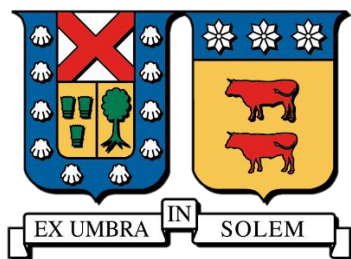


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL QUIMICA
VALPARAISO – CHILE



**“Validación en entorno de simulación de un nuevo modelo de
dispersión de contaminantes al aire respecto al modelo de
referencia AERMOD”**

IRENE MONTSERRAT LARRAL NAVARRO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL QUÍMICA**

Profesor Guía: Santiago García
Profesor Correferente: Erwin Hernández

Octubre 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo:

Validación en entorno de simulación de un nuevo modelo de dispersión de contaminantes al aire respecto al modelo de referencia AERMOD

Nombre del candidato(a):

Irene Montserrat Larrañaga Navarro

Carrera / Grado:

Ingeniería Civil Química

Campus: Casa Central Departamento: Química

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, SANTIAGO GARCÍA GEN, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

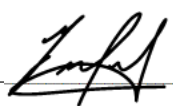
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 04/11/2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/11/2025 Firma: 

Dedicatoria y agradecimientos

Esta memoria se la dedico a Jose Manuel Larral Villanueva

Gracias por tu apoyo en cada una de las etapas en las que me acompañaste. No te imaginas cuanto me hace falta mi querido abuelo. Sé que si estuvieses aquí serias el más orgulloso de todo lo que he logrado.

También quiero agradecer profundamente a mi familia -a mis padres, mi hermano y mis abuelos- por su amor incondicional, su paciencia y por estar siempre presentes, incluso en los momentos más difíciles. Gracias madre por tus llamadas, tus humoradas y por apoyar toda mi carrera profesional, gracias padre por creer que podía, por buscar cada manera que estaba a tu alcance para motivarme a seguir adelante, sin ustedes no habría llegado a donde estoy.

A mis amigos, Vale, Guille, Fabian, Nico y todos aquellos que hacen la vida más llevadera y bonita.

Emilio gracias por tu apoyo y por siempre creer en mí, gracias por tener la paciencia de leer este escrito una y otra vez, gracias por ser ese pilar que no sabía que necesitaba.

Gracias a mi profe guía Santiago García y a mi profesor correferente Erwin Hernández por creer en este proyecto desde la primera reunión. Gracias a Rocío que me ayudo en las primeras etapas y especialmente a Cesar que me ayudo con las modelaciones en ARD3D, gracias por la paciencia infinita que tuviste en cada modificación que hacía en las modelaciones.

Finalmente quiero agradecerles a todos mis compañeros peludos: a mis queridos Sabri, Stuard. Kevin, Pepa y Blus, gracias a mis bebes Annie, Chely, Ginny y Mary, pero sobre todo gracias a mi Moquita que ha estado conmigo desde antes de que siquiera pensara en estudiar esta carrera.

Resumen ejecutivo

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales desafíos ambientales en Chile, especialmente en zonas industriales y rurales donde las emisiones odorantes impactan la calidad de vida de las comunidades. En este contexto, la regulación de olores en planteles porcinos adquiere relevancia tras la promulgación del Decreto N° 9 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece límites de emisión para este tipo de instalaciones. La disponibilidad de modelos de simulación confiables es esencial para evaluar y gestionar dichas emisiones, por lo que el presente estudio busca contribuir a la validación de herramientas predictivas aplicables al contexto nacional.

El objetivo general de la investigación fue evaluar y comparar la efectividad del modelo ARD3D, desarrollado por la Universidad Técnica Federico Santa María, respecto al modelo de referencia AERMOD, recomendado por el *Servicio de Evaluación Ambiental* (SEA) de Chile. Los objetivos específicos incluyeron la definición de escenarios de modelación, la simulación de la dispersión de olores bajo distintas condiciones operacionales y la comparación cuantitativa y cualitativa de los resultados obtenidos.

La metodología consideró la modelación de emisiones odorantes generadas en un plantel porcino ubicado en Mallarauco, Región Metropolitana. Se emplearon datos meteorológicos del modelo WRF y topografía procesada en AERMAP para representar el dominio de 12×12 km con fuentes emisoras asociadas a los sectores de maternidad, recría, engorde y tratamiento de purines. Se desarrollaron distintos escenarios: modelación anual completa, aumento del área de simulación y aumento de la cantidad de cerdos, con el fin de evaluar la sensibilidad y consistencia de ambos modelos.

Los resultados mostraron que AERMOD tiende a representar la pluma odorante de manera continua y extendida, adecuada para estimaciones regionales, mientras que ARD3D ofrece una mayor resolución local y una representación tridimensional más realista de la dispersión. Este último permitió identificar zonas receptoras coincidentes con sectores donde existen antecedentes de denuncias por olores, lo que sugiere una mejor sensibilidad del modelo frente a la topografía y a la variabilidad meteorológica. Ambos modelos entregaron concentraciones del mismo orden de magnitud, validando la consistencia numérica de ARD3D respecto al estándar de referencia.

ARD3D demostró un desempeño comparable a AERMOD, con ventajas técnicas asociadas a su formulación no estacionaria y capacidad de adaptación a entornos complejos. Su coincidencia con áreas reportadas por la comunidad y su potencial para representar dinámicas locales lo posicionan como una alternativa nacional viable para estudios de impacto odorante. Este trabajo contribuye al fortalecimiento de la modelación atmosférica en Chile y sienta las bases para futuras aplicaciones de ARD3D en evaluaciones ambientales y normativas nacionales.

Tabla de contenido

Dedicatoria y agradecimientos	2
Resumen ejecutivo	3
1. Introducción	8
2. Objetivos	10
2.1. Objetivo General	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. Antecedentes generales.....	11
3.1. Contexto ambiental en Chile	11
3.2. Situación ambiental de la región metropolitana	13
3.3. Problemática de olores	13
3.3.1. Denuncias de olores	14
3.3.2. Normativa para regular la emisión de olores.....	15
3.4. Servicio de Evaluación Ambiental	16
3.5. Industria Porcina en Chile: Plantel objetivo	16
3.5.1. Descripción general del proceso productivo	18
3.5.2. Tratamiento de purines.....	19
3.6. Modelos de calidad del aire	20
3.6.1. Fundamentos de la contaminación atmosférica.....	20
3.6.2. Tipos de modelos	21
3.6.3. Parámetros y variables en la modelación	22
3.7. Modelos de dispersión a comparar.....	23
3.7.1. AERMOD	23
3.7.2. ARD3D	25
4. Materiales y métodos	27
4.1. Dominio de modelación	27
4.2. Línea base Clima y meteorología	27
4.2.1. Clima.....	27
4.2.2. Meteorología	28
4.3. Topografía	28
4.4. Plantel escogido	29

4.5.	Fuentes de emisión	31
4.6.	Escenarios de modelación.....	33
4.6.1.	Modelación anual completa, caso base	33
4.6.2.	Aumento del área de simulación	33
4.6.3.	Aumento de emisiones	34
5.	Resultados	35
5.1.	Modelación Anual completa	35
5.2.	Aumento del Área de simulación	38
5.3.	Aumento de emisión	40
5.4.	Análisis y visualización comparativa de resultados.....	42
6.	Conclusiones.....	50
7.	Referencias.....	52
8.	Anexos	54
	Datos de entrada en AERMOD y resultados	54

Índice de figuras

Figura 1.	Denuncias de regiones por olores. Fuente: (Sinia,MMA, 2022)	15
Figura 2.	Distribución regional de existencia de cerdos al primer semestre del 2018 (ODEPA, 2019)	17
Figura 3.	Existencia de cerdos y número de criaderos: 2011-2018 (ODEPA, 2019)	17
Figura 4.	Mapa del dominio de modelación	27
Figura 5.	Rosa de los vientos en el plantel durante el año 2021	28
Figura 6.	Datos topográficos del área de estudio	29
Figura 7.	Diagrama de flujo del proceso productivo del plantel.....	30
Figura 8.	Ubicación de las fuentes de emisión en el plantel objetivo.....	33
Figura 9.	AERMOD - Caso base, promedio anual	35
Figura 10.	ARD3D - Caso base, promedio anual.....	36
Figura 11.	ARD3D - Caso base, valor máximo	36
Figura 12.	Imagen superior ARD3D promedio anual caso base, imagen inferior promedio anual AERMOD caso base	37

