura, la cantidad de oxígeno disuelto, el pH y la salinidad, de tal forma que permita el buen funcionamiento de los microorganismos. Además, se debe evitar el ingreso de sustancias que impidan la degradación, como los metales pesados, cianuros, fenoles y aceites (Loaiza, 2021).

En la Tabla 2, se muestran los diferentes tipos de tratamientos biológicos utilizados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Tabla 2: Tipos de tratamientos biológicos para las aguas residuales domésticas

Tipo	Proceso
AEROBIO	Lodos Activados
	Reactor biológico de membrana (MBR)
	Reactor de lecho móvil con biofilm (MBBR)
	Lagunas Aireadas
	Digestión Aerobia
	Filtros Percoladores
	Reactores de lecho fijo
ANAEROBIO	Digestión Anaerobia
	Lagunas Anaerobia
	UASB
	Filtro Anaerobio
	Lecho Fluidizado

FUENTE: Adaptado de UNESCO, 2017.

2.4.4. Tratamientos terciarios

“Proceso de tratamiento fisicoquímico o biológico para alcanzar un grado de tratamiento superior al tratamiento secundario” (MVCS, 2006).

Este tipo de tratamiento se utiliza para retirar los contaminantes que continúan en el agua residual después de haber pasado por los tratamientos secundarios (Macías & Padilla, 2021), como es el caso de los sólidos disueltos. Los agentes contaminantes principalmente eliminados en este tratamiento son los huevos de parásitos seguidos de los minerales pesados, virus, detergentes y excesos de fósforo y nitrógeno (Loaiza, 2021).

La cloración es uno de los agentes grandemente utilizado en el tratamiento terciario, ya que elimina microorganismos patógenos del agua residual. Sin embargo, también se utiliza agentes químicos.

Paralelo al sistema de tratamiento de las aguas residuales, o también llamada **línea de agua**, se realiza el tratamiento de los lodos generados en los procesos de tratamiento, conocido

como **línea de lodos**. Este tratamiento puede constar del espesamiento, digestión y deshidratación (Escobar & Montoya, 2020).

2.5. PTARD con tratamiento secundario tipo reactor biológico de membranas (MBR)

Este sistema basa su tratamiento secundario en un proceso aeróbico que consiste en la oxidación biológica (en presencia de oxígeno) de la materia orgánica presente en el agua residual, generando gases y lodos (Pinasseau *et al.*, 2010).

El biorreactor de membrana es un tratamiento de lodos activados con una variante que es la filtración de membranas. En este tipo de sistema el agua residual pasa por módulos de membranas sumergidas o externas en los reactores, las cuales contienen colonias bacterianas que ayudan a mejorar la depuración. Por otro lado, los flóculos de lodo, formados después de la aireación de las aguas residuales, se reingresan al sistema (Pompeu, 2018 citado en Macías & Padilla, 2021).

2.6. Olores ofensivos y odorantes

El olor es la respuesta del cerebro a un estímulo recibido por el olfato humano, provocado por compuestos químicos que son llamados odorantes. El olor se considera contaminante u ofensivo si causa molestias a los sentidos (la percepción del olor es negativa), daños a la salud o el ambiente. Por ello, los olores ofensivos son considerados uno de los causantes de la contaminación del aire o atmosférica (Silva, 2019).

2.6.1. Proceso de recepción del olor

Las moléculas odoríferas u odorantes emitidas desde una fuente determinada son sustancias químicas volátiles que se transportan y diluyen en el aire (dispersión) para finalmente ser percibidas por el olfato humano. La percepción inicia cuando son inhaladas mediante la respiración y se genera una respuesta en el cerebro de la sensación de olor (Escobar & Montoya, 2020), respuesta que varía de acuerdo a las asociaciones mentales o recuerdos que tiene cada persona sobre los olores.

Cuando la respuesta del olor es negativa se presentan molestias que pueden llegar a quejas (Servicio de Evaluación Ambiental, 2017) que repercuten en la depreciación del precio de las propiedades y terrenos cercanos a la fuente de emisión. En la **Figura 1**, se muestra el proceso de emisión, dispersión y respuesta humana al olor.

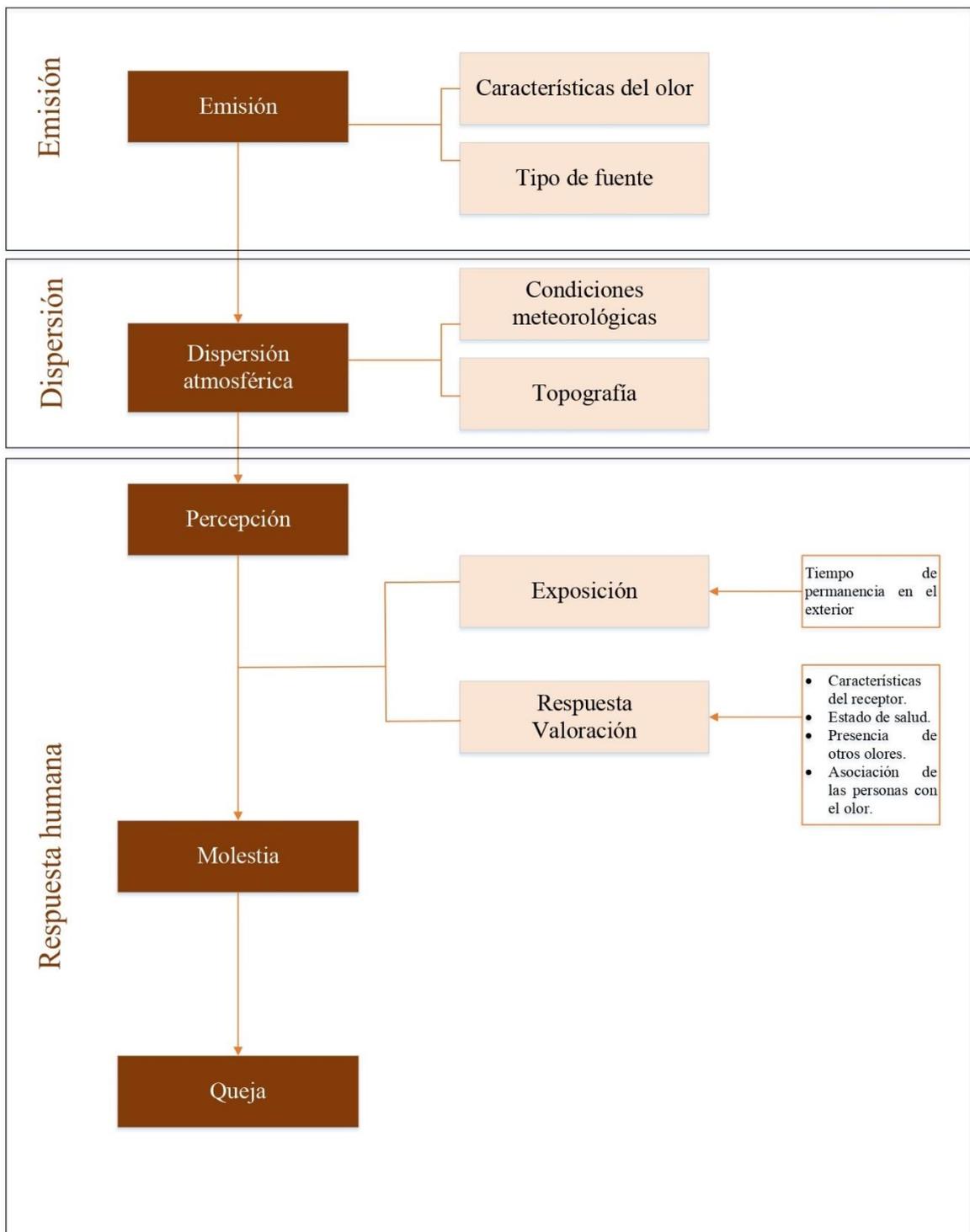


Figura 1. Proceso de emisión, dispersión y respuesta humana al olor

FUENTE: Adaptado de Servicio de Evaluación Ambiental, 2017; basado en Pagans y Odournet, 2013.

2.6.2. Dimensiones de los olores

Los olores se describen de acuerdo a 5 criterios o dimensiones (Brancher *et al.*, 2016):

- **Concentración:** Es la cantidad del olor expresado de dos formas según el método utilizado para su medición. Cuando se realiza con métodos analíticos se expresa en unidades de masa / volumen o ppm y cuando se utilizan métodos sensoriales se expresa en OUE/m³ (Ramírez, 2019 citado en Varela-Bruce & Antileo, 2021), que son Unidades de Olor Europeo por metro cúbico, unidad estandarizada que surge de la norma UNE EN 13725:2004.
- **Intensidad:** Fuerza con la que se percibe el olor relacionado a la concentración.
- **Calidad:** Es la descripción de cómo huele el olor. Para determinar la calidad se utilizan referencias de olores establecidos en rangos de medida. La calidad del olor se puede evidenciar en la rueda de olores desarrollada por McGinley, rueda que se basa en 8 rangos para la caracterización de los olores (florales, medicinales, químicos, del mar, ofensivos, de la tierra, frutales y vegetales). En la Figura 2 se muestra la rueda de olores.
- **Ofensividad / Tono hedónico:** Evaluación del grado de aceptación o rechazo que se origina a partir de las asociaciones mentales (ej.: experiencias personales) hechas por el receptor, sobre determinada concentración del olor.
- **Persistencia:** Velocidad a la que la intensidad y la concentración de un olor se van reduciendo a medida que se dispersa en la atmósfera. Este criterio depende de la naturaleza del compuesto o compuestos químicos que componen el olor y las características meteorológicas donde se encuentra ubicada la fuente de emisión.

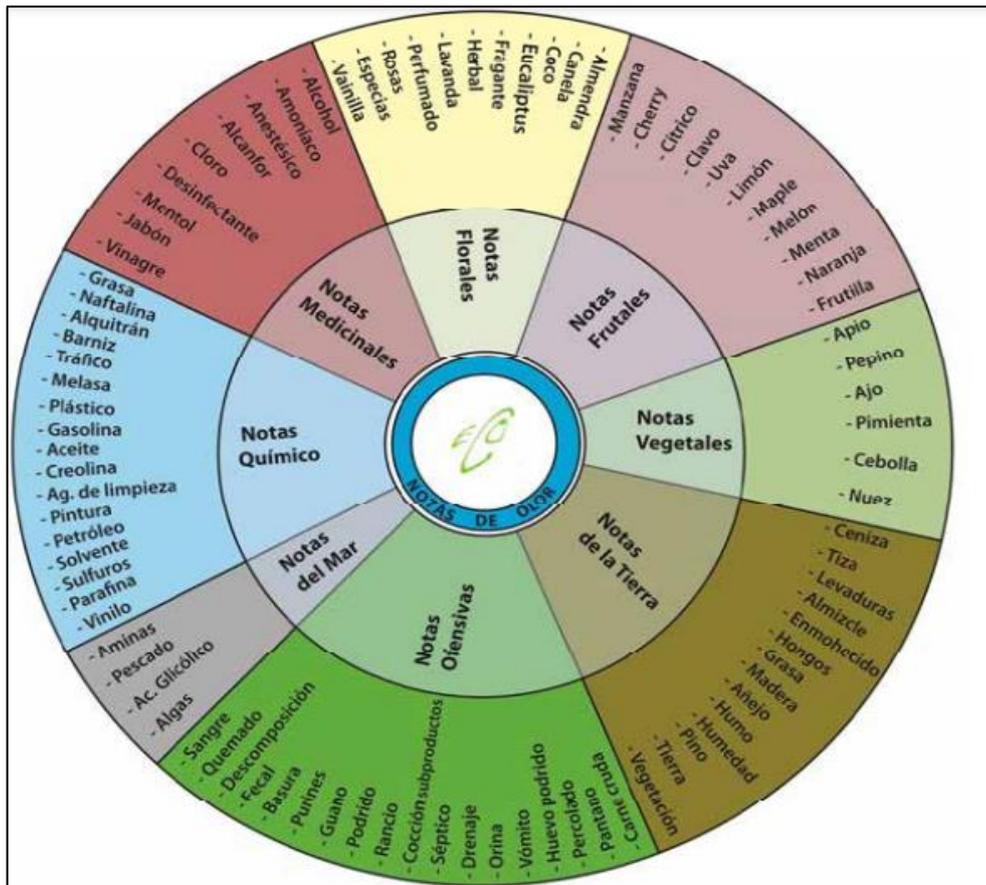


Figura 2. Rueda de olor

FUENTE: McGinley *et al.*, 2020 citado en Servicio de Evaluación Ambiental, 2017.

2.6.3. Umbrales de detección, reconocimiento y molestia de los olores

Otra forma de caracterizar o describir a los olores es mediante los umbrales, que son explicados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), también caracteriza a los olores mediante umbrales (Servicio de Evaluación Ambiental, 2017):

- **Umbral de detección /Umbral de olor:** Mínima dosis de olor que es percibida por el 50% de la población receptora, es decir que a esta concentración se acepta la existencia del olor. Este umbral está relacionado con la dimensión de intensidad del olor (Barrera, 2010).
- **Umbral de reconocimiento o de identificación:** Mínima dosis de olor a la cual el 50% de la población receptora puede determinarlo o definirlo correctamente. Este umbral está relacionado con la dimensión de calidad del olor (Barrera, 2010).
- **Umbral de molestia:** Dosis de olor a la que menos del 5% de la población receptora siente molestias en un tiempo corto. Este umbral está relacionado con la dimensión de tono

hedónico del olor (Barrera, 2010), ya que las molestias provienen de una respuesta negativa del olor provocada por un olor desagradable.

2.7. Emisiones de odorantes en las PTARD

Las PTARD son clasificadas como fuentes de área pasivas (Capelli *et al.*, 2009), cuyas emisiones se producen por la transferencia de los odorantes de la interfaz agua a la interfaz aire, generada por la exposición de la interfaz agua a los agentes atmosféricos. Tanto las PTARD de tratamiento biológico aeróbico como anaeróbico son capaces de generar gases odorantes (Morgan, 2016 citado en Macías & Padilla, 2021).

La concentración inicial de los compuestos odorantes presentes en el agua residual aumenta en la línea de tratamiento, ya que existen procesos que provocan su generación. Asimismo, existen otros procesos dentro de la PTARD que provocan su transferencia al ambiente. Los procesos que contribuyen a la formación de odorantes son la sedimentación primaria y el espesamiento de los lodos, mientras que la transferencia se produce en los desarenadores, el proceso de aireación y en el tratamiento de lodos (Carrera-Chapela *et al.*, 2014 citado en Hernández & Calvo, 2016). Cabe resaltar que, en las primeras etapas del tratamiento de las aguas residuales, tratamientos preliminares y primarios, se evidencian las mayores emisiones de olores (Capelli *et al.*, 2009).

Las causas de generación de olores en los procesos de las PTARD se pueden dividir en dos grandes grupos: el primero relacionado con las condiciones operacionales dentro de cada proceso (Chapela, 2013 citado en Hernández & Calvo, 2016) y el segundo con el diseño y dimensionamiento de la PTARD.

Dentro de las causas de diseño y dimensionamiento de la PTARD resaltan el cálculo incorrecto del caudal de tratamiento (subdimensionamiento), omisión de procesos como la equalización del agua residual o componentes, entre otros (Chapela, 2013 citado en Loaiza, 2021). Por otro lado, en lo que respecta de las causas operacionales, los principales problemas en una PTARD de tipo lodos activados surgen cuando el reactor no está lo suficientemente aireado, el lodo permanece mucho tiempo en el sistema (Calderon, 2015 citado en Macías & Padilla, 2021), el tiempo de retención hidráulica es elevado, o el pH es muy ácido (Loaiza, 2021).

2.8. Tipos de compuestos odorantes en las PTARD

Los compuestos odorantes que producen olores desagradables tienen una masa molar por debajo de 300 g/mol que los hace evaporarse más fácilmente y un umbral de detección bastante bajo (Talaiekhosani *et al.*, 2016) que los hace perceptibles aún a una mínima concentración.

Dado sus olores característicos, el H₂S y el NH₃ son considerados los principales compuestos causantes de los olores en una PTARD (Giraldo & Lozada, 2019), sin embargo, existe una gran lista de otros compuestos odorantes. Dentro de esta lista se encuentran los mercaptanos, alifáticos, sulfuros orgánicos, aminas, ácidos grasos orgánicos volátiles (COVs), entre otros. Según Iglesias (1998) citado en Barrera (2010), los odorantes se pueden clasificar en 3 grandes grupos:

- i. **Compuestos de azufre (sulfuro de hidrógeno, sulfuros orgánicos y mercaptanos):** Formados a partir de la descomposición de compuestos orgánicos que contienen azufre.
- ii. **Compuestos nitrogenados (amoníaco, aminas, indol y escatol):** El amoníaco es el más característico por su olor lacrimógeno, le sigue las aminas que tienen olor a pescado y están presentes en baja concentración en las aguas negras por la orina.
- iii. **Compuestos oxigenados (COVs, aldehídos, alcoholes o cetonas):** Estos compuestos se producen por la oxidación de los carbohidratos, en ausencia de oxígeno, que provoca un olor avinagrado.

Como se evidencia en la Tabla 3, de todos los compuestos odorantes, los azufrados son los que presentan el umbral de detección más bajo (< 1 ppm), por consiguiente, aún en pequeñas concentraciones pueden provocar olores desagradables. Este es el caso del H₂S, cuyo umbral de detección es de 0.01-0.3 ppm (Guiadotti, 1996), lo que lo vuelve un marcador químico o gas representante en una muestra de olor (Ramírez, 2019). La Resolución 1541 de Colombia incluso determina al H₂S como el único gas odorante representativo de la actividad de las PTAR y considera a este gas como la primera línea de análisis de los olores en una PTAR.

Tabla 3: Composición de los odorantes en las PTAR

Clasificación	Compuesto	Fórmula química	Olor que se asemeja	Masa Molar (g/mol)	Umbral de detección
Sulfuros	Metilmercaptano	CH ₃ SH	Repollo podrido ajo	48	0.0016
	Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	Huevo podrido	34	0.34
Nitrogenados	Amoniaco	NH ₃	Irritante	17	5
Compuestos orgánicos volátiles	Tolueno	C ₇ H ₈	Goma Bolas de naftalina	92.14	5
	Benceno	C ₆ H ₆	Dulce, solvente	78.11	60-100

FUENTE: Extraído de Hernández y Calvo, 2016 que fue adaptado de Stuetz y Frechen, 2001.

2.9. Efectos en la salud causados por los olores de una PTARD

Los olores generados por las PTARD tienen dos formas de afectar la salud: el primero ocurre por la exposición a altos niveles de olor y el segundo por la exposición prolongada a niveles no significativos. Entre los efectos causados por altos niveles de olor, se encuentra la irritación sensorial, dolor de cabeza, insomnio, problemas respiratorios, náuseas, pérdida de apetito, estrés, irritación, roqueras, diarrea, congestión nasal y palpitaciones; de igual modo, entre los efectos causados por exposición prolongada a niveles no significativos de olores, se encuentran las sensaciones de picor, náuseas, vómitos, dolor de cabeza, estrés y problemas nutricionales (Giraldo & Lozada, 2019).

2.10. Formación de H₂S en las PTARD

El H₂S es el gas odorante más relevante en una PTARD, ya que no solo tiene una alta concentración en el agua residual que ingresa a tratamiento (Dinçer *et al.*, 2020), si no que se genera en el medio acuoso por la descomposición microbológica de la materia orgánica,

proteínas y compuestos químicos que contienen azufre en su composición³. Además, este gas es capaz de transferirse de la interfaz agua a la interfaz aire, lo que lo diferencia de otros compuestos químicos que generan malos olores (Locateli *et al.*, 2018).

En condiciones aireadas y aeróbicas el H₂S, presente en las capas superficiales de un reactor biológico, es degradado por bacterias quimiotróficas como las *Thiobacillus sp.* Incluso el azufre acumulado en las capas más profundas queda expuesto al oxígeno e inmediatamente se oxida biológica o químicamente. En estas condiciones aeróbicas, las bacterias empiezan a oxidar el azufre elemental cuando las concentraciones del H₂S bajan casi a cero. Las reacciones se muestran en la Figura 3.

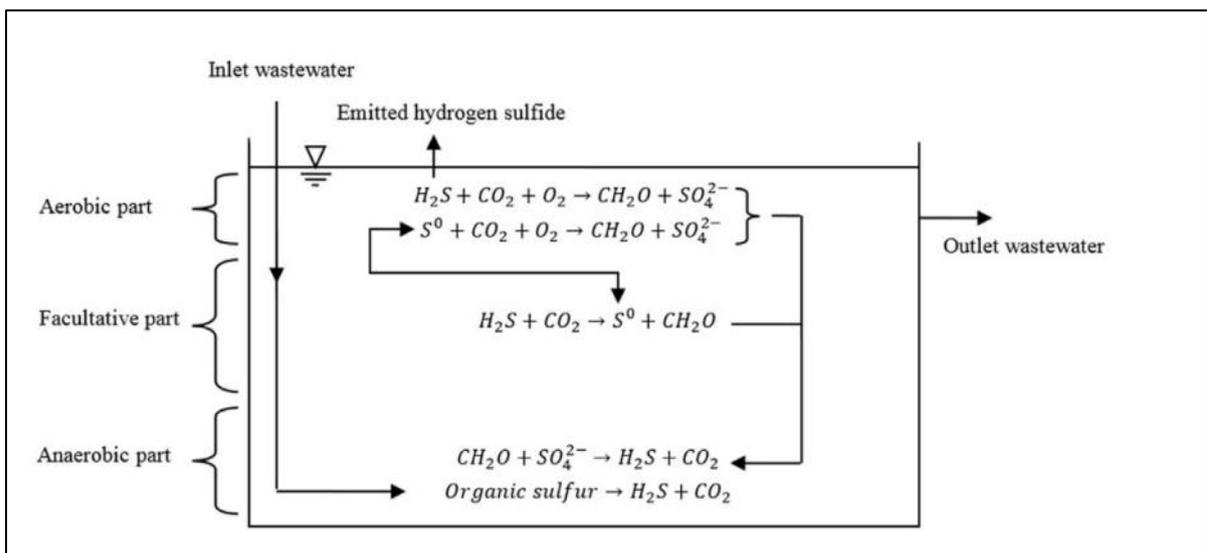


Figura 3. Comportamiento del H₂S en reactores biológicos

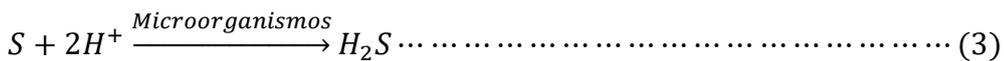
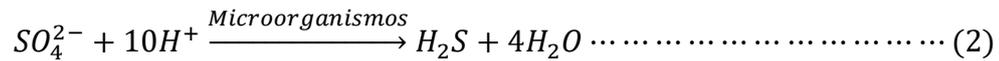
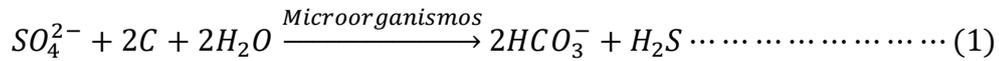
FUENTE: Ciclo del azufre en un reactor, extraído de Talaiekhosani *et al.*, 2016.

En el agua residual, la cantidad de oxígeno disuelto se va agotando naturalmente a medida que avanza por la tubería hacia su tratamiento (Giraldo & Lozada, 2019). Por ello, en una PTARD de tratamiento biológico aeróbico es importante mantener el nivel de oxígeno disuelto no menor a 1 mg/L (Giraldo & Lozada, 2019). Cuando esto no sucede, las bacterias sulfo-reductoras encontradas en las capas bajas de los reactores (caracterizada por la acumulación de sedimentos, poca aireación y temperatura elevada) emplean el oxígeno del ion SO₄²⁻ presente en el agua residual, que funciona como aceptor final de electrones en la degradación de la materia orgánica, generando así más H₂S (ver ecuación 1) (Lewkowska *et*

³ Los compuestos azufrados presentes en la materia orgánica y proteínas son denominados sulfuros orgánicos y los presentes en los compuestos químicos denominados sulfuros inorgánicos y sulfatos.

al., 2016 citado en Escobar & Montoya, 2020). Incluso si hay otros compuestos orgánicos azufrados, estas bacterias llegan a degradarlos generando H₂S (Talaiekhzani *et al.*, 2016). Las reacciones se resumen en la Figura 3 y en la ecuación (1).

Ecuaciones que explican la generación del H₂S



FUENTE: Cycling of sulfur in sulfuretum, adaptado de Talaiekhzani *et al.*, 2016.

Otra de las formas en que se genera H₂S en las PTARD es en condiciones ácidas, Talaiekhzani *et al.* (2016) menciona que en estas condiciones el ion sulfato o el azufre elemental pueden formar este gas. Las reacciones se muestran en la ecuación (2) y (3).

Después de haberse generado el H₂S en el medio acuoso, la transferencia a la interfaz aire ocurre cuando se reduce la solubilidad del sulfuro de hidrógeno en el agua residual, producido por un aumento de la temperatura. Es decir, se reduce la capacidad del gas de disolverse produciendo su evaporación y desgasificación. Como se menciona, las temperaturas altas ($\geq 24^\circ C$)⁴ en el agua residual promueven la transferencia (Ver Figura 4). Por ello Locateli *et al.* (2018) indica que las mayores concentraciones de H₂S en una PTARD se producen durante el verano que es cuando la temperatura del ambiente se eleva e incrementa la temperatura del agua.

⁴ Valor extraído de la Figura 4, considerando una emisión de 0 ppm de H₂S.

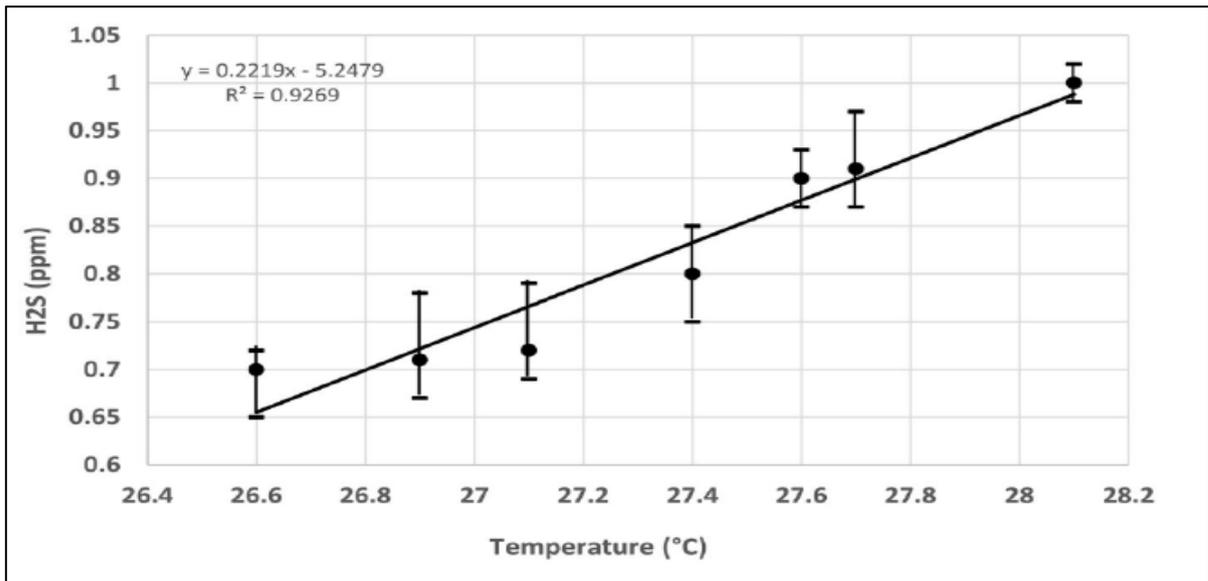


Figura 4: Ecuación utilizada para determinar la emisión de H₂S en una PTARD, a partir de la temperatura del agua residual doméstica.

Nota: Para la elaboración del modelo de predicción de las emisiones de H₂S se mantuvo un pH de 7.2-7.4 en el agua residual, de tal forma que este parámetro no influya en la transferencia del gas. Asimismo, se mantuvo un nivel de oxígeno disuelto igual a 0 para fomentar la generación de H₂S.

FUENTE: Correlación entre las concentraciones de H₂S y la temperatura a la salida del tratamiento primario de una PTARD (Mohamed & Alshalahi, 2021).

Por otro lado, el descenso del pH 7 y la turbulencia en los procesos de las PTARD (ej.: alta velocidad de la corriente de ingreso), son factores que también contribuyen a la transición del H₂S de la interfaz agua a la interfaz aire, aumentando así su concentración en el aire (Halageri, 2012 citado en Baawain *et al.*, 2017, Mohamed & Alshalahi, 2021).

Es así que Talaiekhzani *et al.* (2016) indica que la generación del H₂S en la PTARD depende de los tipos de compuestos azufrados presentes en el agua residual, la cantidad de materia orgánica y proteínas, el nivel de oxígeno disuelto, el pH, la temperatura y el control operacional de la planta que eviten las condiciones anaeróbicas y la formación de turbulencias.

2.11. Efectos en la salud generados por el H₂S

Los efectos molestos del H₂S (gas con olor característico a huevo podrido) se producen a bajas concentraciones como se expresa en los umbrales de olor: el umbral de detección del H₂S está en un rango de 0.2-2 µg/m³ y el de reconocimiento entre 0.6-6 µg/m³ (WHO EUROPE, 2000).

Además de los efectos molestos, se ha comprobado su toxicidad no carcinógena⁵ para los seres humanos, la cual está más relacionado con la concentración que el tiempo de la exposición. (Guidotti, 1996).

Los efectos relacionados a la salud comienzan a manifestarse a concentraciones más elevadas que los efectos molestos. Según Guidotti (1996), estos efectos pueden aparecer en concentraciones de 1-5 ppm (equivalente a 1 400-7 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $T=25^\circ$, $P=1$ bar) provocando náuseas, lagrimeos en los ojos, dolores de cabeza y pérdida de sueño. Los efectos se intensifican a medida que aumenta la concentración, siendo las concentraciones de 500 ppm (equivalente a 700 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $T=25^\circ$, $P=1$ bar) letal (Silva, 2019).

En la Tabla 4 se muestra los efectos en la salud a concentración superiores a 10 ppm (equivalente a 140 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $T=25^\circ$, $P=1$ bar).

Tabla 4: Efectos en la salud a diferentes concentraciones de H_2S en el aire

Concentración de H_2S		Efecto
mg/m^3	ppm	
1400-2800	1000-2000	Colapso inmediato de la respiración con la parálisis
742-1400	530-1000	Fuerte estimulación del SNC, hiperpnea seguido de un paro respiratorio
448-742	320-530	Edema pulmonar con riesgo de muerte
210-350	150-250	Pérdida del sentido olfativo
70-140	50-100	Lesiones oculares graves
14-28	10-20	Irritación de los ojos

Nota: Para la conversión de ppm a mg/m^3 se consideró una $P=1$ bar y $T=25^\circ\text{C}$

FUENTE: Adaptado de WHO EUROPE, 2000.

La relación entre rangos de concentraciones y los efectos producidos pueden variar de acuerdo a la preexistencia de una condición de salud de las personas expuestas. Por ejemplo, los efectos deberían ser leves a una concentración de 2 ppm, pero se producen obstrucciones bronquiales en personas asmáticas (Austigard *et al.*, 2018). En efecto, las personas con un

⁵ Característica de una sustancia que pueda causar daños a la salud, pero no el desarrollo del cáncer.

problema de salud preexistente tienden a ser más sensibles, lo que causa que perciban los efectos de los malos olores como más intensos (Environment Agency, 2002).

Según Locateli *et al.* (2018), si se va a tener una exposición constante al H₂S, la concentración de inhalación debe ser inferior a 2 µg/m³ para reducir los riesgos a largo plazo en la salud.

Aunque existen numerosos estudios que abordan la toxicidad del H₂S, es importante comprender que el peligro de este gas también recae en su alto grado de explosividad. Su rango de concentración en el aire oscila entre el 4.5-45.5%, lo que lo convierte en un riesgo inminente para los operadores de PTARD y otras fuentes de emisión de H₂S (Escobar & Montoya, 2020).

2.12. Métodos de medición de olores

La medición de los olores se hace bajo metodologías establecidas en normas técnicas (Servicio de Evaluación Ambiental, 2017). Según, estas normativas, los métodos para medir las concentraciones de los olores, in situ, se dividen en:

2.12.1. Métodos Analíticos

Son técnicas que identifican cuantitativamente los compuestos químicos presentes en un olor (mezcla de gases), a través de mediciones de cada compuesto para obtener la concentración global del olor (Giraldo & Lozada, 2019). Dentro de los métodos analíticos se destacan los siguientes:

i. Sensores para gases no específicos (Narices Electrónicas)

Según Ramírez (2019), los detectores electrónicos forman parte de este método. El parámetro utilizado en esta técnica es la nariz electrónica, el cual es un equipo que lee señales electrónicas de diferentes gases, a partir de sensores.

Estos sensores buscan imitar el sistema sensorial humano, están basados en sensores químicos que recolectan datos de los compuestos que forman el olor, para luego estos ser definidos con patrones de olor.

ii. Cromatografía de gases

Técnica utilizada para identificar y cuantificar los compuestos presentes en una mezcla de gases que forman el olor.

iii. Medición de gases específicos

Técnica que consiste en medir con equipos de monitoreo/sensores las concentraciones de los compuestos químicos que forman el olor. Estos análisis se realizan para cada compuesto químico.

Dentro de este método se encuentran las técnicas de muestreadores pasivos como la espectrometría y los colorimétricos con los tubos colorimétricos. El análisis de ese último consiste en hacer pasar una muestra de olor por un tubo con un medio que reacciona a cierto tipo de gas, si el medio cambia de color quiere decir que el gas odorante está presente en la muestra; por medio de una escala se puede medir la concentración del gas en la muestra (Barrera, 2010).

Según Pando (2019) y Martínez (2020), el tren de muestreo utilizado para evaluar la calidad del aire (concentración en inmisión) también puede ser utilizado para medir las concentraciones del gas odorante H₂S. Este equipo, es avalado por el protocolo, cuya técnica consiste en succionar una muestra de aire, el cual se hace pasar por una solución de sulfato de cadmio que adsorbe el H₂S y finalmente con la fluorescencia ultravioleta se determina la concentración del gas.

2.12.2. Métodos Sensoriales

Este método permite evaluar cuantitativamente el olor a través de las dimensiones del mismo, utilizando el olfato humano (Capelli *et al.*, 2013).

Ramírez (2019) indica que los métodos sensoriales se dividen en dos grandes grupos: los paramétricos (sin instrumentación) y los cuantitativos (con instrumentación).

PARAMÉTRICOS:

i. Psicometría

En este método se utilizan encuestas que son atendidas por los receptores afectados por los odorantes. Estas encuestas son utilizadas para un análisis estadístico que determinará el área más afectada por la fuente de emisión.

ii. Inspecciones de campo

Se registra el grado de molestia por medio de la estimación de un grupo de personas (panel) capacitada para clasificar.

CUANTITATIVOS:

i. Olfatometría

Es una técnica sensorial que utiliza un olfatómetro, equipo, que mide las emisiones de olor en las fuentes emisoras (emisión). Los datos obtenidos se utilizan para predecir la dispersión de los olores y finalmente conocer sus concentraciones en la ubicación del receptor (inmisión).

El olfatómetro funciona ingresando un gas neutro que diluye el gas oloroso captado hasta una concentración que sea percibida por al menos el 50% de los operadores del equipo (Giraldo & Lozada, 2019). Este equipo es utilizado por un panel de expertos quienes detectan los olores.

La olfatometría es un método estandarizado por los EE. UU (norma técnica ASTM E679-04), Europa (norma técnica EN 13725:2003), entre otros países; siendo los modelos de olfatómetros más utilizados el Scentometer y el Nasal Renger (McGinley y McGinley, 2004 citado en Brancher *et al.*, 2016).

Dentro de la olfatometría existen dos tipos: la olfatometría dinámica y la olfatometría de campo. La diferencia es que la primera la muestra de olor es analizada en un laboratorio, mientras que en la segunda en campo (Barrera, 2010).

La medición de la concentración de los olores proporciona información real del periodo de muestreo y es de carácter muestral, ya que no es posible medir la concentración de los olores en cada posición de los receptores. Por ello, se debe completar la información con modelos de dispersión atmosférica (Brancher *et al.*, 2016).

2.13. Dispersión de olores y odorantes

La contaminación por los olores se inicia con su emisión desde la fuente de contaminación, posterior a ello, se produce su dispersión formándose una pluma de contaminación (área en la cual el olor puede ser claramente reconocido) (Carrasco, 2022; Copes, 2022).

La dispersión describe el transporte de un contaminante en la atmósfera, teniendo en cuenta procesos que influyen en su transporte como la advección, difusión y reacción (Chapela, 2013 citado en Loaiza, 2021). Se ve afectada por las condiciones meteorológicas como el periodo horario (día/noche), la velocidad y dirección del viento. También se ve afectada por

la geografía y presencia de obstáculos físicos como edificios altos y grandes árboles (Stellacci *et al.*, 2010; Silva, 2019).

Los factores que afectan la dispersión de los contaminantes están relacionados entre ellos. A continuación, se describen a mayor detalle:

i. Velocidad y dirección del viento

Según Stuetz y Frenchen (2001) citado en Hernández y Calvo (2016), la dirección del viento presenta gran influencia en la dispersión de los olores, ya que determina la dirección del transporte del olor y revela la distancia entre las fuentes de contaminación y los receptores. Por otro lado, la velocidad del viento disuelve y dispersa los olores; a mayor velocidad del viento la dispersión aumenta, generando que la concentración de los contaminantes disminuya en puntos cercanos a la fuente, al contrario que una menor velocidad que tiene el efecto contrario, es decir disminuye la dispersión (DGAAM, 2007).

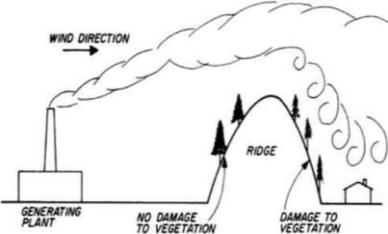
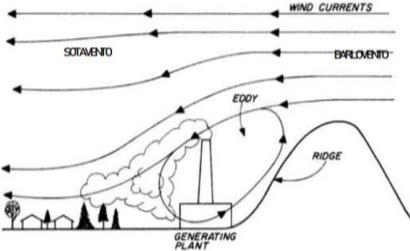
ii. Turbulencia atmosférica

La capa límite es la porción de la tropósfera influenciado por la superficie de la tierra, esta capa se extiende desde la superficie hasta aproximadamente 1 km. En esta capa, los gases contaminantes son afectados por la turbulencia mecánica producida por la presencia de obstáculos, velocidad del viento y la topografía accidentada del terreno. Los contaminantes también son afectados por la turbulencia térmica producida por el calentamiento y enfriamiento de la superficie de la Tierra que provoca su dispersión. En estos dos tipos de turbulencia, se produce una mezcla y movimiento desordenado de la pluma de contaminación de modo horizontal y vertical provocando torbellinos. Según Copes (2022), mientras mayor sea la turbulencia la dispersión aumentará y la concentración de los contaminantes disminuirá.