Figura 13. AERMOD – Aumento del área de simulación, promedio anual	39
Figura 14. ARD3D - Aumento del área de simulación, promedio anual	40
Figura 15. ARD3D - Aumento del área de simulación, valor máximo	40
Figura 16. AERMOD – Aumento de emisiones, promedio anual	41
Figura 17. ARD3D - Aumento de emisiones, promedio anual	42
Figura 18. ARD3D - Aumento de emisiones, valor máximo	42
Figura 19. Comparaciones de isolíneas (AERMOD vs ARD3D), caso base	43
Figura 20. Comparaciones de isolíneas (AERMOD vs ARD3D), ampliación de dominio	44
Figura 21. Comparaciones de isolíneas (AERMOD vs ARD3D), aumento de emisión.....	44
Figura 22. AERMOD, caso base (vista tridimensional, Google Earth)	46
Figura 23. AERMOD, caso base (vista tridimensional, software).....	46
Figura 24. ARD3D, caso base (vista tridimensional).....	47
Figura 25. ARD3D, aumento del área de simulación (vista tridimensional)	47
Figura 26. ARD3D, aumento de emisiones (vista tridimensional)	48
Figura 27. Datos del tamaño de grilla caso inicial	55
Figura 28. Datos de terreno	56
Figura 29. Concentraciones máximas a 1 hora, caso inicial.....	57
Figura 30. Concentraciones máximas 8 horas, caso inicial	57
Figura 31. Tamaño de grilla para el caso: aumento del área de simulación.....	58
Figura 32. Concentraciones máximas a 1 hora, caso aumento de grilla.....	59
Figura 33. Concentraciones máximas a 8 horas, caso aumento de grilla	59
Figura 34. Tamaño de grilla para el caso: aumento de emisiones.....	60
Figura 35. Concentraciones máximas a 1 hora, caso aumento de aumento de las emisiones....	61
Figura 36. Concentraciones máximas a 8 horas, caso aumento de aumento de las emisiones....	61

Índice de tablas

Tabla 1. Superficie utilizada por sector	29
Tabla 2. Superficie utilizada por instalación.....	30
Tabla 3. Fuentes de emisión por sector	32
Tabla 4. Fuentes de emisión por estanque	32

Tabla 5. Comparación de los resultados en cada caso.....48

Tabla 6. Datos de emisión caso inicial.....54

Tabla 7. Datos de emisión, aumento de las emisiones 60

1. Introducción

La creciente industrialización y el desarrollo urbano acelerado han intensificado los desafíos ambientales contemporáneos. Entre ellos, la calidad del aire ocupa un lugar central, ya que la emisión de contaminantes atmosféricos por parte de actividades industriales no solo representa una amenaza para la salud pública, sino que también plantea interrogantes sobre la sostenibilidad de los modelos productivos actuales.

En Chile, la problemática de la contaminación atmosférica adquiere especial relevancia debido a las condiciones geográficas y climáticas particulares del país. La Región Metropolitana, por ejemplo, ha sido declarada zona saturada por diversos contaminantes desde 1996, evidenciando la necesidad urgente de herramientas precisas para la predicción y control de emisiones (Sinca, 2024)

En este escenario, el *Servicio de Evaluación Ambiental* (SEA) desempeña un rol regulador fundamental a través del *Sistema de evaluación de Impacto Ambiental* (SEIA). Este sistema exige que los proyectos susceptibles de generar emisiones atmosféricas incorporen estudios de modelación de dispersión de contaminantes con el fin de anticipar sus efectos sobre la población y el entorno. Dentro de sus guías oficiales el SEA recomienda el uso de modelos gaussianos como AERMOD como estándar para la evaluación de impactos de contaminantes primarios complementando con el modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) para datos meteorológicos (SEA, 2012).

Principalmente la industria porcina chilena representa un sector económico estratégico concentrado principalmente en la región de O'Higgins y en crecimiento sostenido hacia otras regiones como la Metropolitana. Sin embargo, este desarrollo ha traído consigo desafíos ambientales significativos particularmente relacionados con la emisión de olores que afectan la calidad de vida de las comunidades cercanas, la reciente promulgación del Decreto N° 9 del Ministerio del Medio Ambiente que establece normas específicas de emisión para plantales porcinos (BCN, 2023) subraya la urgencia de contar con herramientas de modelación precisas y confiables.

Ante esta necesidad un grupo de investigación del departamento de matemática de la Universidad Técnica Federico Santa María, liderado por el profesor Erwin Hernández, ha desarrollado un modelo alternativo de calidad de aire llamado ARD3D. Este modelo basado en la solución de ecuaciones de advección-difusión-reacción dependientes del tiempo representa una propuesta innovadora que podría complementar o mejorar las capacidades predictivas de los modelos tradicionalmente utilizados.

El presente trabajo surge de la necesidad de validar científicamente las capacidades predictivas de ARD3D frente al modelo de referencia AERMOD utilizando como caso de estudio un plantel porcino ubicado en Mollave, región Metropolitana, la selección de este caso específico se

justifica tanto por su relevancia ambiental local, evidenciada en las denuncias ciudadanas documentada en los informes de fiscalización de la Superintendencia del Medio Ambiente como por la disponibilidad de datos meteorológicos y topográficos necesarios para una modelación rigurosa.

La importancia de esta investigación radica en que, de validarse la efectividad de ARD3D se podría contar con una herramienta nacional de modelación que contribuya a mejorar la precisión en las evaluaciones ambientales fortaleciendo así el marco regulatorio chileno y proporcionando a las autoridades ambientales alternativas tecnológicas para la toma de decisiones informadas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Evaluar y comparar la efectividad de dos modelos de dispersión de contaminantes, ARD3D desarrollado por un grupo de investigación y AERMOD recomendado por el *Servicio de Evaluación Ambiental* (SEA), en la predicción y evaluación del impacto ambiental de las emisiones generadas por un plantel porcino en Mallarauco, región Metropolitana.

2.2. Objetivos específicos

- Proponer diferentes escenarios de simulación de dispersión al aire (tipo de fuente emisora, tipo de contaminante, sustancia emitida, ubicación de la fuente, condiciones meteorológicas, etc.) y realizar la predicción de la pluma de contaminación utilizando el modelo de dispersión de contaminantes al aire desarrollado.
- Comparar los resultados obtenidos en los diferentes escenarios respecto a los resultados que se obtendrían con el modelo AERMOD View.
- Evaluar en qué casos y en qué condiciones el modelo propuesto logra unos resultados de predicción de la pluma de contaminación similares a los del modelo de referencia AERMOD.

3. Antecedentes generales

3.1. Contexto ambiental en Chile

Chile es un país que posee grandes contrastes geográficos y climáticos, desde el desierto de Atacama en el norte hasta los campos de hielo en el sur. Esta diversidad se ve reflejada en los desafíos ambientales que enfrenta el país, a continuación, se describen algunos de los principales desafíos y las medidas que se han tomado en algunos de estos casos.

Escasez y contaminación del agua

La gestión del agua en Chile es una problemática creciente, especialmente en la zona centro-norte del país, donde la población es más densa y donde las precipitaciones más escasas.

La escasez del agua se debe principalmente a los siguientes factores: aumento de la población y crecimiento de la actividad económica, junto con la disminución sostenida de las precipitaciones. Estos factores, junto con la contaminación del agua provocada principalmente por las actividades industriales, agricultura y minería, reducen su disponibilidad para el consumo humano y su uso agrícola (Bergamini et al., 2017).

Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es otro problema grave en Chile, particularmente en áreas densamente pobladas y zonas industriales y mineras. Estudios indican que gran parte de la población está expuesta a niveles de contaminantes que superan las recomendaciones de la *Organización Mundial de la Salud* (OMS). En respuesta a esto, el gobierno ha implementado planes de prevención y descontaminación atmosférica, los cuales contienen medidas dirigidas a las principales fuentes de emisión (Bergamini et al., 2017).

Marco legal y políticas ambientales

Chile cuenta con un conjunto de normas de emisión que regulan la cantidad de contaminantes que pueden ser emitidos por diferentes fuentes, como centrales eléctricas, industrias, vehículos y actividades agrícolas. Estas normas se establecen en el Decreto Supremo N°38/2013 (MMA, 2013) y se clasifican en dos tipos:

- Normas primarias: Establece límites permisibles de concentración de contaminantes en el aire para proteger la salud de la población.