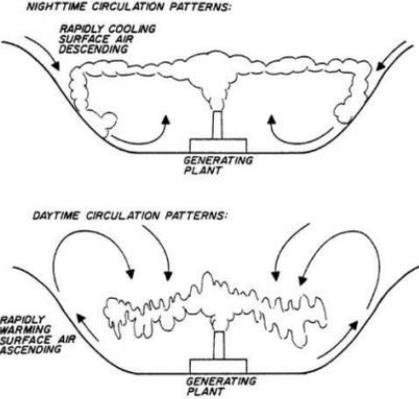
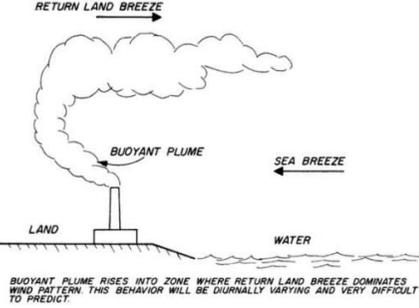
iii. Factores de topografía local / Presencia de obstáculos

Según Beltranena y Hernández (2016), este factor es el más influyente para la dispersión de los gases odorantes como el H₂S. En la Tabla 5, se explica su influencia en la dispersión.

Tabla 5: Efectos de la topografía local en la dispersión de contaminantes

Descripción gráfica	Casuística	Efecto
	<p>Dispersión en presencia de cresta de una montaña u obstáculo alto, cuando el aire sopla en dirección a barlovento.</p>	<p>La pluma se dispersa a su lado izquierdo, pero en el derecho la pluma baja su densidad y es empujada a la superficie provocando daños a nivel del suelo, por su alta concentración a este nivel.</p>
	<p>Dispersión en presencia de cresta de una montaña u obstáculo alto, cuando el aire sopla en dirección a sotavento.</p>	<p>El aire empuja a la pluma, haciendo que este se desplace en la dirección vertical generando un vórtice que provoca mayores concentraciones en zonas cercanas, es decir que no facilita la dispersión.</p>

Continuación ...

Descripción gráfica	Casuística	Efecto
 <p>The top diagram, titled "NIGHTTIME CIRCULATION PATTERNS:", shows a cross-section of a valley with a "GENERATING PLANT" at the bottom. Arrows indicate "RAPIDLY COOLING SURFACE AIR DESCENDING" down the slopes, creating a stable layer of air that traps the plume from the plant. The bottom diagram, titled "DAYTIME CIRCULATION PATTERNS:", shows the same valley with "RAPIDLY WARMING SURFACE AIR ASCENDING" up the slopes, which disperses the plume upwards and outwards.</p>	<p>Dispersión en presencia de dos crestas de una montaña u obstáculos altos, formando un valle.</p>	<p>Cuando los vientos son débiles, el aire se estanca y la pluma de contaminación puede ser arrastrado a la superficie. Esto sucede especialmente en las noches y en invierno. Por otro lado, durante el día el aire fluye por las laderas, recibiendo calor a medida que asciende. La pluma se abre en abanico.</p>
 <p>The diagram shows a "LAND" area with a "GENERATING PLANT" emitting a "BUOYANT PLUME". To the right is "WATER". A "SEA BREEZE" arrow points from the water towards the land. A "RETURN LAND BREEZE" arrow points from the land back towards the water. A caption at the bottom states: "BUOYANT PLUME RISES INTO ZONE WHERE RETURN LAND BREEZE DOMINATES WIND PATTERN. THIS BEHAVIOR WILL BE DIURNALLY VARYING AND VERY DIFFICULT TO PREDICT."</p>	<p>Fuente de contaminación en la costa, cerca de una gran fuente de agua</p>	<p>Durante el día, la masa de aire proveniente de la fuente de agua es más fría y densa que el aire cerca de la fuente, suceso que provoca una elevación de la pluma de contaminación. Este fenómeno de circulación se invierte por la noche.</p>

FUENTE: Adaptado de Chermisinoff, 1993; citado en Carrasco, 2022.

iv. Periodo del día

En el día la radiación intensa del sol es absorbida por la tierra que irradia esta radiación en forma de calor. Esta irradiación calienta las masas de aire de las capas próximas al suelo, hecho que provoca la disminución de su densidad y su ascenso. De esta manera se produce la mezcla del aire que favorece la turbulencia y la dispersión (Cabrera, 2012).

En la noche la dispersión del olor y sustancias olorosas es débil o nula, debido a:

- Fenómeno de inversión térmica que se provoca por el aumento de la temperatura sobre una superficie ya enfriada, limitando así la mezcla y evitando la dispersión vertical.
- Los vientos débiles y condiciones de calma que provocan la acumulación de los olores en zonas cercanas a la fuente de emisión.

v. Estabilidad atmosférica

El fenómeno provoca el movimiento vertical de masas de aire hacia arriba y hacia abajo, provocado por la turbulencia. Este fenómeno se manifiesta en tres grandes categorías: condición estable (cuando el movimiento vertical no se produce), neutra (cuando el movimiento vertical es escaso) e inestable (cuando el movimiento vertical es continuo) (ver Tabla 6) (Copes, 2022).

Tabla 6: Tipos de estabilidad atmosférica

Tipo	Descripción conceptual
Neutro	La concentración de los contaminantes aumenta en un punto cercano a la fuente, ya que la dispersión tanto horizontal como vertical, es casi nula (Copes, 2022). En estas condiciones la dispersión se verá más influenciada por turbulencias mecánicas que por la térmica (CESEL Ingenieros, 2007).
Estable	No se produce la dispersión vertical. Sin embargo, si se produce la dispersión de manera horizontal. La mezcla de los contaminantes es baja. Se produce normalmente cuando la radiación es inexistente, suceso que se produce por la noche.
Inestable	La presencia de turbulencia mecánica y térmica ocasiona esta categoría. Aumenta la dispersión de los contaminantes y producen su mezcla vertical.

FUENTE: Adaptado de OPS,2012, citado en Copes 2022.

No obstante, Pasquill-Gifford-Turner define la estabilidad en 6 categorías, a partir de las 3 categorías primarias. Estas categorías se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Clases de Estabilidad atmosférica, según Pasquill-Gifford-Turner

Categoría	Estabilidad
A	Extremadamente inestable
B	Moderadamente inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Ligeramente estable
F	Moderadamente estable

FUENTE: Extraído de Copes, 2022.

2.14. Modelos de dispersión atmosféricas

Los modelos de dispersión son simulaciones matemáticas de cómo los contaminantes se dispersan y transforman en la atmósfera, impactando en el medio circundante (DGAAM, 2007). Estos modelos son una herramienta que puede ser utilizada para estimar la dispersión del olor proveniente de una fuente y para conocer las concentraciones de ésta en la ubicación de los receptores. La base informativa que brinda estos modelos, ayuda a definir y establecer controles para evitar las quejas por olor (Latos *et al.*, 2010 citado en Hernández & Calvo, 2016).

Muchos autores indican que los modelos de dispersión son una herramienta imprescindible para evaluar la calidad del aire y la criticidad de los impactos de los contaminantes emitidos desde una fuente. Además, es la única herramienta para evaluar el impacto en situaciones futuras, como la implementación de una nueva PTARD o implementación de modificaciones en las PTARD.

Los modelos de dispersión pueden aterrizar en los siguientes resultados (Brancher *et al.*, 2016):

- Gráficos de concentraciones iguales en diferentes puntos, conocidas como isolíneas, las cuales pueden diseñarse para mostrar la distribución espacial de las concentraciones de olor enmarcados por los niveles máximos permisibles de la concentración del olor.

- Tablas de información sobre concentraciones del olor a diferentes distancias.

La modelación de la descarga del contaminante se realiza basándose en el escenario donde ocurre la contaminación, que puede ser simple (ej.: una sola fuente en un terreno llano) hasta complejo (ej.: varias fuentes en terrenos abruptos con mayor influencia topográfica). La modelación también se basa en el tipo de fuente de emisión, el cual puede ser de los siguientes tipos: lineales, volumétricas puntuales o de área (DGAAM, 2007).

Los datos de entrada para los modelos son los datos meteorológicos, información del tipo y locación de las fuentes de emisión. Por ello, para determinar la elección de un modelo de dispersión se debe sincerar la disponibilidad de datos de entrada con los que se contará, ya que un modelo que requiere datos de entrada detallados y precisos no deberá usarse cuando estos datos no estén disponibles.

Los modelos de calidad de aire pueden ser clasificados en varias clases genéricas (modelos gaussianos, eulerianos, lagrangianos, etc) y dentro de cada clase existir algoritmos computacionales individuales (DGAAM, 2007) (Pluma gaussiana, aermod, puff, entre otros). Por esta razón, existen diferentes tipos de modelos de dispersión, de entre ellos existen 113 desarrollados por los países de Europa (European Environment Agency, 2007) y más de 8 avalados por la EPA (Environmental Protection Agency) en la Guía de Modelos de Calidad de Aire del servicio de asesoramiento e información sobre modelamiento de calidad de aire, llamado SCRAM por las abreviaturas de *Support Center for Regulatory Air Modelling* (European Environment Agency, 2007).

Dada la cantidad de modelos de dispersión, se debe escoger su uso basándose en tres aspectos:

- El tipo de estudio, considerando el tipo de fuente de emisión.
- La escala regional, urbano o local (ver Tabla 8) en que está ocurriendo el proceso de contaminación (Abanto & Villoslada, 2022).
- Los recursos disponibles con los que se cuenta (por ejemplo, la data meteorológica, recursos computacionales, competencias técnicas del personal que realiza el modelamiento, entre otros).

Tabla 8: Tipo de modelo de dispersión para diferentes escalas de trabajo

Descripción	Local (1-1000 m)	Urbano (1-300 km)	Regional (25-10 000 km)
Tipo de modelo	Gaussiano y modelos parametrizados no gaussianos Modelos estáticos Modelos dinámicos Modelos lagrangianos de partículas	Gaussiano y modelos parametrizados no gaussianos Modelo de transporte químico euleriano. Modelos lagrangianos de partículas	Modelo de transporte químico euleriano. Modelos químicos lagrangianos.

FUENTE: Adaptado de European Environment Agency, 2011.

A pesar que los modelos de dispersión son bastante usados por las autoridades de diversos países, los autores concuerdan que ningún modelo de dispersión es perfecto y que presentan incertidumbre tanto del modelo como a los datos de entrada.

2.14.1. Modelos gaussianos

Estos modelos permiten calcular las concentraciones de un contaminante a nivel del suelo, estiman la dispersión horizontal y vertical de una pluma de contaminación, para ello, utiliza fórmulas matemáticas gaussianas. Los modelos asumen que la concentración del contaminante disminuye en la dirección del viento (Cabrera, 2012).

Son modelos comunes usados para dispersión de contaminantes que no reaccionan con otros compuestos (no se toma en cuenta las reacciones fotoquímicas) y mayormente provenientes de fuentes puntuales (U.S. EPA, 2015 citado en Abanto & Villoslada, 2022), aunque también son utilizados en fuentes de área (Barrera Curihuentro, 2010 citado en Hernández & Calvo, 2016).

El grado de precisión del modelo gaussiano disminuye al ser usado para zonas con relieve y características de atmósfera complejas (Cabrera, 2012 citado en Carrasco, 2022). También disminuye a velocidades muy bajas, porque no modelan correctamente velocidades de viento de menos de 0,5 m/s.

Según la DGAAM (2007), en una dispersión gaussiana, se asume lo siguiente:

- La velocidad y dirección de viento se mantienen constantes en el tiempo.

- No hay compuestos absorbidos por el agua, suelo o vegetación.
- No se produce la transformación química de los compuestos presentes en la pluma de contaminación.
- La pluma se expande de forma cónica.

Capelli (2013) indica que estos modelos son de los más utilizados para la dispersión de odorantes, sin embargo, para su modelización deben tenerse en cuenta las peores condiciones.

Dentro de la clase gaussiana, se encuentran los siguientes modelos:

i. Penacho gaussiano

Este modelo determina la estabilidad a través de coeficientes de dispersión empíricos ya establecidos, que son los de coeficientes de Pasquill-Gilfford-Turner (Capelli *et al.*,2013), a diferencia de otros modelos más sofisticados que utilizan datos meteorológicos para determinarla. Asumen emisiones continuas de gases en condiciones estacionarias (no hay condiciones de calma, inversiones térmicas, entre otros) y que no hay reacciones entre estos. En este modelo se considera al viento uniforme en todo el dominio (viento en una única dirección rectilínea), que no hay turbulencia y la topografía del lugar es plana. Este es un modelo utilizado en fuentes de áreas (Barrera, 2010 citado en Hernández & Calvo, 2016).

ii. Aeromod

Es un modelo gaussiano más complejo, de estado estacionario, que incorpora la dispersión basada en comportamientos de la turbulencia en la capa límite planetaria. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) reconoce al AEROMOD como el único modelo aplicable a todo tipo de fuentes (Environmental Protection Agency, 2017), fuentes de área (ej.: PTARD), de volumen (ej.: Edificios) y puntuales (ej.: chimeneas).

Muchos autores concuerdan que, con este modelo, además de estimar las concentraciones de los contaminantes primarios, también es posible estimar los niveles de olores.

2.14.2. Modelos Lagrangianos

Dentro de los modelos Lagrangianos, también llamados tipo puff, el Calpuff es el más usado incluso para la dispersión de odorantes (Capelli, 2013). Este modelo avalado por la US EPA se utiliza para evaluar la calidad de aire en un flujo atmosférico no estacionario y simula los

efectos de las condiciones meteorológicas que varían en el transporte de la contaminación, transformación y eliminación.

Es adecuado para las estimaciones de una o varias fuentes industriales (Capelli *et al.*, 2013). Sin embargo, debe ser utilizado principalmente para fuentes puntuales, ya que, presentan dificultades con fuentes de tipo área (Carrasco, 2022).

Este modelo es útil para determinar concentraciones de contaminantes a largas distancias (>50 km), en terrenos de topografía compleja donde se dificulta el uso del AERMOD. Además, es recomendable utilizarlo en áreas cercanas a cuerpos de agua (Barclay *et al.*, 2014 citado en Hernández & Calvo, 2016). Se debe tener en cuenta que el Calpuff utiliza coeficientes de dispersión calculados, por ello requiere una cantidad significativamente mayor de datos para poder ejecutar el modelo.

2.14.3. Modelos eulerianos e híbridos

Estos modelos trabajan con data meteorológica tridimensional (consideran los componentes verticales y horizontales del viento), a largas distancias dada su gran resolución espacial. Por ello, requieren mucho tiempo de cálculo para las variables de entrada (Carrasco, 2022). Dentro de estos modelos se encuentra el WRF-CHEM y el CMAQ (Varela-Bruce & Antileo, 2021).

2.15. Factor y tasa de emisión de olor

Para analizar la contaminación odorífica, mediante el modelamiento de los olores, se requiere de un factor de emisión o de una tasa de emisión de olor, el cual puede ser obtenido a partir de un factor de olor.

2.15.1. Factor de emisión de olor

Los factores de emisión de olor (OEF por sus siglas en inglés) o de odorantes son un valor representativo que se expresa como la relación entre la concentración del olor y una unidad de actividad asociada con la emisión del olor, que pueden ser datos de producción, horas de operación de la fuente del olor, entre otros (Radian Coporation, 1996 citado en Servicio de Evaluación Ambiental, 2017). Según Capelli *et al.* (2009), en el caso de una PTAR esta unidad de actividad debe ser el caudal medio anual de tratamiento de la planta, aunque también puede ser otro dato basado en la composición del agua residual (calidad del agua), los tratamientos, o condiciones en el tratamiento (Servicio de Evaluación Ambiental, 2017).

Los factores de emisión se utilizan para estimar las concentraciones de las emisiones del olor o de las sustancias químicas que componen el olor, provenientes de una actividad o una fuente cuando no se cuente con información real del entorno y/o no se puedan realizar mediciones de la concentración directamente de la fuente (ej.: en nuevos proyectos). Estos factores son considerados una pieza clave para modelar la dispersión de los contaminantes en el aire (EPA, 2023), ya que brindan información de la concentración de los contaminantes que estos modelos requieren.

El Servicio de Evaluación Ambiental (2017) recomienda el uso de los factores de emisión estandarizados en normativas técnicas. Este tipo de factores están basados en cálculos de balance de masas, estimaciones de ingeniería, modelaciones o criterios técnicos (EPA, 2023). La EPA establece factores de emisión de contaminantes atmosféricos en la Norma técnica AP-42, que se resumen en el servicio WEB llamado “WebFIRE”; sin embargo, no establece el factor de emisión para olores, ni para el H₂S que proviene de PTARD, o cuya actividad esté relacionada con el agua residual doméstica.

A partir de los factores de emisión se calcula la tasa de emisión de olores o de odorantes (OER por sus siglas en inglés) (Capelli *et al.*, 2009), el cual es un dato de entrada para los modelos de dispersión de tipo gaussianos.

Expresión para hallar la Tasa de Emisión a partir de un Factor de Emisión:

$$\textit{Tasa de Emisión} = \textit{Factor de Emisión} \times \textit{Actividad}$$

Según Capelli *et al.* (2009), en el caso de PTARD la expresión quedaría de la siguiente forma:

$$\textit{Tasa de Emisión} = \textit{Factor de Emisión} \times \textit{Caudal de tratamiento}$$

2.15.2. Tasa de emisión de olor

La tasa de emisión de olor o caudal de olor es el parámetro necesario para la modelización de la dispersión en el modelo gaussiano y se expresa como unidades de olor/s (OUE/ s) o unidades de masa/s (g/s).

Según Capelli *et al.* (2013), el cálculo para hallar la tasa de emisión depende del tipo de fuente de emisión. Para una fuente puntual, se obtiene de multiplicar la concentración del olor (unidades de olor /m³ o unidades de masa/m³) y el flujo de aire en la fuente de olor (m³/s) que a la vez es calculado con la velocidad del aire y la sección transversal del conducto

de salida del olor. Por otro lado, para una fuente de área⁶, donde las emisiones provienen de una fuente extendida, va a depender de la existencia de flujo de aire saliente. Cuando existe flujo de aire, el cálculo es el mismo que para una fuente puntual y cuando no existe dicho flujo (fuente de área pasiva como las PTARD) el cálculo se vuelve muy complejo, ya que para calcular el flujo de aire se requiere el uso de un sistema de muestreo (usualmente es una campana) que simule la acción del viento sobre la superficie de la fuente emisora (Capelli *et al.*, 2009). De acuerdo con esto, la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$OER = \left(\frac{C \cdot Q}{A1} \right) * A2$$

Donde:

OER = Tasa de emisión de olor (g/s o OUe/s)

C = Concentración del olor (g/m³ o OUe/s)

Q = Caudal de ingreso de aire a la campana (m³/s)

A1 = Área de la campana (m²)

A2 = Área de la superficie que emite olor (m²)

Otra forma de hallar la tasa de emisión de olor es mediante el cálculo inverso de la ecuación de gauss (dispersión inversa), utilizando concentraciones de H₂S de la PTARD. En la dispersión inversa hay valores meteorológicos que deben ser asumidos.

Estas últimas técnicas para calcular la tasa de emisión aterrizan en el cálculo de la concentración del olor o de las sustancias odorantes, dato que no es posible obtener en fuentes futuras. En este caso, la tasa de emisión puede hallarse a través de un factor de emisión extraído de fuentes bibliográficas para luego calcular la tasa de emisión, o hallar directamente la tasa de emisión.

⁶ Fuente de emisión que abarca una extensa área expuesta a la atmósfera en donde las emisiones son difusas, es decir que se dispersan y se distribuyen en el espacio. Este tipo de fuentes pueden ser activas, o pasivas si es que no tienen aireación forzada (Ramírez, 2019).

2.16. Normativas regulatorias sobre olores

Las normativas regulatorias sobre olores tienen como objetivo prevenir y/o minimizar los impactos negativos de los olores, logrando impactos no significativos que se evidencien en niveles aceptables y no dañinos para la salud de las personas ante una exposición a corto como a largo plazo (Brancher *et al.*, 2016).

Según Brancher *et al.* (2016), existen 5 enfoques utilizados por las autoridades de diferentes países del mundo, para establecer normativas regulatorias y hacer frente a los impactos negativos de los olores:

i. Estándar de máximo impacto:

Relacionado a las máximas concentraciones, en inmisión, del olor como mezcla de compuestos químicos o el olor relacionado a un compuesto químico individual.

ii. Estándar de distancia de separación:

Relacionado a la separación que debe existir entre la fuente de olor y los receptores. Además del tipo de fuente, las distancias comúnmente se establecen teniendo en cuenta los siguientes criterios: el tipo de uso del suelo (residencial o agrícola), la densidad poblacional y la capacidad de tratamiento (Capelli *et al.*, 2013; Ramírez 2019). Este último criterio es el más utilizado por los países, concordando en que la distancia debe ser mayor cuando la zona sea altamente poblada (Ramírez, 2019).