Las normas de calidad primaria que se encuentran actualmente vigentes son (SINCA, MMA, 2024):

- Norma de calidad del aire para MP_{2,5} (D.S. N°12/2010)
- Norma de calidad del aire para MP₁₀ (D.S. N°12/2022)
- Norma de calidad del aire para SO₂ (D.S. N°104/2018)
- Norma de calidad del aire para NO₂ (D.S. N°114/2002)
- Norma de calidad del aire para CO (D.S. N°115/2002)

-Norma de calidad del aire para Plomo (D.S. N°136/2000)

-Norma de calidad del aire para O₃ (D.S. N°112/2002)

- Normas secundarias: Establecen límites máximos permisibles de concentración de contaminantes en el aire para proteger el medio ambiente y los recursos naturales.

Las normas de calidad secundaria que se encuentran actualmente vigentes son (SINCA, MMA, 2024):

-Norma de calidad del aire para SO₂ (D.S. N°22/2009)

-Norma de calidad del aire para MPS en la cuenca del río Huasco, III Región (D. Exento N°4/1992)

Estas normas de emisión son un instrumento de gestión de la calidad de aire y prevención de la contaminación atmosférica, cuyo cumplimiento es obligatorio para todas las fuentes emisoras y es fiscalizado por la *Superintendencia del Medio Ambiente* (SMA).

La ley marco de cambio climático en Chile (BCN, 2022) refleja un compromiso del país con la mitigación del cambio climático, esta legislación establece metas de reducción de emisiones y fomenta la implementación de mitigación y adaptación. Entre sus puntos claves se encuentran:

- Meta de neutralidad del carbono al año 2050
- Creación de la *Estrategia Climática de Largo Plazo* (ECLP)
- Establecimiento de un *Sistema Nacional de Cambio Climático* (SNCC)
- Implementación de medidas de mitigación en sectores clave como energía, transporte, industria y agricultura.
- Promoción de la adaptación al cambio climático en comunidades vulnerables.

Además, Chile adoptó la agenda 2030 de las naciones unidas (Consejo Nacional de la Agenda 2030, 2023), comprometiéndose a alcanzar los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS). Esta agenda se centra en cinco ejes estratégicos proporcionando un marco integral para abordar los desafíos ambientales, Los ejes abordados son los siguientes:

- Personas: Poner fin a la pobreza, el hambre, garantizar la salud y el bienestar de todas las personas
- Planeta: Proteger el planeta y luchar contra el cambio climático
- Prosperidad: Promover la prosperidad económica inclusiva y sostenible
- Paz, justicia e instituciones: Fortalecer las instituciones para lograr sociedades más justas e inclusivas.
- Alianzas: Revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.

Teniendo en cuenta todo esto se puede ver que Chile posee un marco legal y políticas ambientales que buscan proteger el medio ambiente y promover su desarrollo sostenible. La implementación

efectiva de estas políticas es fundamental para enfrentar los desafíos ambientales que se enfrentan como país.

3.2. Situación ambiental de la región metropolitana

La región metropolitana es la más pequeña del país con 15.403 km², pero la más poblada con más de 6 millones de habitantes. Esta región consta de un clima mediterráneo y se caracteriza por una orografía definida por la cordillera de la costa, la depresión intermedia, la cordillera de la costa y las cuencas marginales.

Santiago, la capital del país, es el centro administrativo y económico del país contribuyendo con el 41,5% del PIB, sin embargo, enfrenta serios problemas de contaminación atmosférica especialmente durante otoño-invierno por material particulado respirable (MP10) y en primavera-verano por ozono (O₃). Por esta razón desde 1996 la región ha sido declarada Zona saturada por diversos contaminantes como MP10, PTS, O₃ y CO, además de ser declarada Zona latente por NO₂, esto llevó a la implementación del *Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica* (PPDA) en 1998, actualizado en 2004.

Entre las principales fuentes de contaminación se encuentran los procesos industriales, emisiones vehiculares y uso de chimeneas domiciliarias. La implementación del PPDA ha logrado reducciones significativas en la contaminación por MP10 y MP2,5, aunque los niveles de CO y O₃ siguen superando las normas primarias. La red de monitoreo ambiental de Santiago, que inició en 1987 y se amplió en 1997 revela que las concentraciones más altas de MP10 se registran en otoño-invierno en las comunas del sector poniente, mientras que las de O₃ se concentran en verano en el sector oriente (Sinca, 2024).

3.3. Problemática de olores

El olor es una propiedad de ciertas sustancias que estimulan el sentido del olfato humano, de forma similar a como se combinan sonidos para crear una melodía, varias sustancias pueden juntarse para formar un olor.

La molestia por un olor surge cuando este afecta de manera negativa a las personas. El acrónimo FIDOL describe los factores que determinan el grado de molestia por olor y estas son:

- Frecuencia: Número de veces que el olor se presenta.
- Intensidad: Grado de fuerza con que se percibe el olor.
- Duración: Cuánto tiempo dura la exposición al olor.
- Ofensividad: Nivel de desagrado asociado al olor
- Localización: Donde se encuentran los receptores del olor.

La molestia se genera a partir de la exposición repetida y prolongada a olores desagradables (MMA, 2024).

Los problemas de olores en Chile están fuertemente condicionados por las particularidades climáticas y los recursos naturales de cada región, lo que es crucial al gestionar las áreas aptas para actividades que pueden ser fuentes de olores. La dirección predominante del viento, por ejemplo, es un factor clave para determinar la ubicación de estas fuentes en relación con centros poblados.

En el país se han identificado al menos 12 actividades potencialmente emisoras de olores que pueden generar molestias, dependiendo del tipo de emisión, dispersión y respuesta del receptor. Entre estas actividades se incluyen la crianza y engorda de animales, curtiembres, plantas faenadoras, refinerías de petróleo y sistemas de tratamiento de residuos, entre otros (MMA, 2024).

Según un estudio de ECOTEC en 2013 se identificaron alrededor de 2000 establecimientos en Chile que pertenecen a estas actividades y que potencialmente generan olores molestos para la población (MMA, 2024).

Entre las actividades potencialmente generadoras de olor se encuentran (MMA, 2024):

- Crianza y engorda de animales
- Curtiembres
- Fabricación para alimento de animales
- Fabricación para productos lácteos
- Plantas faenadoras de animales y mataderos
- Fabricación de celulosa
- Plantas procesadoras de productos del mar
- Talleres de redes
- Refinerías de petróleo
- Sitios de disposición final de residuos
- Sistema de tratamiento y/o disposición de residuos líquidos
- Planta de recuperación de molibdeno

3.3.1. Denuncias de olores

Durante el año 2020, la Superintendencia del Medio Ambiente recibió un total de 121 denuncias relacionadas con olores molestos. Las regiones con el mayor número de denuncias fueron la Región Metropolitana (51), la Región de Los Lagos (12), la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (11) y la Región del Maule (10) (Sinia, MMA, 2022). A continuación, se presenta un gráfico que resume estas denuncias

Denuncias por olor a nivel nacional, 2013 - 2020

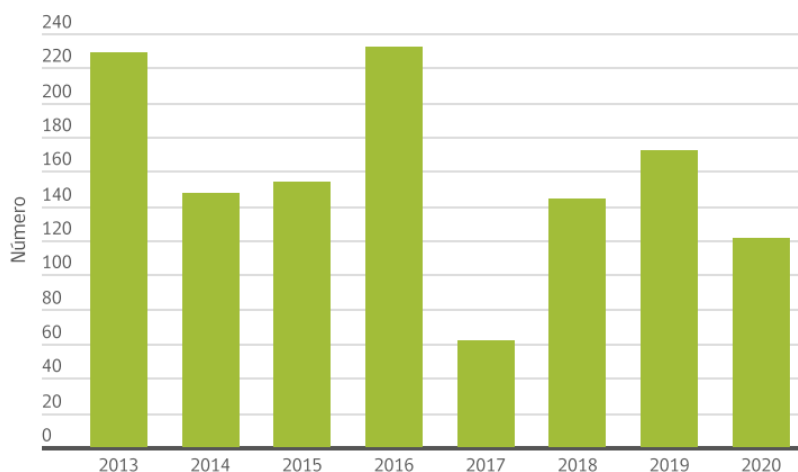


Figura 1. Denuncias de regiones por olores. Fuente: (Sinia,MMA, 2022)

3.3.2. Normativa para regular la emisión de olores

El Ministerio del Medio Ambiente de Chile ha desarrollado normativas específicas para regular las emisiones de olores, con un enfoque inicial en los sectores porcino y pesquero. Estas normas buscan proteger la salud pública y mejorar la calidad de vida mediante la implementación de tecnologías en los procesos industriales. La fiscalización está a cargo de entidades como Superintendencia del Medio Ambiente y la Superintendencia de Servicios Sanitarios (MMA, 2024).