Ramírez (2019) y el Ministerio del Medio Ambiente de Chile (s.f) indican que los países que han establecido distancias de separación para el tipo de fuente PTARD son los países de Alemania (Westfalia), Australia y Canadá. Para Alemania, solo se indica un valor de 300 metros, sin mayores especificaciones, a diferencia de Australia y Canadá que sí las presentan tal como se muestra en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9: Distancia de separación de acuerdo con la jurisdicción de Canadá

Jurisdicción	Distancia (m)	Uso de suelo	Fuente
Ontario (Canadá)	100 (recomendado)		PTAR igual o inferior a 500 m ³ / d
	100 (mínimo) y 150 (recomendado)	Zonas residencia	PTAR de capacidad entre 500 m ³ / d 25,000 m ³ /d
	>150		Planta de tratamiento de aguas residuales con capacidad superior a 25,000 m ³ / d

FUENTE: Adaptado de Ramírez, 2019.

Tabla 10: Distancia de separación de acuerdo con la jurisdicción de Australia

Jurisdicción	Población	Distancia (m)	
		Plantas de aguas residuales mecánicas / biológicas incluyendo lagunas aireadas	Lagunas facultativas
Sur Australia (Australia)	Población equivalente <1,000	100	150
	Población equivalente <5,000	200	350
	Población equivalente <20,000	300	700
	Población equivalente <50,000	400	1000

FUENTE: Ramírez, 2019.

iii. Estándar de emisión máxima:

Relacionado al establecimiento de límites máximos de la concentración de olor, emitido en la salida de la fuente de generación.

iv. Estándar de máxima molestias:

Relacionado a la respuesta humana ante la concentración del olor, que se expresada en molestias y quejas.

Bajo este estándar los países establecen protocolos para llevar a cabo el registro, investigación, acciones correctivas y seguimiento frente a las quejas

v. Estándar de tecnologías /técnicas:

Relacionado a las mejores tecnologías o técnicas disponibles (MTD) para reducir las emisiones de olores a un nivel aceptable, expresado en % de eficiencia de los equipos o tecnologías. Para el sector de “Planta de tratamiento de aguas servidas” se cuenta con el documento de MTD “*Best Available Techniques (BATs) Reference Document for the Waste Treatments Industries, (2006)*” de la Directiva Europea de Prevención y Control Integrado de la Contaminación (IPPC), conocida como la guía BREFs.

Estos 5 enfoques son aplicables tanto en la etapa de operación de la fuente generadora de olor como en su etapa inicial o de diseño. En la etapa de diseño, para prevenir los impactos negativos de una futura fuente de olores molestos, se utilizan los estándares de tecnologías y de distancia de separación. Por otro lado, para determinar los impactos en la etapa de operación cuando la fuente de contaminación se encuentra operando se mide la concentración de los olores y se contrarresta con estándares de emisión o inmisión. En el caso que las concentraciones de los olores sean elevadas y deriven en quejas y reclamos se hace necesario utilizar el estándar de máxima molestia, así como la utilización del estándar de tecnologías para aplicar al control de los olores molestos ya generados.

Para conocer el impacto real de los olores se requiere medir la concentración de estos en la ubicación de los receptores. Por ello, el enfoque más utilizado en las normativas de olores es el estándar de impactos máximos expresados en límite máximo de concentración del olor o de odorantes en inmisión, también conocido como nivel de calidad de aire (Brancher *et al.*, 2016). Estos límites máximos son menos permisible mientras mayor sea el número de receptores aledaños a la PTARD. En el Anexo 2 se muestra los países y organismos que tienen establecidos niveles de calidad de aire para el H₂S, identificado como un gas odorante, además se recalcan los países que refieren a las PTARD como fuente generadora.

Con respecto al Perú, el olor desagradable no está sujeto específicamente a una normativa de regulación, no existe regulación de la contaminación odorífera y tampoco es considerado

explícitamente como un contaminante atmosférico, a comparación de otros países como Estados Unidos que en su Ley de Aire Limpio incluye la contaminación odorífera como parte de la contaminación atmosférica (Canales, Borquez, & Hoehn, 2007 citado en Loaiza, 2021). Sin embargo, existen normativas peruanas que se vinculan a dos de los enfoques que plantea Brancher *et al.* (2016). En primer lugar, la Norma O.S. 090 “Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales”, del Reglamento Nacional de Edificaciones que recomienda una distancia mínima que debe haber entre una PTARD y los centros poblados, diferenciando del tipo de tratamiento en esta (ver Tabla 11). Esta normativa estaría ligada al estándar de distancia de separación, ya que si cumplimos con la ubicación de la PTARD estamos previendo futuras quejas y/o reclamos por el tema de los olores desagradables provenientes de los sistemas de tratamiento. En segundo lugar, la normativa ECA para Aire, aprobado por D.S N° 003-2017-MINAM, que establece el nivel de concentración máxima en el aire de ciertos contaminantes, como el H₂S (150 µg/m³), con el fin de regularlos y que no represente un riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente, esta normativa estaría ligada al estándar de máximo impacto, ya que, establece una concentración máxima del gas odorante en inmisión.

Tabla 11: Distancia mínima de separación de PTARD a centros poblados

Tipo de tratamiento	Distancia (m)
Tratamientos anaerobios	500
Lagunas facultativas	200
Sistemas con lagunas aireadas	100
Lodos activados y filtros percoladores	100

FUENTE: MVCS, 2006.

2.17. Medidas relacionadas con el control de olores en las PTARD

Las medidas de control frente a los impactos negativos causados por los olores desagradables, son de prevención y de mitigación.

2.17.1. Prevención

Las medidas preventivas son aquellas enfocadas en evitar la generación de olores en las PTARD y así reducir los impactos negativos significativos producidos por estos. En este tipo de medida se considera controles en el diseño y el inicio de operación de la planta. Según Talaiekhosani *et al.* (2016), estos controles deben estar enfocados en evitar la producción

del H₂S (considerado como el gas trazador en las PTARD) con la inhibición del crecimiento de las bacterias reductoras de azufre, ingresando fuentes de energía alterna para las bacterias reductoras de azufre y/o favoreciendo el crecimiento de las bacterias quimiotróficas.

Las medidas de prevención pueden ser aplicadas en la etapa de diseño de la PTARD y en la etapa operacional.

i. Diseño y dimensionamiento

El diseño e ingeniería de una PTARD debe basarse en la calidad y cantidad del agua residual a tratar, cantidad que debe ser proyectada para la población beneficiada real, es decir donde se considere la población futura. Este diseño debe regirse de acuerdo a los parámetros establecidos en la Norma O.S. 090.

Si la PTARD no trabaja de acuerdo al diseño y/o lo establecido por el fabricante, puede presentar anomalías que provoca la generación de gases odorantes. Muchos autores indican que se debe presentar especial enfoque en mantener el caudal de tratamiento, contar con trampas de grasa que impidan verter directamente al sistema de tratamiento las grasas de aceites de cocina y contar con tanque ecualizador.

ii. Operacionales

Estas medidas deben ser basadas en las mejores técnicas disponibles (MTD) mencionadas por Pinasseau *et al.* (2010), las cuales abarcan la línea de tratamiento del agua residual y de los lodos.

En la línea de tratamiento del agua residual:

- Operar la PTARD de acuerdo con los parámetros de diseño;
- Realizar inspecciones y mantenimientos periódicos de los equipos y componentes de la PTARD (p ej.: retirar los sólidos residuales del tratamiento, eliminar la espuma del sistema de tratamiento biológico);
- Gestionar correctamente el sistema de alcantarillado, que incluya el mantenimiento regular para prevenir acumulaciones de sedimentos y residuos orgánicos en las tuberías, que repercuten en la formación de odorantes;
- Reducir o minimizar la superficie de contacto de los gases odorantes que se encuentran en la matriz agua, con el aire. En algunos casos se suele usar cubiertas que cubren la

superficie de las unidades de tratamiento, las cuales pueden ser de distintos materiales (Giraldo & Lozada, 2019);

- Evitar el ingreso al sistema, de agua con exceso de compuestos azufrados que provocan su descomposición a H₂S (Loaiza, 2021);
- Impedir el ingreso de sustancias tóxicas (ej.: productos desinfectantes, bactericidas, funguicida y germicidas) con efectos instantáneos o potenciales que inhiban la actividad microbiana en el sistema de tratamiento (Giraldo & Lozada, 2019);
- Mantener niveles adecuados de los parámetros involucrados en la generación y transferencia de gases odorantes. El pH debe tener un valor ≥ 7 y < 9 para evitar la reducción de eficiencia en el tratamiento secundario (Talaiekhosani et al., 2016), el oxígeno disuelto un nivel ≥ 1 mg/L y la temperatura debe ser < 24 °C.
- Utilizar una protección del motor del aireador, que cumple la función de detectar fallas eléctricas y que permita que trabaje continuamente.

Otras medidas operativas que implican un costo de aplicación mayor es el utilizar sustancias químicas para oxidar, neutralizar o precipitar el sulfuro de hidrógeno preexistente en el agua residual. Dentro de estas medidas se describen las siguientes:

- Inyección de nitrado al agua residual para inhibir la formación de H₂S, dado la utilización del nitrato como fuente de energía por parte de los microorganismos, quienes reducen el nitrato en reemplazo de los compuestos azufrados (Giraldo & Lozada, 2019).
- Uso de sales metálicas (ej.: Sal de Hierro) para eliminar la formación del H₂S, por medio de su neutralización en formas poco solubles propiciado por las reacciones químicas que se producen (Giraldo & Lozada, 2019; (Talaiekhosani et al., 2016).
- Aplicación de Peróxido de Hidrógeno para oxidar el H₂S disuelto, obteniéndose finalmente agua y mayor cantidad de oxígeno en el agua residual (Giraldo y Lozada, 2019; Zhang *et al.*, 2008 citado en (Talaiekhosani *et al.*, 2016).

En la línea de tratamiento de los lodos:

- Reducir al mínimo el tiempo de residencia de los lodos en los sistemas de almacenamiento (mantener lo indicado en su manual de operación y mantenimiento), especialmente en condiciones anaeróbicas (Pinasseau et al., 2010).

- Prevenir la formación de lodos en las paredes de los tanques y reactores (Giraldo & Lozada, 2019).
- Almacenamiento de lodos residuales por períodos cortos. De acuerdo con la Resolución Ministerial N° 128-2017-VIVIENDA “Aprueban Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final”, los lodos ya estabilizados y colocados en recipientes para su disposición final, solo pueden permanecer almacenados por 7 días.

2.17.2. Mitigación

Los impactos significativos por los olores se materializan cuando las medidas preventivas no son aplicadas, se aplican deficientemente, u ocurren contingencias como la generación de condiciones atmosféricas no comunes que evitan la dispersión de los olores (Servicio de Evaluación Ambiental, 2017), o hay una interrupción del fluido eléctrico que afecta los equipos de las PTARD (Betancur, 2017). Para minimizar/mitigar estos impactos y sean lo menos significativos posibles, se utilizan medidas tecnológicas y/o relacionadas a mejoras en el diseño del sistema de tratamiento.

i. Tecnológicas de abatimiento

Estas tecnologías son basadas en la Guía de BREFs del IPPC, tecnologías que son utilizadas en diversos países y tienen una alta eficiencia.

Para la aplicación de estas tecnologías se requiere capturar los olores para después tratarlos, por ello se debe mantener la PTARD en un lugar cerrado (Pinasseau *et al.*, 2010).

Las tecnologías se resumen en las siguientes:

- **Lavador de gases:** Tecnología que consiste en hacer pasar el aire contaminado a un tanque con agua y un sólido inerte, en el cual los contaminantes del flujo de aire se disuelven o se adhieren al sólido para finalmente obtener aire limpio (Envitech, 2015 citado en Betancur, 2017).
- Adsorción con carbón activado: Tecnología que consiste en hacer pasar el aire contaminado por un filtro de carbón activado para que los contaminantes del gas sean retenidos en los poros del carbón y finalmente se obtenga aire limpio (Betancur, 2017).
- Absorción con adición química: Tecnología que consiste en hacer pasar el aire contaminado por un lecho filtrante con compuestos químicos, como el hidróxido de

sodio, que capturan las moléculas olorosas para finalmente obtener aire limpio (Servicio de Evaluación Ambiental, 2017).

- Biofiltro: Tecnología que consiste en pasar el aire contaminado por un reactor biológico o lecho de material orgánico que alberga microorganismos que degradan a los gases odorantes a sustancias no contaminantes (Shareefdeen, 2005 citado en Hernández & Calvo, 2016). En el caso del H_2S , este es oxidado y transformado a SO_4^{2-} .
- Evaporador Contacto Directo: Tecnología que consiste en hacer pasar el aire contaminado por un espacio inerte, donde hay un flujo constante de un líquido oxidativo como el hipoclorito de sodio (Bermaur, 2016).
- Reactores de crecimiento en suspensión/ Biorreactores de membrana: Se hace pasar el aire contaminado al fondo de un reactor que alberga alta cantidad de microorganismos adheridos en burbujas, los cuales se encargan de descomponer los compuestos olorosos. En el caso de los biorreactores de membrana, el aire contaminado pasa por las membranas dejando atrás los compuestos olorosos que son consumidos por microorganismos (Talaiekhosani et al., 2016).
- Inyección de aire y oxígeno puro al agua residual: Su finalidad es que el H_2S , de la matriz agua, esté expuesto al oxígeno y se oxide biológicamente. Para ello se inyecta aire hasta obtener una concentración de oxígeno disuelto, mayor a 1 mg/L. En esta técnica se debe tener cuidado con el nivel de oxígeno muy alto, porque puede provocar incendios (propios de la presencia de gases inflamables en las PTAR).

Además de las tecnologías antes explicadas, se encuentran otras como la oxidación térmica, sin embargo, todas estas tecnologías y técnicas son altamente costosas tanto por el tratamiento como por el método de la captura de los gases para tratarlos.

ii. Medias asociadas al diseño

Dentro de las medidas asociadas a mejorar el diseño de la PTARD se encuentra la reutilización de las emisiones como fuente de energía en otro proceso. Sin embargo, esta es una técnica compleja y costosa, por ello, se utiliza más las mejoras en la ventilación para favorecer la dispersión de los olores y el uso de barreras vegetativas, las cuales se describen a continuación:

Barreras naturales de vegetación para control de olores

Los cercos vivos perimetrales o cortinas vegetativas, también llamadas barreras naturales, son una conformación de árboles y arbustos frondosos ubicados en forma lineal o triangular, a diferentes alturas, ubicadas en dirección perpendicular al viento predominante. En relación a la reducción del impacto negativo de los olores desagradables, estas barreras pueden llegar a tener un efecto protector hasta una distancia de 20 veces la altura de los árboles (Betancur, 2017) y cumplir las siguientes funciones:

- Disminuyen la sensación de los malos olores por el efecto psicológico que genera bloquear la línea de visión de la fuente de olor (ver Figura 5);
- Actúan como un obstáculo físico que hace que el viento, que llega con los odorantes (pluma de contaminación), pierda velocidad y se desvíe elevándose sobre su altura máxima para finalmente dispersarse a esta altura (ver Figura 6);
- Provoca la turbulencia, reducción de la velocidad y dilución de la pluma de contaminación a una menor distancia de la fuente de contaminación. Estos eventos son producidos por el choque de la pluma de contaminación contra la barrera viva (ver Figura 6);
- Actúan como filtros naturales, atrapando los odorantes en su estructura;
- Mejoran la percepción de los odorantes al incorporar corrientes de aire que llegan con olores agradables, producto de las especies aromáticas incluidas en las barreras.

Para el cumplimiento de las funciones mencionadas, la colocación de las barreras vegetales deben tener en cuenta lo siguiente (Betancur, 2017):

- Ubicarse en el perímetro de las PTARD;
- La vegetación a utilizar debe ser de rápido crecimiento y adaptativa a la zona y emisiones del tipo de fuente donde serán colocadas;
- Las hileras que conforman la barrera, deben estar conformada por al menos 2 filas;
- Para el diseño se debe considerar que los arbustos (entre 2-5 m de altura) se encuentren en la primera fila de la barrera y en la segunda los árboles de mayor altura. De esta forma se creará la condición para elevar la pluma;
- Dentro de las especies utilizadas, se deben considerar las aromáticas.

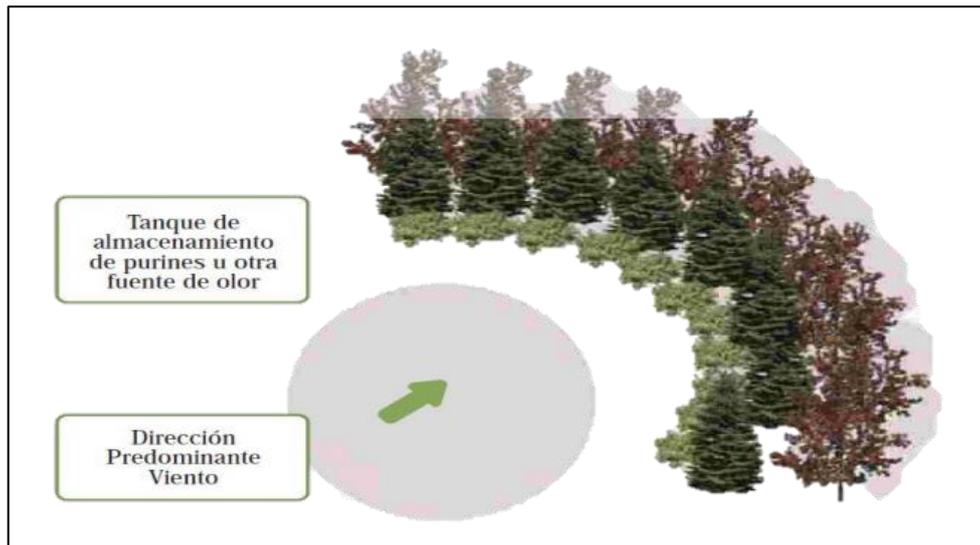


Figura 5. Posicionamiento de las barreras vegetativas
FUENTE: Loayza, 2021.

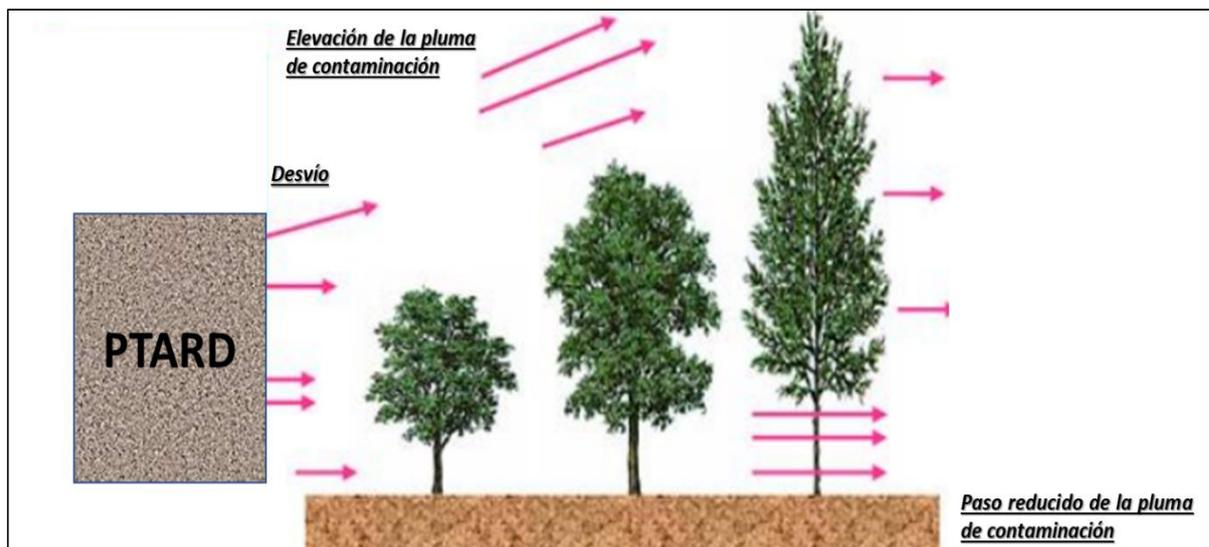


Figura 6. Funciones de las barreras vivas
FUENTE: Adaptado de Betancur, 2017.