3.3.2.1. Decreto 9: Normas de emisión de contaminantes en planteles porcinos

El decreto 9 del Ministerio del Medio Ambiente (BCN, 2023), establece una norma de emisión de olores dirigida específicamente a los planteles porcinos en Chile. Esta normativa se enfoca en regular las emisiones de olores que pueden generar molestias significativas y afectar la calidad de vida de las personas que habitan en las cercanías de estos establecimientos.

Este decreto se aplica a todos los planteles porcinos en Chile, que tengan una cantidad igual o superior a 750 animales, esto incluye tanto las instalaciones existentes como las nuevas las cuales deben cumplir con los límites de emisión especificados en el decreto. Esta normativa diferencia entre fuentes emisoras pequeñas, medianas y grandes estableciendo regulaciones específicas para cada categoría de acuerdo con el tamaño de la fuente emisora.

Los límites de emisión están establecidos en términos de *Tasa de Emisión de Olor* (TEO), expresada en *Unidades de Olor Europeas por hora* (ouE/h). Estos límites se diferencian según el tamaño del plantel y su capacidad de animales.

- Fuentes emisoras existentes: Disponen de un plazo de hasta 4 años para cumplir con los límites establecidos, las fuentes medianas y pequeñas pueden eximirse de ciertos

requisitos si demuestran cumplir con un impacto odorante máximo de 8 ouE/m³ en el percentil 95.

- Fuentes emisoras nuevas: Las fuentes emisoras nuevas deben cumplir los límites de emisión desde el inicio de sus operaciones, modelando sus emisiones para asegurar que no excedan el impacto odorante máximo permitido.

3.4. Servicio de Evaluación Ambiental

El *Servicio de Evaluación Ambiental* (SEA) de Chile es una entidad gubernamental responsable de administrar el *Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental* (SEIA), el cual, es un instrumento de gestión ambiental preventivo en Chile que se implementa para asegurar que los proyectos y actividades cumplan con las normativas ambientales establecidas por la ley N°19300 y su reglamento (Chile Atiende, 2022).

Los proyectos se clasifican en dos categorías: Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Los proyectos que ingresan como EIA son aquellos que generan impactos significativos (efectos, características o circunstancias señaladas en el artículo 11 de la ley y detallados en los artículos 4 al 10 del reglamento), los demás proyectos ingresan como DIA (SEA, s.f.).

El proceso de evaluación incluye la participación ciudadana y en algunos casos, la consulta a pueblos indígenas. Finalmente, los proyectos reciben una Resolución de Calificación Ambiental (RCA), que puede ser favorable o desfavorable y esto determina si el proyecto puede ejecutarse y bajo qué condiciones (SEA, s.f.).

En el contexto del SEIA es crucial evaluar cómo los proyectos afectan la calidad del aire, aspectos vitales para realizar una evaluación de impacto ambiental. Para esto se pueden emplear modelos de dispersión atmosférica, estos modelos permiten simular y predecir como la emisión de contaminantes de un proyecto se distribuyen en la atmosfera (SEA, 2012).

El SEA, a través de sus guías establecen criterios para la selección y uso de modelos de calidad del aire, como por ejemplo modelos Gaussianos, Eulerianos, entre otros, asegurando que la evaluación sea precisa, representativa y acorde a la legislación ambiental chilena (SEA, 2012).

3.5. Industria Porcina en Chile: Plantel objetivo

La industria porcina en Chile representa un sector relevante dentro de la producción de carne, caracterizado por su alto nivel de tecnificación y su aporte al mercado nacional e internacional. Aunque la mayor parte de la producción se concentra en la región de O'Higgins, que alberga cerca del 84 % de la población porcina del país, los datos de los últimos años evidencian una disminución

progresiva del número de criaderos y una estabilización en la cantidad total de cerdos, más que un crecimiento sostenido.

Este comportamiento refleja un proceso de consolidación productiva, donde menos establecimientos concentran una proporción mayor de la producción, gracias a mejoras tecnológicas, sanitarias y de gestión que han permitido mantener altos niveles de eficiencia y competitividad.

En las siguientes figuras se presenta la distribución regional de la población porcina, junto con la evolución del número de criaderos y la existencia total de cerdos a nivel nacional (ODEPA, 2019)

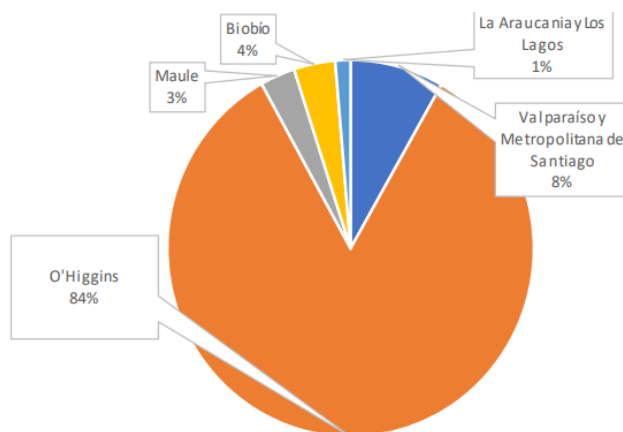


Figura 2. Distribución regional de existencia de cerdos al primer semestre del 2018 (ODEPA, 2019)

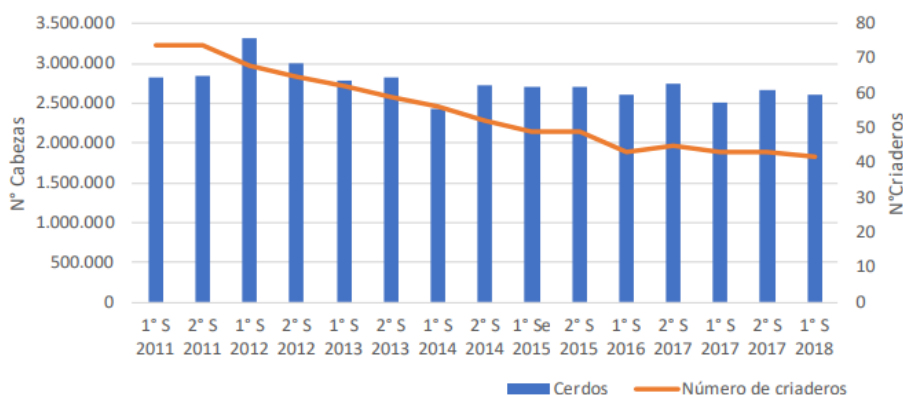


Figura 3. Existencia de cerdos y número de criaderos: 2011-2018 (ODEPA, 2019)

Los planteles de cerdos corresponden a instalaciones agroindustriales destinadas a la cría y manejo intensivo de cerdos, abarcando todas las etapas del ciclo de vida del animal, desde la reproducción hasta el engorde y la preparación para el mercado. Los planteles de cerdos se dividen en diferentes áreas especializadas, cada una destinada a una etapa específica del ciclo productivo de los cerdos (INIA, 2023).

3.5.1. Descripción general del proceso productivo

A continuación, se describen las fases principales del proceso productivo de un plantel porcino (UAB, 2019).

- **Cría y reproducción**

En esta etapa se seleccionan razas específicas de cerdo que sean óptimas para la producción de carne. Esto dependerá de las características productivas que se desee implementar en cada plantel. Luego las cerdas son inseminadas de manera natural o mediante técnicas de inseminación artificial para asegurar la mejor genética. Las cerdas se mantienen en corrales especiales para vigilar su salud y bienestar hasta el momento del parto. La gestación dura aproximadamente 114 días. La detección del celo y la inseminación artificial son prácticas comunes para optimizar la reproducción.

- **Parto y Lactancia**

Las cerdas paren en instalaciones diseñadas para proteger tanto a la madre como a los lechones, el manejo del parto incluye la asistencia para evitar complicaciones y garantizar que los lechones reciban calostro. El periodo de lactancia dura entre 21 y 28 días se procura que los lechones reciban la nutrición adecuada y se aplican prácticas como la adopción de lechones entre cerdas paridas el mismo día para equilibrar camadas.

- **Destete y transición**

Entre los 21 y 28 días, los lechones son destetados y trasladados a las instalaciones de transición. En este periodo, de 5 a 7 semanas, los lechones se alimentan con pienso adecuados para su desarrollo.

- **Crecimiento y engorde**

Los cerdos se trasladan a naves de crecimiento donde permanecen hasta alcanzar un peso adecuado. Este periodo dura entre 14 y 15 semanas.

En la fase de engorde se maximiza la ganancia de peso con una alimentación específica para alcanzar el peso de sacrificio, generalmente alrededor de 100-115 kg

- **Sacrificio y procesamiento**

Los cerdos llegan al matadero con aproximadamente 23-25 semanas de vida. Después del sacrificio, los canales se procesan para obtener diferentes productos, desde cortes frescos hasta jamones y embutidos.

- **Comercialización**

Los productos derivados del cerdo se distribuyen en diferentes mercados, asegurando la trazabilidad y calidad del producto final.

3.5.2. Tratamiento de purines

En los sistemas intensivos de producción porcina la generación de purines es inevitable. Cada cerdo produce una cantidad significativa de excretas que al mezclarse con agua utilizada en la limpieza de las instalaciones da origen a los purines. Estos purines contienen un alto porcentaje de agua (aproximadamente un 95%) y una cantidad significativa de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y fosforo, los cuales puede causar contaminación si no se gestionan adecuadamente.

El impacto ambiental de los purines se manifiesta principalmente en la contaminación de suelo y cuerpos de agua, así como en la emisión de gases como amoníaco y metano. Por ello es esencial implementar sistemas de tratamiento que minimicen estos efectos y permitan un manejo sustentable de residuos.

Una estrategia efectiva para el manejo efectivo de purines debe incluir tanto la implementación de sistemas de tratamiento como un plan de gestión predial que asegure el monitoreo y control continuo de los residuos generados.

A continuación, se presenta una estrategia de control (INIA, 2005).

- Caracterización de purines

Antes de implementar cualquier sistema de tratamiento es fundamental caracterizar los purines, es decir determinar su composición química, biológica y física. Esto incluye medir parámetros de *demanda biológica de oxígeno* (DBO), el contenido de sólidos volátiles, y la concentración de nutrientes como nitrógeno y fosforo. Realizar esta caracterización permite seleccionar el sistema de tratamiento más adecuada y diseñar las instalaciones necesarias para su gestión (INIA, 2005).

- Tratamientos primarios

Los tratamientos primarios son la primera línea de proceso en el manejo de purines, estos incluyen la ecualización y homogenización, y la separación solido-liquido.

- Ecualización y homogenización

Este proceso se realiza en tanques de almacenamiento equipados con agitadores que permiten mantener una composición uniforme del purín. El objetivo es minimizar las variaciones en los flujos y concentraciones de los residuos, facilitando el tratamiento posterior

- Separación sólido-líquido

Este proceso permite separar la fracción sólida del purín (guano) de la fracción líquida (efluente). La separación puede realizarse mediante diferentes métodos como filtros de prensa y separadores centrífugos, y es esencial para reducir el volumen de residuos a tratar y facilitar su manejo.

- Tratamientos secundarios

Una vez separada, tanto la fracción sólida como la líquida pueden someterse a tratamientos secundarios con el fin de lograr su estabilización.

- Tratamientos aeróbicos

Estos sistemas utilizan oxígeno para degradar la materia orgánica en CO₂ y agua. Sin embargo, debido a las altas cargas orgánicas de los purines, los tratamientos aeróbicos son más adecuados para la fracción sólida o para sistemas de bajo flujo

- Tratamientos anaeróbicos

En estos sistemas la degradación se realiza en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente metano) que puede ser utilizado como fuente de energía. Este tipo de tratamiento es más adecuado para la fracción líquida de los purines y es especialmente efectivo en la reducción de patógenos y la estabilización de nutrientes.

El tratamiento de purines en la industria porcina es un aspecto fundamental para la sostenibilidad ambiental de esta actividad, a través de la caracterización adecuada de los purines y la implementación de sistemas de tratamiento bien diseñados es posible reducir de manera significativa el impacto ambiental de estos residuos.

3.6. Modelos de calidad del aire

3.6.1. Fundamentos de la contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es una preocupación creciente debido principalmente a sus efectos adversos en la salud humana y en el medio ambiente. Esta se origina principalmente de fuentes antropogénicas como las emisiones atmosféricas, el tráfico vehicular, la actividad agrícola, entre otros; liberando una variedad de contaminantes, por ejemplo, partículas suspendidas, gases nocivos y compuestos orgánicos volátiles (SEA, 2012).

La contaminación atmosférica se compone de diversos contaminantes, como lo son los óxidos de nitrógeno (NO_x), los que contribuyen a la formación de ozono y lluvia ácida, el dióxido de azufre (SO₂), que al igual que el compuesto anterior también participa en la formación de lluvia ácida, además de afectar al sistema respiratorio de las personas. Las partículas finas conocidas como MP10 y MP2,5, son partículas con diámetros menores a 10 micrómetros. Debido a su tamaño

pueden penetrar profundamente en los pulmones causando problemas respiratorios a largo plazo y aumentando el riesgo de enfermedades crónicas (Jacobson, 2005).

La dispersión de contaminantes en la atmósfera está influenciada significativamente por factores meteorológicos y topográficos. Un ejemplo de esto son los vientos, los cuales desempeñan un papel crucial al transportar y diluir los contaminantes, las variaciones y las direcciones que estos toman pueden alterar rápidamente la distribución de los contaminantes en áreas extensas. La temperatura y la inversión térmica también afectan la dispersión, durante la inversión una capa de aire caliente sobre una capa de aire frío cercana al suelo impide que los contaminantes asciendan, resultando una mayor contaminación cerca del suelo. Otro factor que se debe tener en cuenta es la topografía, las montañas y valles pueden crear patrones en los vientos locales influyendo en la acumulación de contaminantes en áreas específicas (Jacobson, 2005).

Para poder predecir la distribución de contaminantes en la atmósfera se usan modelos de dispersión atmosférica. Estos modelos utilizan ecuaciones matemáticas y datos meteorológicos para simular cómo se mueven y se dispersan los contaminantes. Estos modelos son fundamentales en la planificación ambiental y en la gestión de calidad del aire (Jacobson, 2005).

3.6.2. Tipos de modelos

Los modelos de calidad del aire se utilizan para comprender y predecir la dispersión de contaminantes en la atmósfera, lo que implica el uso de modelos matemáticos que simulan la dinámica de la atmósfera y la química de los contaminantes.

Los modelos varían en su complejidad y su selección depende de las necesidades específicas del estudio. De acuerdo con la literatura, los modelos de dispersión atmosférica son los siguientes (De Visscher, 2014) :

- Modelos de Pluma Gaussiana: Este modelo es esencial para simular la dispersión de contaminantes en el aire a corta distancia. Se basa en la distribución Gaussiana para describir la dispersión de contaminantes desde una fuente puntual como una chimenea. El modelo considera factores como la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica para predecir la concentración de contaminantes en diferentes puntos. Es ampliamente utilizado por su simplicidad y eficacia en condiciones estables y terrenos planos. Ejemplos de software que implementan este modelo son SCREEN3 y AERMOD.
- Modelos Eulerianos de Advección y Convección: El uso de este modelo es adecuado para estudios de dispersión de contaminantes a gran escala, se basa en un enfoque de cuadrícula donde la atmósfera se divide en celdas y dentro de cada celda se calcula el transporte y la transformación química de los contaminantes. Este modelo es complejo y permite una simulación detallada de cómo los modelos interactúan con la atmósfera y

entre sí, siendo muy útil para el análisis a nivel regional o nacional. Un ejemplo de software que implementa es modelo es CMAQ.

- Modelos Lagrangianos Estocásticos de partículas: Este modelo es particularmente útil para simular la dispersión de contaminantes en la atmósfera a una escala más localizada. Se basa en el seguimiento individual de contaminantes, considerando factores como la turbulencia atmosférica y las condiciones meteorológicas. Este enfoque permite una representación más detallada y realista de la dispersión de contaminantes, especialmente en condiciones atmosféricas variables y complejas. Un ejemplo de software es el modelo alemán AUSTAL2000.
- Modelos de Puff Gaussiano: Se utiliza para simular las dispersiones episódicas y puntuales, como las que ocurren durante accidentes industriales. A diferencia del modelo de pluma gaussiana que asume una emisión continua, este modelo trata las emisiones como eventos aislados que se dispersan en el tiempo y en el espacio. Este enfoque es particularmente útil para predecir dispersión de contaminantes en situaciones donde las emisiones no son constantes o regulares.
Los modelos tipo Puff funcionan bien en un rango de 50 km, aunque pueden emplearse hasta los 200 km. Un ejemplo es el software CALPUFF.
- Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD): Este modelo utiliza algoritmos avanzados para simular de manera detallada el flujo y la dispersión de contaminantes en entornos complejos. El CFD es especialmente útil para modelar la interacción de contaminantes con estructuras y obstáculos en entornos urbanos o industriales, proporcionando una representación tridimensional de la dispersión de contaminantes. Ofreciendo un alto nivel de precisión y detalle en la modelación.