Diversos autores como Silva (2019), Loayza (2021) y Calderón (2019), recomiendan el uso de barreras vivas como mecanismo de control en las PTARD. Además, esta técnica es una de las formas más económicas de mitigar los olores (Torres, Úbeda, Calvet, & López, 2008, p. 73 citado en Loayza, 2021). Sin embargo, las barreras pierden su efectividad si no se le brinda el correcto mantenimiento que evite las plagas, por lo cual, se debe asegurar que se cuente con un seguimiento y monitoreo (Loayza, 2021).

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. Descripción del sistema de tratamiento de la futura PTARD

La PTARD proyectada tiene el objetivo de reducir los contaminantes que se encuentran presentes en el agua residual doméstica (baños, lavaderos, sanitarios, cocinas) generadas por la urbanización de Chilca.

La Planta tratará un caudal de diseño de 12.3 l/s (caudal promedio diario) para una población beneficiada máxima de 7,357 (proyección al 2042) y tendrá un tratamiento secundario de tipo MBR, para la línea de lodos se contempla la construcción de una planta de tratamiento de lodos que consta en un proceso de deshidratación y posterior almacenaje de los lodos ya deshidratados, en la Figura 7 se muestra las etapas de tratamiento.

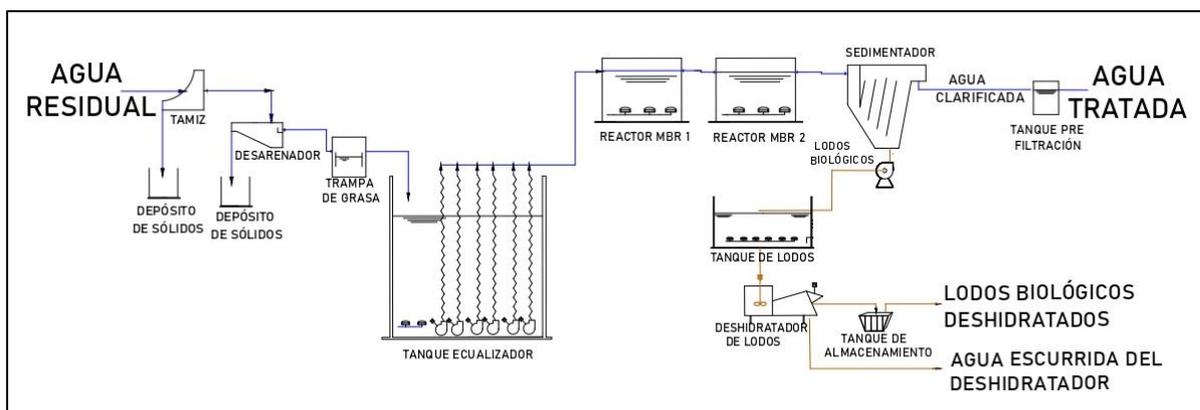


Figura 7: Etapas de tratamiento en la futura PTARD de Chilca

FUENTE: Adaptado de CARBONO GROUP, 2022.

3.2. Área de estudio

El trabajo de investigación se realizó en una urbanización ubicada en el distrito de Chilca, provincia de Cañete, departamento de Lima. El área de estudio es catalogada, según el Mapa de Clasificación Climática del Perú, como una zona árida, templada y con deficiencia de lluvias en todas las estaciones.

La urbanización es una zona residencia, zona costera ubicada a 2.6 km del mar, con terreno plano, topografía simple y donde todos los receptores se encuentran al mismo nivel de la futura PTARD. Alrededor de la urbanización no se ha identificado otras fuentes de olor.

3.3. Diseño de la investigación

La investigación fue de tipo no experimental, descriptiva y transversal.

3.4. Materiales y Equipos

Los materiales y equipos que se utilizaron para la investigación se detallan a continuación:

a) Materiales

- Útiles de escritorio
- Cámara fotográfica
- 9 cuerpos de andamios Acrow (utilizados para colocar sobre ellos una estación meteorológica).

b) Equipos

- Radiómetro (Medidor de Radiación UV A-B) con su respectivo sensor de marca Sper Scientific.
- 1 estación meteorológica
- Laptop con Software ArcGis 10.8 y WRPLOT, para la elaboración de rosas de vientos.

3.5. Metodología

3.5.1. Esquema metodológico del TSP

En la Figura 8 se muestran las etapas que se ejecutaron para la realización del estudio.

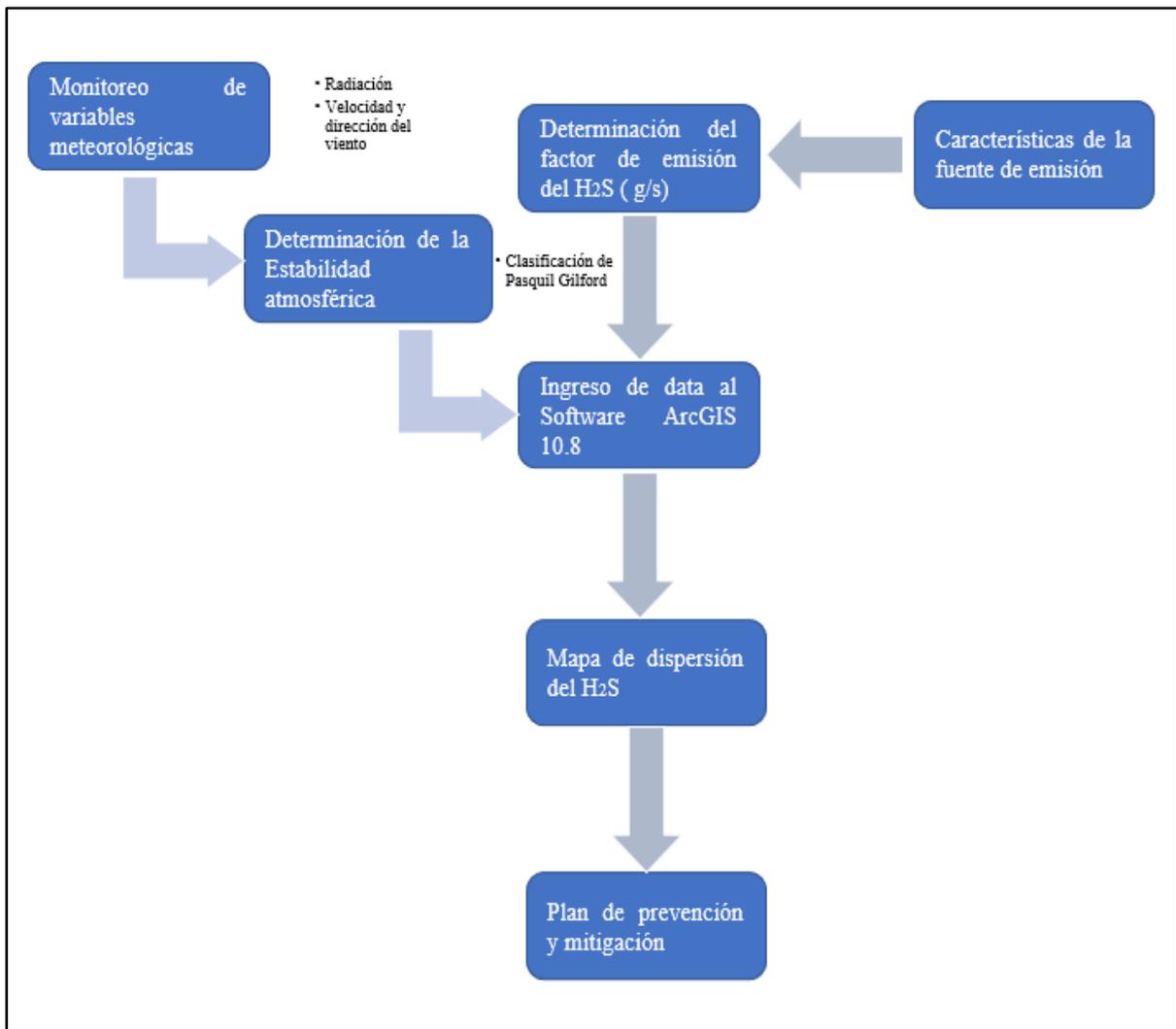


Figura 8. Flujograma de la metodología de trabajo

3.5.2. Determinación del Modelo de dispersión atmosférica

Dado que el estudio requería el análisis de contaminantes en el aire urbano (urbanización) se utilizó un modelo de dispersión de escala local que haya sido utilizado en estudio de olores y/u odorantes. Por lo cual, se escogió un modelo gaussiano.

De entre los modelos gaussianos se seleccionó el de Penacho gaussiano que es utilizado para fuentes de área y es accesible económicamente dado los pocos datos de entrada para su corrida.

Para el desarrollo del modelo de Penacho gaussiano se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación (1)

Ecuación de la Pluma gaussiana en el eje x,y,z

Ecuación utilizada para hallar la concentración del olor a diferentes ubicaciones de la fuente de emisión. Es el modelo matemático utilizado para modelar el contaminante H₂S.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

Donde:

C: Concentración de contaminante (g/m³)

Q: Tasa de emisión del contaminante (g/s)

u: Velocidad del viento a la altura de la PTAR (m/s)

Z y Y: Posición de la fuente de emisión, en el eje Z y Y (m)

σ_y, σ_z : Coeficientes de dispersión turbulenta (m)

H: Altura efectiva a la que es emitida el contaminante (m)

Z: Altura (m) de emisión del contaminante

Ecuación (2)

Ecuación de la velocidad del viento a la altura de la emisión (u)

Esta ecuación es utilizada cuando no se conoce la velocidad del viento a la altura de emisión y solo se tiene datos de la velocidad del viento a cierta altura (entre 2-10 metros).

$$u = u_{ref} \left[\frac{H}{h_{ref}} \right]^p$$

Donde:

u: velocidad del viento a la altura de la emisión (m/s)

u_{ref}: velocidad del viento de referencia (m/s), es decir velocidad del viento medida a la altura donde se colocó el equipo de medición

h_{ref}: altura de referencia (m), es decir la altura donde se colocó el equipo de medición

H: altura efectiva de la emisión (m)

p: Coeficiente que describe el perfil de potencia del viento

Los valores del coeficiente **p** se basan en la clase de estabilidad y características del terreno. Se utiliza la Tabla 12 para determinar el valor de este coeficiente.

Tabla 12: Valores de p, basados en la estabilidad y tipo de entorno

Categoría de Estabilidad	P (medio rural)	P (medio urbano)
A, B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.40
F	0.55	0.60

FUENTE: D. O Martín. Journal of Air Pollution C control Association 26, N°2 (1976) citado en Carrasco, 2022.

Ecuación (3)

Ecuación de McMullen

Ecuación utilizada para conocer la dispersión del contaminante en la dirección horizontal y vertical, es decir las desviaciones horizontales y verticales. Estas desviaciones son denominadas coeficientes de dispersión turbulenta (σ_y, σ_z) en la ecuación de la Pluma gaussiana (ver Ecuación (1)).

En el eje horizontal

$$\sigma_y = \exp[Iy + Jy(\ln x) + K(\ln x)^2]$$

En el eje vertical

$$\sigma_z = \exp[I + J(\ln x) + K(\ln x)^2]$$

Dónde:

σ : Desviación normal de la concentración del contaminante, en la horizontal (σ_y) y vertical (σ_z)

$\ln x$: Logaritmo natural de la distancia a nivel de suelo expresado en kilómetros.

I, J, K: Constante empírica para una condición de estabilidad correspondiente a cada valor de σ . Ver Tabla 13 y 14.

Tabla 13: Valores de I, J, K para σ_y en función de la condición de estabilidad

Condición de Estabilidad	I	J	K
A	5.357	0.8828	-0.0076
B	5.058	0.9024	-0.0096
C	4.651	0.9181	-0.0076
D	4.230	0.9222	-0.0087
E	3.992	0.9222	-0.0064
F	3.553	0.9181	-0.0070

Nota: Esta Tabla fue elaborada por McMullen, a partir de un ajuste matemático del monograma utilizado por Tuner para hallar el valor de σ_y . En esta Tabla los valores de las constantes I, K y L, varían de acuerdo a la estabilidad atmosférica.

FUENTE: Mc Mullen, 1975 citado en Carrasco, 2022.

Tabla 14: Valores de I, J, K para σ_z en función de la condición de estabilidad

Condición de Estabilidad	I	J	K
A	6.035	2.1097	0.2770
B	4.694	0.0136	0.0136
C	4.11	-0.0020	-0.0020
D	3.414	-0.0316	-0.0316
E	3.057	-0.0450	-0.0450
F	2.621	0.6564	-0.0540

Nota: Esta Tabla fue elaborada por McMullen, a partir de un ajuste matemático del monograma utilizado por Tuner para hallar el valor de σ_z . En esta Tabla los valores de las constantes I, K y L, varían de acuerdo a la estabilidad atmosférica.

FUENTE: Mc Mullen, 1975 citado en Carrasco, 2022.

Asimismo, para determinar la condición de estabilidad atmosférica que es requerida en la Tabla 13 y 14 se utilizó la metodología de Turner (ver Tabla 15). Con este método, la categoría de estabilidad atmosférica es determinada de diferentes formas, durante el día y la noche. En el día es determinada por la velocidad de viento y la intensidad de la radiación solar, y en la noche por observaciones del porcentaje de nubosidad en el área observada y la velocidad del viento.

Tabla 15: Método Gráfico para determinar la Categorías de Estabilidad Atmosférica de Pasquill-Gifford-Turner

Viento de superficie (m/s) (a 10 m de altura)	Día			Noche ⁽¹⁾	
	Radiación solar (W/m ²)			Nubes ⁽²⁾ ≥ 4/8	Nubes ⁽²⁾ < 3/8
	Fuerte >580	Moderada 290-580	Débil <290		
0-2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B-C	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D

Nota:

- (1) La noche se define como el período desde una hora después de la puesta de sol, hasta una hora antes de la salida del mismo.
- (2) Nubosidad expresada en octavos de bóveda celeste cubierta por nubes Para cielos totalmente cubiertos, tanto para el día como para la noche, debe asumirse clase de estabilidad D.

FUENTE: Turner, 1970 citado en Carrasco, 2022.

3.5.3. Monitoreo de variables meteorológicas

Para aplicar la ecuación de McMullen y la de Penacho gaussiano se requiere determinar la estabilidad atmosférica y conocer la velocidad y dirección del viento en la ubicación de la fuente de emisión. Por lo cual, se requirió obtener información de datos meteorológicos.

Según Capelli (2013) y la Environment Agency (2011), los datos meteorológicos utilizados para los modelos de dispersión deberían provenir de una estación meteorológica local, cercana y representativa de la fuente de emisión, ya que las variables meteorológicas como el viento varían localmente. Sin embargo, si la estación meteorológica no está cercana se considera la posibilidad de utilizar datos meteorológicos medidos directamente en el lugar donde se encuentra la fuente de emisión.

En el caso de la futura PTARD, esta se encuentra ubicada a 5.78 km de distancia de la Estación Meteorológica más cercana del SENAMHI, Punta Lobos en Pucusana (ver Tabla 16).

Tabla 16: Estación Punta Lobos del SENAMHI

Estación Meteorológica	Departamento /Provincia	Distrito	Latitud	Longitud
Punta Lobos	Lima	Pucusana	12°30'1.3"	76°47'37.3"

FUENTE: Adaptado del SENAMHI, 2011.

Dada la distancia considerablemente amplia de la estación meteorológica más cercana y las condiciones topográficas que se presentan desde ésta hasta la ubicación de la futura PTARD, es que se optó por realizar un monitoreo directamente del lugar donde se encuentra la fuente de emisión.

Variables meteorológicas medidas:

i. Dirección y Velocidad del viento

Para medir la velocidad y dirección del viento en la urbanización (ubicación de la futura PTARD) se utilizó una estación meteorológica instalada a 10 m del nivel del suelo (medición a 12 metros de altura) de acuerdo a lo indicado en el Protocolo de Monitoreo de Aire (2019). Para lograr esta altura, se utilizó andamios de tipo ACROW ubicados a 5 metros de distancia de la PTARD.

El anemómetro de la estación meteorológica midió la velocidad del viento cada hora durante 24 horas seguidas por 3 días consecutivos, con la finalidad de capturar la variabilidad temporal de la velocidad del viento.

El presente TSP se enfocó en realizar un análisis considerando el peor escenario que pudiera ocurrir, donde los impactos negativos por los olores sean los más significativos. Por esta razón, se llevó a cabo el monitoreo durante una estación del año en la que las condiciones meteorológicas fueran las menos favorables para la dispersión de los olores. Se eligió la primavera (Nov-Dic) para este propósito, ya que es una época seca donde las temperaturas y la velocidad del viento son moderadas, por lo que se esperaría que no ocurra inestabilidad atmosférica y la dispersión sea menor en comparación con otras estaciones como invierno y verano. No se consideró monitorear en invierno, dado que durante esta estación las velocidades del viento suelen ser más fuertes (SENAMHI, 2013, 2014) y provocar la turbulencia mecánica que favorece la dispersión. Asimismo, las elevadas temperaturas en verano (SENAMHI, 2013, 2014) provocan una mayor diferencia de temperatura entre la

superficie y el aire más fresco en altitudes, provocando la turbulencia térmica y la inestabilidad atmosférica.

ii. Radiación

Para medir la radiación se utilizó un radiómetro⁷, ubicado a un 1 m de la estación meteorológica, que registró por un periodo de 3 minutos. Se hicieron tres mediciones puntuales a diferentes horas del día (antes de mediodía, a mediodía y al término del día) para determinar el cambio de la estabilidad atmosférica con la radiación.

3.5.4. Determinación de la Tasa de emisión del olor

No es posible medir directamente la concentración del olor generado por la PTARD que cubrirá la demanda de la urbanización de Chilca, ya que será instalada posterior al análisis de dispersión. Por otro lado, medir la tasa de emisión basándose en un factor de emisión en específico para esta planta se hizo complejo. La literatura indica un factor de emisión para cada una de las etapas del tratamiento del agua residual, sin embargo, algunos de ellos no tienen las mismas características que la PTARD que se analizó. Por lo tanto, se determinó utilizar una tasa de emisión de fuente bibliográfica internacional.

Asimismo, se optó por modelar al olor con un solo gas odorante y no como un conjunto de compuestos químicos, considerando que para comparar los resultados del modelamiento se utilizaría una normativa peruana que no analizan los olores en unidades de olor OU_e/m^3 .

Finalmente, la Tasa de Emisión que se utilizó fue la sustancia odorante H_2S (g de H_2S/s), compuesto causante de olor más característico en una PTARD, por las siguientes razones:

- Diversos países regulan los olores en las PTARD, estableciendo niveles permisibles, tomando únicamente como compuesto representativo el H_2S .
- Tiene un umbral de detección bastante bajo, por lo que se lo considera como un gas representante o dominante para analizar las molestias por olor en las PTARD (Ramírez, 2019). En muchos estudios, como el realizado por Macías y Padilla (2021), resaltan que el mayor porcentaje de los receptores en una Planta de tipo biológica de lodos activados perciben un olor a huevo podrido (olor característico de este gas) y no otros olores.

⁷ Instrumento recomendado por la EPA (2017) para medir el nivel de radiación solar.

- Es un gas con alta concentración en el agua residual y al ser altamente volátil tiende a aumentar su concentración en el aire, lo que lo diferencia de otros gases olorosos.

3.5.5. Modelación de la dispersión del contaminante H₂S

La modelación se realiza en el ArcGIS 10.8, mediante el uso de la fórmula de dispersión gaussiana plasmada en Model Builder y la herramienta de análisis espacial de Arcgis 10.8, con la cual se obtendrá la Pluma gaussiana del contaminante H₂S.