3.6.3. Parámetros y variables en la modelación

Los parámetros y variables son claves al realizar una modelación y variarán según el tipo de modelo a utilizar. Aun así, existen unos parámetros que son fundamentales, los cuales son (De Visscher, 2014):

- Datos meteorológicos: Aquí se incluye la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad. Estos parámetros son cruciales para entender cómo se mueven y dispersan los contaminantes en la atmósfera.
- Datos de emisión: Se considera información sobre la cantidad, tipo y características de las emisiones de los contaminantes (por ejemplo, indicar si se trata de fuentes puntuales).

- Datos topográficos y uso de suelos: Se incluye la topografía del área a evaluar, como, por ejemplo, la elevación del terreno, obstáculos naturales y/o construidos, y la distribución de la vegetación.
- Condiciones atmosféricas: Se consideran aspectos como la estabilidad atmosférica y las turbulencias que puedan existir, ya que dichas variables influyen en la dispersión de los contaminantes.

3.7. Modelos de dispersión a comparar

3.7.1. AERMOD

AERMOD es un modelo de dispersión atmosférica desarrollado con el propósito de simular y predecir la concentración de contaminantes en la atmosfera provenientes de diversas fuentes como plantas industriales, fuentes móviles y urbanas. El modelo fue creado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). El objetivo principal de esta herramienta es proporcionar una herramienta precisa y eficiente para la regulación de la calidad del aire (Silva & Godoy , 2016).

AERMOD se ha convertido en el modelo de referencia para las evaluaciones de dispersión de emisiones industriales debido a su capacidad para integrar datos meteorológicos y topográficos en sus simulaciones, a diferencia de otros modelos que no consideran adecuadamente las interacciones entre la atmósfera y las características del terreno. AERMOD incorpora de manera robusta variables tales como la rugosidad del terreno, la elevación y los gradientes térmicos, esto permite simular con mayor precisión cómo los contaminantes se dispersan, acumulan o diluyen bajo diferentes condiciones (Silva & Arcos, 2011).

3.7.1.1. Componentes de AERMOD

AERMET: Es el procesador meteorológico de AERMOD, este procesa datos meteorológicos para proporcionar las condiciones de entrada necesarias para la simulación de dispersión, incluye variables como la velocidad y dirección del viento, la temperatura, la humedad, la radiación solar y otras condiciones atmosféricas necesarias para el modelado preciso.

AERMAP: Este módulo se utiliza para procesar datos topográficos y generar un archivo de entrada que describe la elevación y las características geográficas del terreno.

Modelado de dispersión de pluma gaussiana: AERMOD utiliza una aproximación Gaussiana para simular la dispersión de contaminantes en la atmosfera. Este modelo asume que la pluma de contaminantes se dispersa siguiendo una distribución gaussiana tanto en dirección horizontal como vertical, lo que permite calcular las concentraciones en diferentes puntos del área de estudio.

3.7.1.2. Distribución Gaussiana

AERMOD se basa en la teoría de la dispersión Gaussiana, que describe cómo los contaminantes se dispersan en la atmósfera siguiendo una distribución normal en la dirección del viento.

La concentración de contaminantes C en un punto (x, y, z) determinado se calcula utilizando la función de distribución gaussiana (De Visscher, 2014):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z-h)^2}{\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(z+h)^2}{\sigma_z^2}\right] \right\}$$

En donde:

- Q es la tasa de emisión de la fuente
- u corresponde a la velocidad del viento en la dirección x
- σ_y y σ_z son las desviaciones estándar de la dispersión en las direcciones y & z respectivamente
- H es la altura de la chimenea o fuente de la emisión

3.7.1.3. Limitaciones de AERMOD

A pesar de la robustez y aplicabilidad, AERMOD tiene algunas limitaciones que es importante considerar al utilizarlo para la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos, estas limitaciones pueden afectar tanto la precisión como la aplicabilidad de los resultados en ciertas situaciones específicas (Silva & Godoy, 2016):

- Dependencia de datos meteorológicos: Una de las principales limitaciones de AERMOD es su fuerte dependencia de datos meteorológicos detallados y precisos. El modelo requiere datos de alta resolución sobre variables como la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y estabilidad atmosférica. Si estos datos no están disponibles o son inexactos, los resultados pueden ser significativamente erróneos.
- Asunción de estado estacionario: AERMOD asume que las condiciones atmosféricas son relativamente estables o “estacionarias” durante un periodo de tiempo determinado lo que significa que no puede manejar bien situaciones de cambio rápido o fluctuaciones meteorológicas. Esto es particularmente relevante en áreas costeras o de alta montaña en donde las condiciones atmosféricas pueden cambiar drásticamente en periodos cortos de tiempo.
- Falta de consideración para fuentes no puntuales: AERMOD es particularmente eficaz para modelar fuentes puntuales como chimeneas industriales, pero presenta dificultades

cuando se trata de fuentes más dispersas, como el tráfico vehicular o las emisiones distribuidas por calefactores domésticos a lo largo de grandes áreas urbana. Aunque el modelo puede ser ajustado para incluir fuentes superficiales o volumétricas la precisión disminuye a medida que la complejidad de la fuente emisora aumenta y las suposiciones sobre la homogeneidad de las emisiones no siempre se alinean con la realidad.

- Limitaciones en la resolución topográfica: Aunque AERMOD tiene la capacidad de integrar datos topográficos a través de AERMAP, la resolución de estos datos puede ser un problema en regiones donde la topografía es compleja y no se dispone de datos detallados, por ejemplo en áreas montañosas o valles estrechos, pequeñas variaciones en el terreno pueden tener un impacto significativo en la dispersión de contaminantes pero si los datos topográficos no tienen una resolución suficientemente alta el modelo puede no logran representar adecuadamente estos efectos.
- Falta de validación continua: En muchos estudios los resultados de AERMOD necesitan ser validados contra mediciones reales en el terreno para asegurar su precisión, sin embargo, en ciudades donde no hay suficientes estaciones de monitoreo de la calidad del aire resulta difícil de implementar.

3.7.2. ARD3D

El software ARD3D es una herramienta diseñada para modelar la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Este software se basa en la solución de la ecuación ADR dependiente del tiempo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot (A \nabla C) + b \cdot \nabla C + rC = f, \quad \text{en } \Omega \times (0, T]$$

Con condiciones de contorno e iniciales asociadas:

$$C(0, x) = C_0 \text{ en } \Omega$$

En donde:

- $C = C(x, t)$: Representa la concentración del contaminante en el punto $x \in \Omega$ (dominio espacial) y el tiempo t .
- A es la matriz de difusión anisotrópica que tiene entradas no negativas
- $b = b(x, t)$ es el campo de velocidad del viento tridimensional.
- r es el término de la reacción
- f es el término fuente que puede estar asociado a la emisión o deposición del contaminante.

Esta ecuación describe cómo la concentración de un contaminante cambia en el tiempo debido a procesos de transporte de masa fundamentales en la atmósfera: advección (arrastre por el

viento), difusión (dispersión por turbulencia) y reacción/decaimiento (procesos químicos o biológicos).

Para obtener una solución aproximada de esta ecuación diferencial parcial, el solucionador aplica una discretización tanto espacial como temporal, resolviendo el problema mediante el método de elementos finitos.

- Discretización espacial: *Stremline Upwind Petrov-Galerkin* (SUPG):

El software utiliza el método SUPG para la discretización del dominio espacial (Ω) enriqueciendo la formulación de elementos finitos estándar para manejar ecuaciones que presentan perturbaciones singulares. Este tipo de situaciones es común en la atmósfera, donde el transporte por viento es mucho más relevante que la mezcla difusiva. Cuando se aplican métodos convencionales bajo estas condiciones, suelen aparecer oscilaciones numéricas inestables que distorsionan la solución física del problema.

Para corregir este inconveniente, el esquema SUPG incorpora términos de estabilización adicionales en la formulación de los elementos finitos. Dichos términos actúan a lo largo de las líneas de corriente (streamlines), es decir, en la dirección predominante de la advección. De esta forma, se logra mantener la estabilidad y precisión de la solución, evitando la aparición de oscilaciones y controlando la difusión numérica artificial, un error común en otros métodos de discretización.

- Discretización Temporal: Esquema de Euler Implícito

Para la discretización del término temporal $\frac{\partial C}{\partial t}$, ARD3D emplea el Esquema de Euler Implícito, perteneciente a la familia de los métodos de diferencias finitas en el tiempo.

Este esquema transforma el problema transitorio en una secuencia de problemas estacionarios, resolviéndolos paso a paso en intervalos discretos de tiempo (Δt). Aunque es un método de primer orden en el tiempo, su principal ventaja es ser incondicionalmente estable, lo que garantiza estabilidad numérica sin importar el tamaño del paso temporal. Está característica lo convierte en una herramienta robusta para resolver ecuaciones donde los fenómenos cambian lentamente o donde la estabilidad es prioritaria frente a la precisión temporal.

La modelación del método SUPG con el esquema de Euler implícito resulta ser un método altamente eficiente y preciso para resolver la ecuación ADR, permitiendo simular de forma estable la evolución espacio-temporal de los contaminantes atmosféricos (Alvarado, y otros, 2021)

4. Materiales y métodos

4.1. Dominio de modelación

El dominio de modelación utilizado corresponde a una grilla cartesiana uniforme de 12x12 km centrada en las coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*), referidas al Datum WGS 84, Zona 19 S, con centro en el punto E = 300 892 m y N = 6 282 581 correspondientes a la zona de Mallarauco, Región Metropolitana. Las fuentes emisoras se ubican en el centro del dominio lo que permite representar los gradientes de concentración más significativos.

Este dominio se definió mediante una red de receptores espaciados en 500 metros cada uno, 25 puntos en cada eje, con un total de 625 receptores, como se puede ver en la Figura 4.

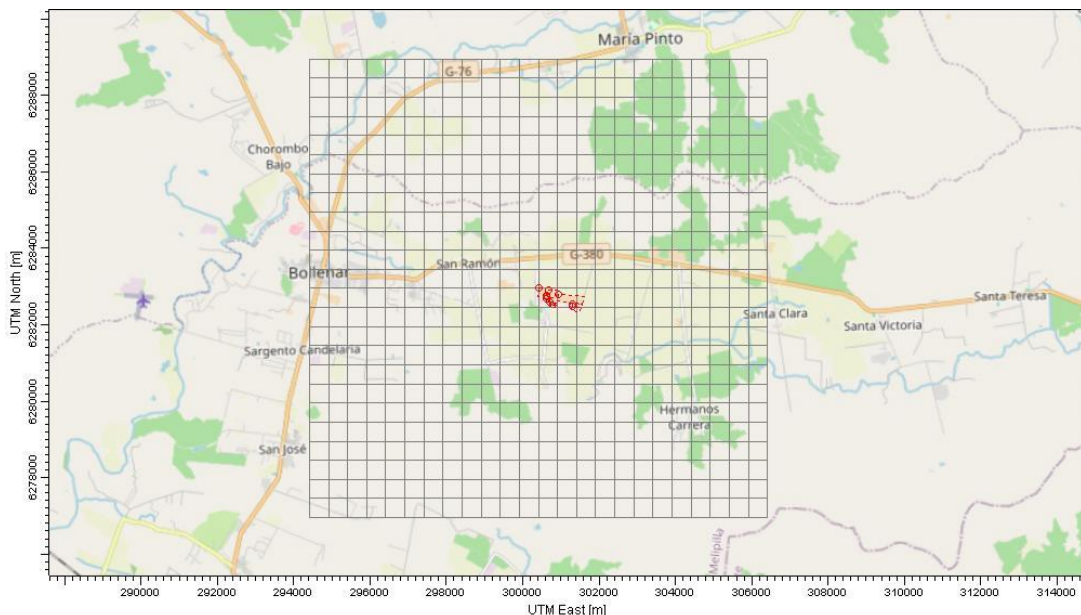


Figura 4. Mapa del dominio de modelación

4.2. Línea base Clima y meteorología

4.2.1. Clima

La Región Metropolitana presenta un clima mediterráneo con una estación seca prolongada y un invierno lluvioso, la temperatura media anual es de 13,9 °C, siendo enero el mes más cálido y julio el más frío. Las precipitaciones son irregulares con un promedio anual de 365,2 mm, variando según la ubicación geográfica, disminuyen desde la costa hacia la Depresión Intermedia y aumentan en la cordillera de los andes. En Colina y algunas zonas de Santiago el clima es más árido debido a la barrera que representa la cordillera de la costa.

El clima se caracteriza por la continentalidad, influida por la cordillera de la costa y el alejamiento del mar. Existen dos tipos principales de clima: mediterráneo con estación seca y prolongada y

clima frío de altura en la cordillera de los andes donde las temperaturas son bajas y predominan las precipitaciones solidas lo que permite acumulación de nieve (BCN, 2024).

4.2.2. Meteorología

Los datos meteorológicos empleados en la modelación corresponden al año 2021, obtenidos mediante el modelo Weather Research and Forecasting Model (WRF) que permite obtener una predicción precisa de los parámetros climáticos en la zona de estudio, además, este es el modelo numérico recomendado por el Servicio de Evaluación Ambiental.

4.2.2.1. Velocidad y dirección de viento

Se utilizaron los datos del modelo WRF en el programa WRPLOT View obteniendo la rosa de los vientos correspondiente a un periodo de un año. Como se puede observar en la Figura 5. los vientos predominantes provienen principalmente del oeste con una mayor frecuencia hacia el suroeste con una velocidad media del viento de 1,82 m/s.

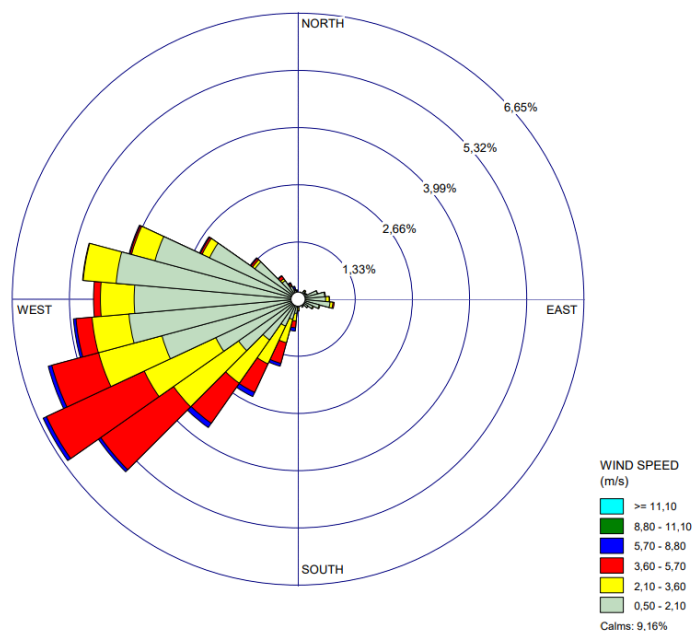


Figura 5. Rosa de los vientos en el plantel durante el año 2021

4.3. Topografía

El área de estudio es una zona de depresión intermedia caracterizada por una combinación de terrenos planos y ondulados con cerros de mediana altitud.

Los datos topográficos utilizados en la modelación han sido obtenidos a partir de información de terreno procesada en AERMAP en donde se generaron los datos presentados en la Figura 6, se

observa que la elevación del terreno varia desde los 150 m aproximadamente hasta más de 730 m con pendientes marcadas en sectores cercanos a la Cordillera de la Costa.

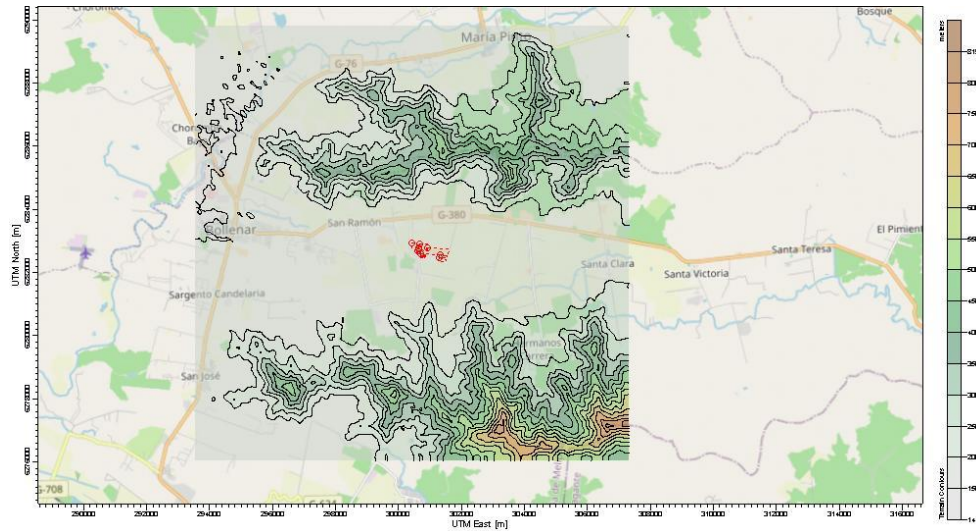


Figura 6. Datos topográficos del área de estudio

4.4. Plantel escogido

El plantel escogido para realizar la modelación está ubicado en Mallarauco, Región Metropolitana, con coordenadas de latitud $-33,577908^\circ$ y longitud $-71,145316^\circ$. Este plantel cuenta con tres sectores de producción: maternidad, recría y engorde, además de un sistema de tratamiento de purines que incluye dos estanques de acumulación, un pozo de homogeneización, una laguna aerobia, un humedal y dos lagunas de acumulación.