Los resultados del modelo de dispersión se plasman en un Mapa temático, en el cual se visualiza la evolución espacial del gas odorante y se puede determinar los receptores afectados por la contaminación odorífera, considerando distancia y dirección.

3.5.6. Plan de prevención y mitigación para el control de los olores molestos

En base a los resultados obtenidos, se elaboró un Plan de prevención y mitigación de los olores provenientes de la futura PTARD. Este Plan se expone alternativas para reducir los riesgos a la salud y el ambiente.

3.6. Contribución en la solución de situaciones problemáticas que se hayan presentado durante su estancia en la empresa

Como profesional en Ingeniería Ambiental, ejerciendo como Especialista Ambiental en la consultora CARBONO GROUP he trabajado con empresas de diversos rubros, de entre ellos, inmobiliarias que requieren de la elaboración de expedientes para tramitar permisos ambientales e IGA y de evaluaciones ambientales de los terrenos que adquieren para realizar Habilitaciones Urbanas. La elaboración de expedientes brinda a las empresas facilidades para sanear los terrenos. Por otro lado, con las evaluaciones ambientales las empresas tienen la posibilidad de tener un panorama más claro de los riesgos ambientales y cómo estos pueden repercutir en la imagen empresarial. Las evaluaciones ambientales requieren de una amplia competencia en el rubro ambiental para elaborar las Hojas de Ruta de los servicios.

3.7. Análisis de su contribución en términos de las competencias y habilidades adquiridas durante su formación profesional, considerando la revisión de literatura actualizada pertinente

Mi formación como Ingeniería Ambiental en la UNALM me ha permitido adquirir sólidos conocimientos que han sido utilizados en el presente estudio del TSP, estos cursos son: Química, Derecho y Legislación Ambiental, Evaluación de Impacto Ambiental, Contaminación Atmosférica, Tratamiento y Abastecimiento de Aguas Residuales, Monitoreos y control de la contaminación Atmosférica y Sistemas de Información Geográfica.

Todos estos cursos han sido una herramienta valiosa que me desarrollan como profesional en diferentes campos de la carrera, especializándome en diseñar y ejecutar proyectos “a medida” para empresas de diversos rubros, proyectos particulares que requieren de una rápida resolución de problemas, que surgen en el desarrollo de las actividades de las empresas.

El caso desarrollado en el TSP es un ejemplo de un proyecto ambiental a medida, para el cual se requirió de competencias que surgen del bagaje del conocimiento obtenido en la UNALM, especializaciones en Modelos de dispersión y el uso de programas como el WRPLOT y el ArcGIS. Asimismo, se requirió de habilidades formadas a lo largo de ejercer como Ingeniera Ambiental como la Resolución de problemas que me sirvió para entender las necesidades que tenía la empresa inmobiliaria y diseñar la metodología de trabajo. El Liderazgo por su parte me sirvió para dirigir y supervisar el Monitoreo Ambiental en campo y la comunicación y trabajo en equipo contribuyeron en la ejecución del proyecto y mantener una fluida comunicación con los clientes para resolver problemas fácilmente.

3.8. Explicar el nivel de beneficio obtenido por el centro laboral de su contribución a la solución de las situaciones problemáticas.

Las empresas del rubro inmobiliario, a las que hemos realizado consultoría, buscan cada vez más fortalecer su conciencia ambiental y desarrollar proyectos sostenibles que logren la satisfacción de sus clientes, una reputación y credibilidad en el mercado que atraiga mayor número de clientes.

Es de conocimiento que con el crecimiento poblacional las PTARD están ubicadas cada vez más cerca de las urbanizaciones, por lo que los olores provenientes de estas generan

molestias y quejas de los dueños de los predios. Por ello, las empresas inmobiliarias que realizan Habilitaciones Urbanas, buscan proveer y/o mitigar estos impactos negativos, sin que esto signifique repercutirlas económicamente.

Con la finalidad de lograr dar soporte a las empresas inmobiliarias, se buscó proyectar el alcance de los impactos negativos producidos por los olores que emanan de las PTARD y en base a los resultados proponer un Plan de control de los olores que mitigue los impactos significativos y de gran extensión. Este Plan también contribuirá a optimizar la distancia de separación entre la PTARD y los residentes de las urbanizaciones, a fin de reducir el uso de terreno como contingencia y tener mayor área para venta de lotes.

Por otro lado, el beneficio obtenido por la consultora ambiental CARBONO GROUP, en el proyecto desarrollado en el TSP, fue la obtención de un nuevo servicio para incorporar dentro de su cartera de proyectos para las empresas inmobiliarias y servir como guía para adecuarlo a empresas de otros sectores. El desarrollo del proyecto cubrió la necesidad de la empresa solicitante, lo que expone a CARBONO GROUP como una consultora ambiental estratégica, eficiente y confiable en la resolución de problemas tipo, creando la necesidad en el mercado laboral de contar con consultoría ambiental en el proceso de desarrollo de sus actividades.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados de mediciones meteorológicas

Las mediciones meteorológicas se realizaron en un laboratorio acreditado por INACAL (Instituto Nacional de Calidad).

4.1.1. Mediciones de velocidad y dirección del viento

La descripción de la estación se muestra en la Tabla 17

Tabla 17: Descripción de la estación de monitoreo de velocidad y dirección del viento

Estación de Monitoreo	Descripción	Coordenadas UTM	
		N	E
EM-01	Estación meteorológica instalada a 10 m del nivel del suelo	8615942	310783

FUENTE: Adaptado de CARBONO GROUP, 2022.

La estación EM-01 se encontraba sobre andamios, que lo elevaron a 10 metros sobre el nivel del suelo y frente a la ubicación de la futura PTARD. Ver Figura 9.



Figura 9. Estación EM-01

A partir de los resultados entregados por el Laboratorio se extrajeron los valores promedios de velocidad del viento para cada día de monitoreo, los que se muestran en la Tabla 18 y 19.

En la Tabla 18 se muestran los promedios de velocidad del viento, considerando el monitoreo continuo durante las 24 horas del día. El primer día se obtuvo la mayor velocidad promedio (8.7 m/s) y en el segundo día la menor (3.7 m/s).

Tabla 18: Resultados de Laboratorio de velocidad del viento durante todo el día

Día	Periodo del día	Fecha de Monitoreo	EM 01
			Velocidad del viento (m/s)
1	Todo el día	29/11/2023 al 30/11/2023	8.7
2	Todo el día	30/11/2023 al 1/12/2023	3.7
3	Todo el día	1/12/2023 al 2/12/2023	5.2
Promedio			5.87

FUENTE: Adaptado de CARBONO GROUP, 2022.

En la Tabla 19 se muestran los promedios de velocidad del viento, considerando las horas del periodo diurno (7 a.m. – 7 p.m.). El primer día se obtuvo la mayor velocidad promedio (10.5 m/s) y en el segundo día la menor (5.4 m/s).

Tabla 19: Resultados de Laboratorio de velocidad del viento en periodo diurno

Día	Periodo del día	Fecha de Monitoreo	EM 01
			Velocidad del viento (m/s)
1	Periodo diurno 7 a.m. -7 p.m.	29/11/2023 al 2/12/2023	10.5
2	Periodo diurno 7 a.m. -7 p.m.	30/11/2023 al 1/12/2023	5.4
3	Periodo diurno 7 a.m. -7 p.m.	1/12/2023 al 2/12/2023	6.6
Promedio			7.5

FUENTE: Adaptado de CARBONO GROUP, 2022.

Con los resultados de la velocidad y dirección del viento (durante las 24 horas), entregados por el Laboratorio, se elaboró la rosa de viento en el programa WRPLOT, la cual se muestra en la Figura 10.

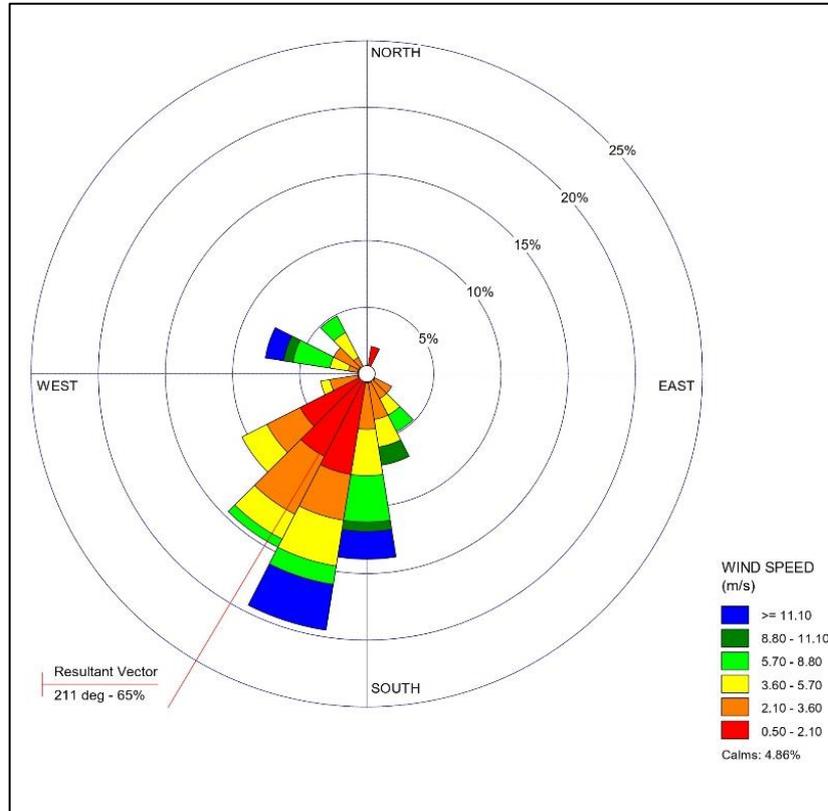


Figura 10. Rosa de viento de la estación EM-01

Como se evidencia en la rosa de viento, la dirección predominante del viento es hacia el SO.

4.1.2. Medición de radiación

La descripción de la estación se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20: Descripción de la estación de monitoreo de radiación

Estación de Monitoreo	Descripción	Coordenadas UTM	
		N	E
RA-01	A 1m de la estación meteorológica EM-01.	8615971	310727

FUENTE: Adaptado de CARBONO GROUP, 2022.

El monitoreo de la radiación se realizó frente a la ubicación de la futura PTARD. Ver Figura 11.



Figura 11. Monitoreo de radiación
FUENTE: CARBONO GROUP, 2022.

Los resultados entregados por el Laboratorio son los que se muestran en la Tabla 21. Para fines del estudio se utilizó el valor de radiación más alta, que ocurría al medio día, para considerar la dispersión en las condiciones más desfavorables.

Tabla 21: Resultados de Laboratorio de radiación

Estación de Monitoreo	Fecha de medición	Hora de medición	Registro (W/m²)
	30/11/2022	7:09	15.1
RA-01	30/11/2022	11:52	105.5
	30/11/2022	20:00	0.00

FUENTE: Adaptado de CARBONO GROUP, 2022.

4.2. Cálculo de los factores utilizados en el modelamiento

Para modelar la dispersión se requirió hallar las constantes requeridas para las Ecuaciones (1) y (2), ecuaciones que fueron resueltas con ayuda de la Herramienta “Raster Calculator” de la caja de Herramientas del programa ArcGIS 10.8. A continuación, se explica la determinación de estas constantes:

i. Determinación de la Estabilidad Atmosférica de acuerdo con Pasquill-Gifford-Turner

Para determinar las constantes, primero se requirió conocer la estabilidad atmosférica en la zona de análisis. La estabilidad, durante el día, fue hallada a partir del valor promedio de la velocidad del viento a 10 m de altura, en el periodo diurno (7.5 m/s) y el resultado de la radiación solar máxima medida (105.5 W/m²). De acuerdo con estos datos la estabilidad resultó ser D correspondiente a una estabilidad Neutra, durante el día. Asimismo, se consideró que la estabilidad durante la noche era también neutra, ya que durante el tiempo de monitoreo el cielo se encontraba totalmente nublado y de acuerdo a la Tabla 15, en estas condiciones se debe considerar una estabilidad D.

ii. Determinación de la velocidad del viento a la altura de la emisión (u)

Para la Ecuación (2), se consideró que el valor de la constante H (altura efectiva de la emisión) fuera de 3 metros, altura que utiliza Hernández y Calvo (2016) en su análisis de dispersión de olores en una PTARD de tipo lodos activados. Asimismo, se utilizó el promedio de la velocidad del viento, medido las 24 horas del día durante 3 días continuos a 10 metros sobre el nivel del suelo (con la altura del equipo, la medición real fue a 12 m). A continuación, se muestra las variables de la ecuación.

$$u = u_{ref} \left[\frac{H}{h_{ref}} \right]^p$$

Donde:

$$u_{ref} = 5.87 \text{ m/s}$$

$$h_{ref} = 12 \text{ m}$$

$$H = 3 \text{ m}$$

$$p \text{ (medio urbano; Estabilidad D)} = 0.25$$

Resultado:

$$u = 5.87 \left[\frac{3}{12} \right]^{0.25}$$

$$u = 4.148 \text{ m/s}$$

iii. Determinación de las constantes empíricas para la condición de estabilidad D

A partir de las Tablas 13 y 14 se definieron las constantes I, J y K. Los valores se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22: Valor de las constantes empíricas para una estabilidad D

Condición de estabilidad_D	I	J	K
σ_y	4.230	0.92222	-0.0087
σ_z	3.414	-0.0316	-0.0316

FUENTE: Adaptado de Mc Mullen, 1975 citado en Carrasco, 2022.

- Determinación de la Tasa de Emisión (Q)

La tasa de emisión fue obtenida del estudio realizado por Llavador et al. (2012) quienes realizan un análisis basado en mediciones de concentraciones de H₂S por método pasivo, en las proximidades de plantas de tratamiento de agua residual domésticas de tipo lodos activados, en combinación con análisis de dispersión para la cual se utilizó torres meteorológicas instaladas en la misma zona de las PTARD. De acuerdo con este análisis la tasa de emisión de las PTARD, con diferentes caudales de tratamiento, se mantiene en torno a 1 g/s, que significa que hay una liberación diaria de entre 50-100 kg de H₂S al ambiente. Según el autor, esta emisión diaria de H₂S es concordante con la calidad de un agua residual doméstica típica que puede presentar entre 625-1000 kg de azufre disponible para generar H₂S (sulfatos y sulfuros orgánicos e inorgánicos). Esta información es coherente si la contrastamos con la investigación de Zwain et al. (2020), que identificaron que una PTARD pequeña (caudal de tratamiento entre 1000-10000

m³/día, según Capelli et al., 2009) llega a emitir 70 kg/día de H₂S al ambiente, a partir de una concentración de 280 kg/día de H₂S en el afluente.

- **Determinación de los datos del terreno donde se ubicará la PTARD**

Para ingresar los datos del terreno (altura y ubicación) donde se ubicará la PTARD, se utilizó un DEM (archivo de elevación digital) extraído del GEOSERVIDOR del MINAM.

4.3. Modelamiento de los olores

La corrida de los datos ingresados y la creación del modelo se realizaron con la aplicación ModelBuilder, herramienta de ArcGIS 10.8. El resultado es un archivo ráster, por lo que para visualizar mejor los datos se guardó en un layer que ayudó a mostrar mediante isolíneas las concentraciones del H₂S en inmisión.

Para comparar los resultados de concentración con los límites de inmisión nacional e internacional se establecieron 11 rangos en los resultados de concentración y para visualizarlos se decidió elaborar un Mapa temático de la dispersión del H₂S, el cual se muestra en la Figura 12.

Como se puede observar en la Figura 12, los impactos significativos se presentan en la dirección SO, dirección predominante del viento de acuerdo al monitoreo meteorológico realizado en la zona. Por otro lado, estos impactos se presentarán hasta los 65 metros en dirección SO, comparando los resultados con el valor límite del H₂S en el ECA de Aire, es decir concentraciones mayores a 150 µg/m³. Sin embargo, si comparamos con las normativas de otros países (Ver Figura 13), los límites de inmisión son menos permisibles porque se consideran los problemas de salud en personas sensibles y también las molestias que causan. Al ser menos permisibles, la distancia hasta la que se sentirían los impactos significativos sería mayor.

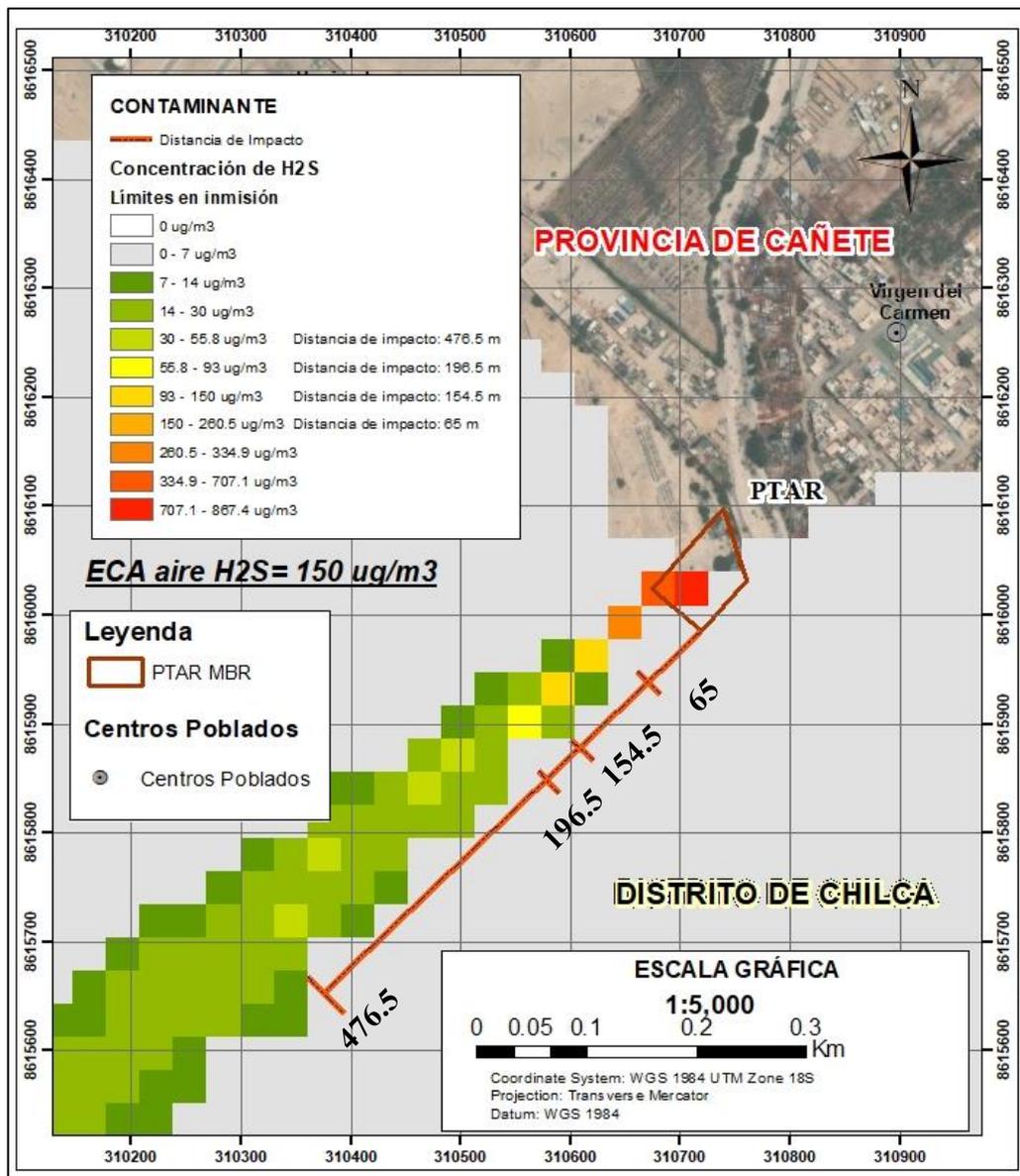


Figura 12: Mapa temático del modelamiento de la dispersión del H₂S

Comparando con la normativa de Pensilvania ($140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el condado de Texas ($112 \mu\text{g}/\text{m}^3$) los impactos significativos se presentarán hasta los 154.5 metros; hasta los 196.5 metros comparando con las normativas de Minnesota ($84 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y North Dakota ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$); hasta los 476.5 metros comparando con las normativas de Nuevo México ($42 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Idaho ($42 \mu\text{g}/\text{m}^3$), California ($42 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Colombia ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Panamá ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Ontario ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Asimismo, para normativas aún menos permisibles, que tienen un límite de inmisión menor a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los impactos se extenderían a distancias mayores de 500 metros, este es el caso de: Japón ($28 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Canadá (Quebec y Alberta) ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Holanda ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Illinois ($14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Estado de Nueva York (14), Pennsylvania ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Nueva Zelanda ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la OMS-Europa ($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dentro de este grupo también se debe incluir las normativas más drásticas, que establecen límites de inmisión menores al valor orientativo

que establece la OMS, como son las de Connecticut (6.3), Washington (4.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Nueva York (1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Nueva Gales del Sur (1.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para zonas urbanas mayor a 2000 personas) y Victoria (0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Australia.

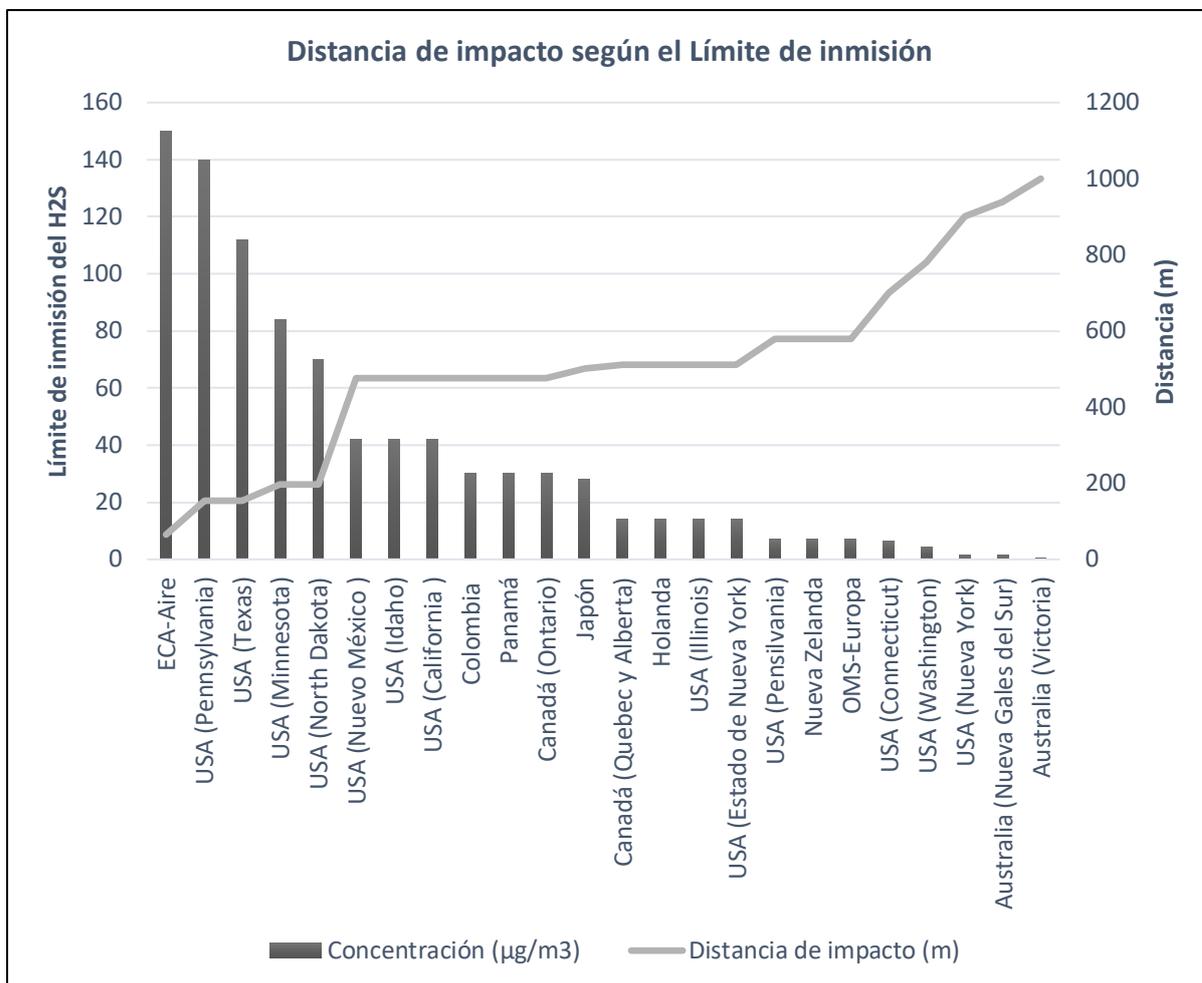


Figura 13. Distancia de impacto según el Límite de inmisión

Se debe considerar que las distancias expuestas y la concentración más alta en inmisión que puede presentarse (867.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) están en relación con los resultados de monitoreo (realizados en primavera) que evidenciaron una estabilidad “neutra” caracterizada por una escasa dispersión horizontal, que se define como un escenario desfavorable. Según Cabrera (2012), este tipo de escenario es clave para predecir y evaluar los impactos de los olores.

En cuanto a la condición atmosférica es la estabilidad “neutra” la que durante el día sería el peor escenario que puede obtenerse para la dispersión, de acuerdo con la Tabla 15, a diferencia de la noche donde puede ocurrir la estabilidad atmosférica. En esta zona de Chilca es posible que la brisa marina genera inversión térmica durante algunas noches, provocando la estabilidad atmosférica caracterizada por una dispersión vertical nula. Sin embargo, en este estudio en particular se consideró el modelamiento con la estabilidad atmosférica que

se presente con mayor frecuencia durante todo el día en una época desfavorable, que según el monitoreo resultó ser la estabilidad “neutra”.

Para realizar el análisis en un escenario desfavorable para la dispersión y determinar la estabilidad que podía presentarse durante el mayor tiempo del día, se consideró realizar monitoreo en primavera por ser la época del año donde se espera que se presenten factores que contribuyen a una menor dispersión, es decir donde se presenten velocidades del viento más leves que en otras épocas del año y que no se presente inestabilidad atmosférica (ver descripción en el ítem 3.5.3).

En verano, por las altas temperaturas, aumenta la transferencia al aire de moléculas de H₂S formadas en el proceso de tratamiento y por ende las concentraciones en emisión de H₂S son mayores que en otras épocas del año. Sin embargo, este estudio se enfocó en la dispersión y en conocer las concentraciones del H₂S en inmisión, considerando una tasa de emisión constante que no se vería afectado por un aumento de concentración de H₂S en emisión.

4.4. Plan de prevención y mitigación de olores

Si bien la empresa inmobiliaria es la que construirá, instalará y realizará la puesta en marcha de la PTARD, que abastecerá el saneamiento de la Habitación Urbana en la urbanización de Chilca, finalmente será administrada por una Empresa Prestadora de Servicios Públicos de Saneamiento⁸ (EPS Saneamiento). Sin embargo, es de conocimiento que estas entidades no tienen la accesibilidad económica para operar PTARD de alta tecnología, además de evidenciarse una mala operación de las PTARD preexistentes a su cargo, ya que no cuentan con suficiente personal competente para esta tarea (Loayza, 2021). Por ello, las propuestas de control de olores deben ser lo más viables posibles y según la revisión bibliográfica revisada correspondería en primer lugar a los controles operacionales y en segundo lugar la implementación de Barreras vivas. Esta propuesta es respaldada por Betancur que, en base a un diagnóstico de una PTARD y encuestas a la comunidad cercana y operarios, establece un análisis de beneficios de propuestas de control de olores, ver Tabla 23.

⁸ Entidad pública, municipal o mixta que proporciona el servicio público de saneamiento urbano. El servicio involucra la captación, tratamiento y disposición final de las aguas residuales tratadas; así como de la obtención, distribución y comercialización del agua potable (Loaiza, 2021).

Tabla 23: Análisis de beneficios de las propuestas de control de olores

Propuesta	Criterio	Valoración		
		Alto	Medio	Bajo
Implementación de Barreras Arbóreas tipo cortavientos	Beneficios para la comunidad	x		
	Riesgo de tipo económico		x	
	Riesgo de tipo Ambiental			x
	Riesgo de tipo administrativo		x	
Implementar nuevas y mejores prácticas operacionales en la PTAR	Beneficios para la empresa	x		
	Riesgo de tipo económico			x
	Riesgo de tipo Ambiental			
	Riesgo de tipo administrativo			x
Implementar nuevas tecnologías de absorción de olores ofensivos	Beneficios para la empresa	x		
	Riesgo de tipo económico	x		
	Riesgo de tipo Ambiental		x	
	Riesgo de tipo administrativo	x		

FUENTE: Betancur, 2017.

4.4.1. Medidas antes de entrada en operación de la PTARD

a. Medidas preventivas

Dentro de las medidas preventivas que involucra el diseño de la PTARD, se deberá exhortar el regirse en la Norma O.S. 090 y considerar en el diseño una trampa de grasa acorde al caudal tratado. Así mismo, se recomienda el encapsulamiento de componentes de la PTARD para evitar el contacto directo de las aguas residuales con la atmósfera. Se debe priorizar el pretratamiento, la sedimentación, el proceso de aireación y el tratamiento de los lodos.

b. Medidas de mitigación

De acuerdo con la normativa O.S. 090 la distancia mínima de separación, entre la PTARD y los lotes de viviendas, que se recomienda es de 100 metros para PTARD de tipo Lodos

activados. Distancia incluso menor a la que exigen otros países para controlar los olores provenientes de PTARD, tal es el caso de Alemania (300 m), Australia (150) y Canadá (300 m). Sin embargo, la normativa también indica que si hubiera fundamentos técnicos esta distancia de separación podría ser menor, acotación que beneficia a las empresas inmobiliarias que requieren ocupar mayor área para lotes de vivienda y menos lotes libres para el amortiguamiento de los efectos de la PTARD.

Pues bien, de acuerdo con el análisis de dispersión, la distancia de separación debe ser de 65 metros (considerando el ECA de Aire $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pero esta distancia puede reducirse al establecer la barrera viva propuesta, que tendrá un efecto protector de los efectos de los malos olores hasta una distancia promedio de 600 m (considerando el crecimiento promedio del árbol de mayor altura, hasta los 30 metros).

La barrera viva estará compuesta de dos filas de vegetación, plantadas en líneas que rodee completamente a la PTARD. Las especies escogidas son especies adaptadas a la zona de Chilca y grandemente utilizadas en la berma lateral de la panamericana Sur. Por otro lado, se plantea el uso de más de una especie en cada fila; a fin de que, ante una afectación por plagas, se dificulte su propagación.

c. Primera Fila (Barrera interna)

La línea de árboles deberá estar ubicada dentro del cerco perimétrico de la PTARD y estar conformada por árboles de menor altura y mayores diámetros de copa (mayor densidad). Se deberán plantar dejando suficientemente espacio, entre ellas, para permitir el desarrollo de las copas y las raíces sin interferencia, se propone una distancia de separación de 5 metros.

Considerando que la dirección predominante de los vientos se dirige al SO (211°), se propone colocar un mayor espesor (capturan mayores contaminantes); mediante la siembra de una segunda barrera interna en forma triangular para ahorrar espacio. Los árboles de esta segunda barrera se deberán ubicar entre los árboles de la primera barrera.

En cuanto a las especies de la primera fila, se propone el uso de Molle Costeño (*Schinus terebinthifolius*) y Meijo (*Hibiscus tiliaceus*) en forma intercalada a una distancia de 5 m entre cada árbol.

d. Segunda Fila (Barrera Externa)

La segunda línea de árboles estará conformada por árboles de mayor tamaño, con copa menos ancha que la primera barrera, de manera que interfiera con la dispersión del

contaminante que logren atravesar la barrera interna. Esta barrera se ubicará fuera del cerco perimétrico en la zona destinada para la ubicación del parque.

En cuanto a las especies se propone en primer lugar el uso del Eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*), ya que es una especie con alta tendencia a ser utilizada en el control de olores, es resistente a la salinidad, es de crecimiento rápido (llega hasta los 50-60 m de altura en su edad de altura, de acuerdo con especialistas agrónomas de CARBONO GROUP) y tiene un aroma fresco y mentolado que lo describe como una especie aromática. Si bien su requerimiento hídrico es medio, el consumo de agua no sería un problema mayor, ya que la demanda de agua será principalmente atendida con el agua residual tratada proveniente de la futura PTARD. La reutilización del agua residual doméstica es una actividad que se tiene contemplada para este sistema de tratamiento.

En segundo lugar, se propone el uso intercalado de Eucalipto y Casuarinas (*Casuarina equisetifolia*). Esta última es una especie que presenta similares características al Eucalipto y además requiere menos agua. Sin embargo, al no ser una especie aromática, la incorporación de olores agradables estaría respaldado por el Eucalipto.

4.4.2. Medidas cuando entre en operación la PTARD

Con la finalidad de no generar impactos negativos significativos en receptores sensibles externos se debe cumplir con el Manual de Operación entregado por la empresa encargada del diseño y construcción de la PTARD. En este Manual se exhorta las medidas para el correcto funcionamiento de la misma. Además, el cumplimiento de este manual debe ir acompañado de inspecciones rutinarias, mantenimientos periódicos de los equipos y componentes de la PTARD, una supervisión y monitoreo y capacitaciones de los técnicos encargados de la PTARD.

a. Inspecciones rutinarias

Las inspecciones deben realizarse diariamente, a través de ellas se podrán identificar la existencia de algunas anomalías/fallas en el funcionamiento de la PTARD que podrán ser corregidas con antelación. Para facilitar las inspecciones se deberá tener una cartilla con indicadores de efectividad de acuerdo a las etapas de tratamiento, los que deberán ser revisados en cada inspección.

Se propone los siguientes indicadores, en las etapas de tratamiento donde se evidencian las mayores emisiones de olores:

i. Etapa de pretratamiento

- Afluente (agua que ingresa al sistema de tratamiento) en condiciones atípicas.
- Alta presencia de pelusas, grasas y espumas (por presencia de desinfectantes o detergentes).
- Caudal de ingreso a la PTARD.

ii. Etapa de tratamiento primario y secundario

- Presencia y color de las espumas en el sistema de tratamiento biológico (color blanco indicativo de presencia de detergentes, marrón indicativo de exceso de aceites y grasas en el sistema y negras indicativo de condiciones anaeróbicas).
- Presencia de ruido del motor del aireador o alerta roja en el panel de control de las bombas
- Cantidad de lodo presente en los tanques de sedimentación y reactores.
- Cantidad de OD en el agua residual (al menos 1 mg/L).
- Nivel de pH en el agua residual (mantener un $\text{pH} \geq 7$ y < 9)
- Temperatura en el agua residual (mantener una temperatura < 24 °C)

iii. Línea de tratamiento de lodos

- Cantidad de lodo presente en los tanques de secado de lodos.
- Días que permanecen almacenados los lodos ya estabilizados (no exceder los 7 días).

Las inspecciones rutinarias deberán ser acompañadas por monitoreos in situ, realizadas por el mismo técnico operativo, con el uso de un multiparámetro (equipo de medición de parámetros de calidad de agua).

b. Mantenimientos periódicos

Los mantenimientos realizados a los equipos y componentes de la PTARD deben ser programados semestralmente. La frecuencia puede aumentar dependiendo de la necesidad que surge posterior a las inspecciones y la evolución de los indicadores de efectividad. Dentro de la programación también se debe incluir el mantenimiento del sistema de alcantarillado y de las barreras vivas, considerando que su efectividad está en relación a su mantenimiento.

c. Supervisión y Monitoreo

La supervisión no programada tendrá la finalidad de verificar el cumplimiento de las medidas operativas en la PTARD y el cumplimiento de los mantenimientos programados. Para esta actividad se deberá delegar a un responsable altamente capacitado.

Por otro lado, para asegurar el correcto funcionamiento de la PTARD se deberá contar con un Plan de Monitoreo. El monitoreo consistirá en un muestreo y análisis de la calidad del agua del agua residual doméstica, realizado por un laboratorio acreditado ante INACAL. De acuerdo a los resultados de las inspecciones visuales se deberá determinar en qué proceso de la PTARD se tomarán las muestras. Para conocer los parámetros que se analizarán, representativos de la calidad del agua, se deberá utilizar como referencia los señalados en la Tabla 24. Debe considerarse que el Plan de Monitoreo deberá incluir el Programa de Monitoreo declarado en sus Instrumentos de Gestión Ambiental, aprobados por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, que forman parte de los compromisos de la empresa.

Tabla 24: Parámetros analizados vs componente de la PTAR

Punto de muestreo	Parámetros analíticos y mediciones
Afluente	DBO ₅ , DQO, SST (sólidos suspendidos totales), pH, Caudal, Aceites y Grasas
Tanque de tratamiento biológico	OD, SST, SSV (sólidos suspendidos volátiles)
Efluente	DBO ₅ , SST, DQO, pH, Coliformes termotolerantes, T°, Caudal, Aceites y Grasas
Línea de recirculación y purga	SST, SSV, Caudal

FUENTE: Adaptado de Calderón, 2015 citado en Macías y Padilla, 2021; D.S N° 003-2010-MINAM.

En el caso del efluente, como punto de muestreo, se propone una frecuencia de monitoreo semestral. Así mismo, los resultados deberán ser contrastados con los LMP para los efluentes de PTARD, establecidos en el D.S N°003-2010-MINAM.

d. Capacitaciones de operación y mantenimiento de la PTARD

Con la finalidad de contar con técnicos especializados en la PTARD, se deberán realizar capacitaciones programadas de la operación y mantenimiento de esta. Esta capacitación deberá incluir la identificación de fallas en el sistema y las actividades correctivas que se deben aplicar. Se sugiere que las capacitaciones sean semestrales.

V. CONCLUSIONES

- En el presente TSP se realizaron monitoreos de las variables meteorológicas radiación solar, dirección y velocidad del viento en la H.U donde se construiría la futura PTARD. Los monitoreos y análisis de los resultados fueron realizados por un laboratorio acreditado ante INACAL.
- Los datos de monitoreo meteorológico junto con información de la fuente de emisión obtenida de la empresa inmobiliaria y uso de un DEM fueron los datos de entrada para modelar la dispersión del H₂S. Este gas fue elegido para el análisis porque es el gas representativo de los olores generados en la PTARD y utilizado como la primera línea en el análisis de los olores en estos sistemas de tratamiento por su capacidad para transferirse de la matriz agua a aire y su bajo umbral de reconocimiento que lo hace más perceptible y detectable ante el olfato humano. El monitoreo meteorológico se realizó en el área donde sería ubicada la futura PTARD y se tomaron datos representativos por 3 días consecutivos en primavera. El análisis de dispersión se realizó con el modelo matemático Pluma gaussiana y los resultados indicaron que los impactos negativos significativos se dirigen en la dirección SO y que la distancia hasta la cual se presentan los mayores efectos es a 65 m si se compara con el ECA de Aire que establece un valor límite de 150 µg/m³ y una extensión mayor a 100 metros si se toma como referencia la normativa internacional. Asimismo, se obtuvo que la mayor concentración en inmisión tiene el valor de 867.4 µg/m³.
- En base a los resultados se elaboró un Plan de prevención y mitigación del gas trazador de las PTARD, el H₂S. Este Plan abarcó la etapa de diseño y operación de la PTARD que estará a cargo de una EPS. Las medidas de prevención propuestas se centraron en el diseño y mejores prácticas operacionales, a través de las inspecciones rutinarias, mantenimientos periódicos, una adecuada supervisión y monitoreos en la PTARD y capacitación del personal encargo de la operación. Por otra parte, las medidas de mitigación involucraron el diseño de una barre viva que rodeara a la PTARD, constituida

de dos filas de árboles, la barrera interna conformada por Molle Costeño y Meijo y la externa conformada por Eucalipto. Para reforzar la dirección donde los impactos mayores se presentarían se diseñó una segunda barrera dentro de la barrera interna, para aumentar la densidad y la captura de las moléculas del gas odorantes.

VI. RECOMENDACIONES

- Para que un modelo de dispersión tenga menor incertidumbre se requiere del ingreso de datos meteorológicos cercanos a la propia fuente de emisión, de al menos 1 año como mínimo para capturar completamente la variabilidad estacional de las condiciones meteorológicas que influye en la dispersión de los contaminantes. Por lo cual, se recomienda implementar equipos de medición en el área de la PTARD para obtener mayor data meteorológica que contribuya a realizar otros análisis de dispersión en la zona que contribuya a evaluar el funcionamiento de la PTARD.
- En el presente TSP se realizó un análisis de dispersión del gas H₂S considerando el periodo diurno y nocturno. Sin embargo, se recomienda un análisis de dispersión más completo, utilizando data meteorológica de la zona de al menos 1 año que incluya el monitoreo de las condiciones de nubosidad del cielo durante la noche para evidenciar la dispersión del gas específicamente durante la noche.
- Si bien para predecir la dispersión de los olores de la PTARD se utilizó el gas predominante y representativo de las PTARD, el H₂S, este gas no es el único emitido por este tipo de fuente. Por lo cual, se recomienda realizar un modelo de dispersión considerando las emisiones en unidades de olores europea y de esta manera comparar la extensión de los impactos con el modelo reproducido en este TSP.
- Considerando el rápido crecimiento poblacional, muchas de las PTARD se encuentran dentro de las zonas residenciales y en centros poblacionales, lo cual presenta un riesgo constante de quejas en respuesta a la exposición de olores desagradables provenientes de estas fuentes. Las quejas traen consigo una mala reputación a las empresas inmobiliarias que vendieron los lotes de vivienda cercanos a estas PTARD, sumando a ello conflictos sociales y una reducción en los precios de los lotes. Por consiguiente, se recomienda que todas las empresas inmobiliarias realicen una Evaluación ambiental de los impactos de los olores desagradables provenientes de las PTARD, haciendo uso de los análisis de dispersión de los olores provenientes de estas.

- Considerando que actualmente no existe información acerca del análisis de los olores, en el Perú. Se recomienda que el Sistema Nacional de Gestión Ambiental involucre el problema de los olores en la Gestión Ambiental del Perú, elaborando Guías y normativas, como lo han venido haciendo países latinoamericanos como Chile, Panamá y Brasil. De esta forma se puede tener un marco referencial para elaborar los análisis de dispersión de olores en PTARD y presentar los resultados con el margen de incertidumbre que tenga en cuenta: el tipo de modelo matemático usado, el tipo de método de medición de olores, las características de la PTARD y la data meteorológica utilizada. Asimismo, se podría contar con regulación clara y exigible legalmente para que las empresas identifiquen, valoren los impactos de los olores y se hagan responsables de su control, considerado que generan no solo molestias sino también problemas a la salud pública que afectan finalmente a la calidad de vida de los receptores.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, G., & Villoslada, N. (2022). Estudio de la dispersión geoespacial de contaminantes de los gases NO_x, CO, SO₂ y partículas (PM₁₀) emitidas por pollerías de la ciudad de chota año 2021 [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/11537/31034>
- Austigard, A., Svendsen, K., & Heldal, K. (2018). Hydrogen sulphide exposure in waste water treatment. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 13, 10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s12995-018-0191-z>
- Baawain, M., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., & Al-Jabri, A. (2017). Assessment of hydrogen sulfide emission from a sewage treatment plant using AERMOD. *Environ Monit Assess*, 189-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-017-5983-6>
- Barrera, M. (2010). Aplicación del modelo ISC-AERMOD para la estimación de dispersión de olores : caso estudio planta de tratamiento de aguas servidas La Farfana [Tesis de grado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/112443>
- Beltranena, R., & Hernández, E. (2016). Modelación de dispersión de H₂S y Ruido en campo Geotérmico [Trabajo de Diplomado , Universidad de el Salvador]. Repositorio institucional. https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12729/1/T_Final_Corregido.pdf
- Betancur, D. (2017). Implementación de sistemas de tratamiento básico, para el manejo y control de olores ofensivos en la Planta de tratamiento de aguas residuales, Municipio del retiro-Antioquia; [Proyecto aplicado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD]. Repositorio institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13206>
- Brancher, M., Griffiths, K., Franco, D., & Lisboa, H. (2016). A review of odour impact criteria in selected countries around the World. *Chemosphere*, 1531-1570. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.160>

- Brancher, M., Pringer, M., Franco, D., Belli Filho, P., De Melo Lisboa, H., & Schauburger, G. (2019). Assessing the inter-annual variability of separation distances around odour sources to protect the residents from odour annoyance. *Journal of Environmental Sciences*, 79, 11-24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.09.018>
- Cabrera, J. (2012). Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso]. Repositorio institucional. <http://repositorio.ucv.cl/handle/10.4151/91402>
- Capelli, L., & Sironi, S. (2018). Combination of field inspection and dispersion modelling to estimate odour emissions from an Italian landfill. *Atmospheric Environment*, 191, 273-290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.007>
- 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, 1977-1985. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.022>
- Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., & Jean-Michel, G. (2013). Measuring odours in the environment vs. dispersion modelling: A review. *Atmospheric Environment*, 79, 731-743. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.029>
- Carrasco, L. (2022). Modelamiento de la Dispersión de contaminantes gaseosos en aire [Informe de investigación, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/6495>
- CESEL Ingenieros. (2007). Estudio de Plan de Manejo Ambiental de las Operaciones de Embalse y Desembalse del Lago Chinchaycocha.
- Copes, J. (2022). Efecto de la estabilidad atmosférica en la dispersión del material particulado en la ciudad de Huancayo (Enero – Marzo) [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8443>
- D.S N° 003-2010-MINAM. (2010, 22 de enero). Aprueban Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento Residuales Dompesticas o Municipales. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2010-minam/>

- Denby, B., Georgieva, E., & Lükewille, A. (2011). The application of models under the European Union's Air Quality Directive: a technical reference guide. Technical Report 10/2011.
- DGAAM. (2007). Guía para la Evaluación de Impactos en la calidad del aire por actividades minero metalúrgicas. Repositorio del Ministerio de Energía y Minas.
- Dinçer, F., Kemal Dincer, F., Sari, D., Ceylan, Ö., & Ercan, Ö. (2020). Dispersion modeling and air quality measurements to evaluate the odor impact of a wastewater treatment plant in İzmir. *Atmospheric Pollution Research*, 11(Issue 12), 2119-2125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.018>
- Eastern Research Group. (2013). Recommended Procedures for Development of Emissions Factors and Use of the WebFIRE Database. US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Sectors Policies & Programs Division, Measurement Policy Group.
- Environment Agency. (2002). Draft Horizontal Guidance for Odour H4. Part 1 – Regulation and Permitting. <https://www.sepa.org.uk/media/61325/ippc-h4-1-odour-pt-1-draft-for-consultation-2002.pdf>
- Environment Agency. (2011). H4 Odour Management: How to comply with your environmental permit, IPPC H4 Horizontal Guidance for Odour, Part 1 - Regulation and permitting. Recuperado de: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7ba9a2ed915d1311060b16/geho0411btqm-e-e.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2017). Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter. GPO, 82(10). Recuperado de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/appw_17.pdf
- EPA. (2017). Revisions to the Guideline on Air. GPO, 54.
- EPA. (11 de mayo de 2023). Air Emissions Factors and Quantification. Retrieved setiembre de 7 de 2023, from United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>

- Escobar, D., & Montoya, E. (2020). Generación de emisiones de ácido sulfhídrico y posible alternativas de control para su reducción [Trabajo Monográfico, Universidad de Antioquia]. Recuperado de:
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/17974/5/MontoyaEstefania_2020_GeneracionEmisionesAcido.pdf.
- European Environment Agency. (26 de julio de 2007). EIONET. Retrieved 6 de julio de 2023, from European Topic Centre on Air and Climate Change: Recuperado de:
<https://web.archive.org/web/20071102135620/http://pandora.meng.auth.gr/mds/strquery.php?wholedb>
- European Environment Agency. (2011). The application of models under the European Union's Air Quality Directive: A technical reference guide. Recuperado de:
<https://www.eea.europa.eu/publications/fairmode>
- Giraldo, E., & Lozada, D. (2019). Origen de los olores en plantas de tratamiento de aguas residuales [Trabajo de grado - Especialización, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito] . Recuperado de Repositorio institucional.
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/981>
- Guiadotti. (1996). Hydrogen sulfide intoxication. *Occup. Med*, 46(5), 367-371.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62627-1.00008-1>
- Gutierrez, Y. (2020). Impacto de las sustancias odorantes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) San Jeronimo en la calidad ambiental [Tesis de doctorado, Universidad Andina del Cusco]. Recuperado de repositorio institucional.
<https://hdl.handle.net/20.500.12557/4366>
- Hernández, D., & Calvo, J. (2016). Mitigación de malos olores generados en plantas de tratamiento de aguas residuales: Estudio de caso El Roble de Puntarenas [Informe final de proyectos de investigación y extensión, Tecnológico de Costa Rica]. Recuperado de repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/2238/6846>
- Jiang, Melder, Keller, & Yuan. (2017). Odor Emissions from Domestic Wasterwater: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47 (17), 1581–1611. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/10643389.2017.1386952>

- Lewis, R., & Copley, G. (2015). Chronic low-level hydrogen sulfide exposure and potential effects on human health: A review of the epidemiological evidence. *Critical Reviews in Toxicology*, 45:2, 93-123.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3109/10408444.2014.971943>
- Llavador, F. C., Espinós, H. M., & Mantilla, E. I. (2012). Estimation of hydrogen sulfide emission rates at several wastewater treatment plants through experimental concentration measurements and dispersion modeling. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(7), 758-766.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2012.674008>
- Loaiza, E. (2021). Propuesta de Barreras Naturales vegetativas para la mitigación de olores en la Planta de tratamiento de aguas residuales-Cusco [Tesis de doctorado, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez]. Recuperado de repositorio institucional. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/5516>
- Locateli, A., Grasel, A., Polezer, G., Brown, A., Potgieter-Vermaak, S., Camargo, D., Yamamoto, C., & Moreton, R. (2018). Human exposure to hydrogen sulphide concentrations near wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, 610-611, 583-590. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.209>
- Macías, M., & Padilla, J. (2021). Evaluación del Tiempo de retención hidráulica de la Planta de Tratamiento de aguas residuales en base a Lodos activados como posible causante de la contaminación odorífera en la ciudadela Puerto Seymour [Tesis de grado, Universidad Laica de Guayaquil]. Repositorio institucional. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/4401>
- MINAM. (2019). Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. Repositorio institucional. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-ambiental-aire>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006, 8 de mayo). D.S N° 011-2006-VIVIENDA. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Recuperado de: <https://ww3.vivienda.gob.pe/ejes/vivienda-y-urbanismo/documentos/Reglamento%20Nacional%20de%20Edificaciones.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (MVCS). (2006). Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma OS.090 Plantas de tratamiento de Aguas Residuales. Lima, Perú. MVCS. Recuperado de

<https://www.gob.pe/institucion/munisantamariadelmar/informes-publicaciones/2619690-os-090-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-ds-n-022-2009>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (s.f). Olores. Retrieved 15 de 12 de 2023, from <https://olores.mma.gob.cl/estudios-y-publicaciones/>

Mohamed, & Alshalhi. (2021). Assessment of hydrogen sulfide emission in a wastewater. *Evirom Monit Assess*, 193, 352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10661-021-09116-9>

Muttamara. (1996). Wastewater characteristics. 16(Issues 1-4), 145-159. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00052-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00052-6)

Oberschelp, G., Ciro, M., Harrand, L., Salto, C., & Palenzona, M. (2020). Cortinas forestales: rompevientos y amortiguadoras de deriva de agroquímicos. Ediciones INTA, Estación Experimental Agropecuaria Concordia. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Mastrandrea-Ciro-2/publication/342752121_Cortinas_forestales_rompevientos_y_amortiguadoras_de_deriva_de_agroquimicos/links/5f04dcd5299bf1881608e8ee/Cortinas-forestales-rompevientos-y-amortiguadoras-de-deriva-de-agroqui

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2014). Fízcalización Ambiental en Aguas Residuales. Repositorio SIAL Trujillo. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/fiscalizacion-ambiental-aguas-residuales>

Pando, A. (2019). Determinación del sulfuro de hidrógeno y variables meteorológicas en el AA.HH. el Milagro del distrito de Independencia [Tesis de grado, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur]. Repositorio institucional. <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/163>

Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J., Canova, M., & Roudier, S. (2010). Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment. Industrial Emissions Directive.

Pinasseau, A., Zerger, B., Roth, J., Canova, M., & Roudier, S. (2010). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control), EUR 29362 EN. European Union. Recuperado de:

<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC113018>

Ramírez, C. (2019). Diagnóstico para la mejora de la evaluación de impacto por olor en el Marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), [Tesis de grado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/159579>

Resolución N° 1541 de 2013. (12 de Noviembre de 2013). "Por lo cual establecen los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generen olor ofensivos y se dictan otras disposiciones". Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-1541-de-2013/>

Rosenfeld, P., & Suffet, I. (2004). Understanding odorants associated with compost, biomass facilities, and the land application of biosolids. *Water Sci Technol*, 49(9): 193-9. Recuperado de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15237625/>

SENAMHI. (2013). Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2011. Recuperado de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/403>

SENAMHI. (2014). Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2012. Recuperado de repositorio institucional.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/404>

Servicio de Evaluación Ambiental. (2017). Guía para la Predicción y Evaluación de Impactos por olor en el SEIA. Repositorio del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile.

https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2017/12/21/guia_pye_impactos_por_olor_171221.pdf

Silva, M. (2019). Percepción poblacional de la contaminación ambiental generada por la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas residuales) Totorá, Huamanga-Ayacucho [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6006>

Talaiekhosani, A., Bagheri, M., Goli, A., & Khoosani, M. R. T. (2016). An overview of principles of odor production, emission, and control methods in wastewater collection and treatment systems. *Journal of environmental management*, 170, 186-206. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.021>

- Troposfera Soluciones Sostenibles, S.L. (2017). Estudio de dispersión de olores de las balsas de evaporación y su futura ampliación en la planta de Olives & Pickles, en Almendralejo, Badajoz.
<http://extremambiente.juntaex.es/files/ESTUDIO%20DISPERSI%C3%93N%20DE%20OLORES.pdf>
- UNESCO. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas residuales: El recurso desaprovechado. Recuperado de: www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en
- Varela-Bruce, C., & Antileo, C. (2021). Assessment of odour emissions by the use of a dispersion model in the context of the proposed new law in Chile. *Journal of Environmental Management*, 295(113208).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113208>
- Vargas, C. (2020). Diseño de un sistema de Barreras Vivas para el control de olores ofensivos provenientes del sector porcícola, en la comunidad corocito del resguardo indígena Wacoyo, Puerto Gaitán, Meta [Tesis de grado, Universidad Santo Tomas]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/11634/30733>
- WHO EUROPE. (2000). Air Quality guidelines for Europe; second edition. World Health Organization.
<https://www.who.int/europe/publications/i?publishingoffices=d0c06246-8a8d-4eb9-a06d-74cccf436b20>
- Zwain, H. M., Nile, B. K., Faris, A. M., Vakili, M., & Dahlan, I. (2020). Modelling of hydrogen sulfide fate and emissions in extended aeration sewage treatment plant using TOXCHEM simulations. *Scientific reports*, 10(1), 22209.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-020-79395-8>

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Composición del agua residual doméstica

Contaminantes	Parámetros representativos principales	Cantidad aportada	Posibles efectos del contaminante en la PTARD
Sólidos suspendidos	SST (Sólidos suspendidos totales)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos de lodos • Problemas estéticos • Adsorción del contaminante • Protección de patógenos
Materia orgánica biodegradable	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de oxígeno • Condiciones sépticas
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento excesivo de algas
Patógenos	Coliformes	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Enfermedades transmitidas por el agua
Materia orgánica no biodegradable	Aceites y grasas, Pesticidas, algunos detergentes, otros	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> • Toxicidad (varios) • Espuma • Reducción de la transferencia de oxígeno (detergentes) • No biodegradabilidad • Mal olor

Continuación ...

Contaminantes	Parámetros representativos principales	Cantidad aportada	Posibles efectos del contaminante en la PTARD
Metales	Elementos específicos (As, cd, cr, cu, Hg, Ni, pb, Zn, etc.)	Bajo	<ul style="list-style-type: none">• Toxicidad e inhibición del tratamiento de lodos• Problemas con el uso agrícola de lodos
Sólidos inorgánicos disueltos	Total, de sólidos disueltos, conductividad	Medio	<ul style="list-style-type: none">• Salinidad excesiva – daño a las plantaciones (riego)• Problemas con permeabilidad-suelo

FUENTE: Adaptado de UNESCO , 2017.

Anexo 2 Límites de inmisión (calidad de aire) para el H₂S

Países	µg/m ³ calculado	Especificaciones	Utilizado para el control en PTAR
Australia (Victoria)	0.14		
	1.38	<1 segundo-Para zonas urbanas de más de 2000 personas	
	2.07	<1 segundo-Para zonas urbanas de 500 - 2000 personas	
	2.76	<1 segundo-Para zonas urbanas de 125 - 500 personas	
Australia (Nueva Gales del Sur)			X
	3.45	<1 segundo-Para zonas urbanas de 30-125 personas	
	4.14	<1 segundo-Para zonas urbanas de 10-30 personas	
	4.83	<1 segundo-Para zonas urbanas con menor o igual a 2 personas	
Holanda	13.9		X
WHO (EUROPA)			

Continuación ...

Países	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculado	Especificaciones	Utilizado para el control en PTAR
	7	Valor orientativo	
	150	Concentración más baja a la que se observan efectos adversos, sin considerar las molestias por olores	
Nueva Zelanda	7		
Japón	28-280	No especifica	
	4	24 min	
Canadá (Quebec y Alberta)			X
	14	1 hora	
	30	30 min	
Canadá (Ontario)			X
	30	1 hora	
USA (Connecticut)	6.3	No especifica	
	84	3 min	
USA (Bahía California)			
	42	60 min	
USA(California)	42	1 hora	X

Continuación ...

Países	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculado	Especificaciones	Utilizado para el control en PTAR
USA (Idaho)	42	30 min	
	14	24 horas	
USA (Illinois)	14	8 horas	
	70	30 min - No podrán superarse en más de dos veces al año	
	42	30 min- No podrán superarse en más de dos veces en un período de cinco días	
	84	1 hora	
	9.8	3 meses	
USA (Minnesota)			

Continuación ...

Países	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculado	Especificaciones	Utilizado para el control en PTAR
Nuevo México	42	30 min	
	14	1 hora	
USA (Estado de Nueva York)	14	1 hora	
	0.98	1 año	
USA (Ciudad de Nueva York)	1.4	No especifica	X
USA (North Dakota)	70	Instantáneo	
USA (Pensilvania)	140	1 hora	X
	7	24 horas	
USA (Texas)	168	30 min- en terrenos industriales	
	112	30 min - en terrenos residencial/comercial	
USA (Washington)	4.2-9.8	No especifica	

Continuación ...

Países	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ calculado	Especificaciones	Utilizado para el control en PTAR
Colombia	7	24 horas	X
	30	1 hora	
Panamá	30	Para zonas no industriales.	X

Nota: Las unidades de concentración original de cada referencia han sido convertidas a $\mu\text{g}/\text{m}^3$, utilizando el siguiente factor de conversión: $1\text{ppm} = 1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (considerando condiciones estándar, $P = 1 \text{ bar}$, $T = 25^\circ\text{C}$).

FUENTE: Adaptado de Hernández y Calvo, 2016.; Ramírez, 2019; WHO EUROPE, 2000.