Las características generales del Plantel objetivo, como la distribución de áreas, número de cerdos por sector, fuentes de emisión y disposiciones de las instalaciones fueron obtenidas a partir de la memoria de título de Jose Torres Brito (Torres Brito, 2022)

En la Tabla 1 y Tabla 2 se indica la superficie utilizada por cada una de las instalaciones del plantel, la información del número de cerdos y los pabellones por sector.

Tabla 1. Superficie utilizada por sector

Instalación	Superficie	Pabellones	Cerdos
Sector maternidad	26.845	20	7.895
Sector recría	31.190	24	22.000
Sector engorde	104.128	28	32.000

Tabla 2. Superficie utilizada por instalación

Instalación	Superficie
Estanque acumulador 1	100
Estanque acumulador 2	100
Pozo homogeneizador	27
Laguna Anaerobia	6.250
Humedal	13.500
Laguna Acumulación 1	16.500
Laguna acumulación 2	16.000

En la Figura 7 se presenta un diagrama de flujo del proceso productivo del plantel a modelar. Los cerdos son trasladados entre los sectores de maternidad, recría y engorde según su etapa de vida. El purín generado en estos sectores es tratado mediante un proceso que incluye varias etapas: primero se retiene en dos estanques acumuladores, luego es transportado a un estanque de homogeneización para obtener una mezcla homogénea, después el purín pasa a una laguna anaeróbica donde se degrada biológicamente produciendo biogás. Finalmente el purín tratado se descarga en un humedal y se almacena en dos lagunas de acumulación antes de su disposición final.

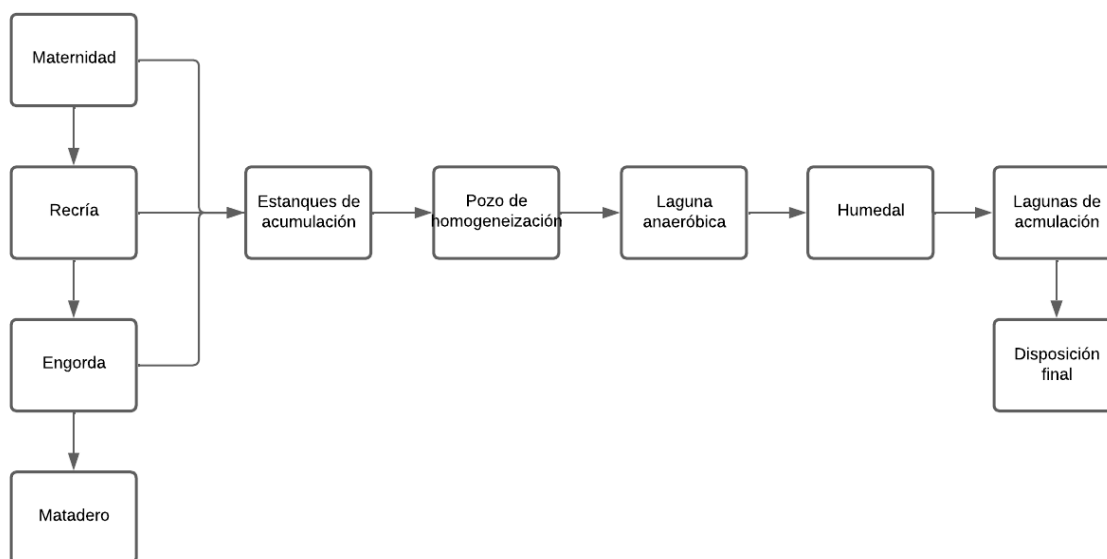


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso productivo del plantel

4.5. Fuentes de emisión

Las principales fuentes de emisión de olor en el plantel corresponden a los pabellones destinados a la crianza de cerdos que se agrupan en tres sectores: maternidad, recría y engorde. Además, se identifican fuentes relacionadas con el tratamiento de los purines que incluyen estanques acumuladores, un pozo homogeneizador, una laguna anaerobia, un humedal y dos lagunas de acumulación. Las emisiones de olor de los pabellones se medirán según la cantidad de cerdos, mientras que las emisiones de las fuentes de tratamiento se medirán en función de la superficie expuesta.

Se asignó un *Factor de Emisión* (FE) a cada fuente emisora, como se detalla en la Tabla 3 y Tabla 4, luego se calculó la *Tasa de Emisión de Olor* (TEO) en base a la cantidad de cerdos o metro cuadrados expuestos.

El *Factor de Emisión* (FE) representa la cantidad de unidades de olor emitidas por unidad de actividad o superficie de la fuente emisora, y corresponde a un valor experimentalmente determinado.

En este estudio, los valores de FE no se calcularon directamente en terreno, sino que fueron adoptados a partir del estudio nacional de caracterización de emisiones odorantes realizado por la consultora Envirometrika (envirometrika, 2019) para el Ministerio del Medio Ambiente, el cual estableció factores promedio de emisión para diferentes etapas del proceso productivo porcino (maternidad, recría, engorde y tratamiento de purines) expresados en OUE/s·m² o OUE/s·animal, según el tipo de fuente.

En dicho estudio, los factores fueron obtenidos mediante mediciones de concentración de olor por olfatometría dinámica (Díaz, 2022), combinadas con tasas de ventilación y flujos de aire medidos en campo para cada instalación. De esta manera, el factor de emisión se calcula como:

$$FE = \frac{C_{olor} \cdot Q_{aire}}{A}$$

Donde:

C_{olor} : es la concentración de olor medida (OUE/m³)

Q_{aire} : es el caudal de aire emitido por la fuente (m³/s)

A es la superficie de emisión (m² o N° animales según corresponda)

El cálculo de las tasas de emisiones de olor a partir de los factores de emisión se realiza de acuerdo a la ecuación general:

$$TEO = A \cdot FE$$

Donde:

TEO: Tasa de emisión de olor (OUe/s)

A: Unidad de actividad, ejemplo m²

FE: Factor de emisión (OUe/sm²)

Tabla 3. Fuentes de emisión por sector

Fuente de emisión	FE	Cerdos	TEO
Sector maternidad	5,3	7.895	41.844
Sector recría	1,9	22.000	41.800
Sector engorde	2,1	32.000	67.200

Tabla 4. Fuentes de emisión por estanque

Fuente de emisión	FE	Superficie	TEO
Estanque acumulador 1	83,4	100	8.340
Estanque acumulador 2	83,4	100	8.340
Pozo homogeneizador	83,4	27	2.252
Laguna Anaerobia	0,2	6.250	1.250
Humedal	0,2	13.500	2.700
Laguna Acumulación 1	4,0	16.500	66.000
Laguna acumulación 2	4,0	16.000	64.000

Para identificar la ubicación precisa de las fuentes de emisión se utilizaron herramientas de Google Earth(como se puede ver en la Figura 8), trazando las superficies de las fuentes emisoras en el mapa, se configuraron las fuentes de emisión considerando una altura de 3 metros sobre el nivel del suelo para los pabellones, mientras que los estanques de acumulación y el pozo homogeneizador se fijó en 2 metros, las lagunas y el humedal se configuró como fuentes a nivel del suelo. El contaminante fue definido como Olor y las unidades de medición se expresaron en ouE/m³.



Figura 8. Ubicación de las fuentes de emisión en el plantel objetivo

4.6. Escenarios de modelación

Con el objetivo de comparar los dos softwares de simulación, AERMOD y ARD3D, se establecieron distintos escenarios de modelación. Estos escenarios utilizarán los datos meteorológicos obtenidos mediante el modelo *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), el modelo permitirá predecir los parámetros climáticos de la zona.

4.6.1. Modelación anual completa, caso base

El primer escenario corresponde a la modelación anual del año 2021, considerando un periodo continuo de 365 días. Este enfoque permitió analizar cómo las variaciones meteorológicas y estacionales a lo largo del año afectan la dispersión de olores en el área de estudio. La simulación se ejecutó para todas las fuentes emisoras descritas previamente, manteniendo las tasas de emisión base definidas.

4.6.2. Aumento del área de simulación

En este escenario, también correspondiente al año 2021, se amplió el dominio espacial de cálculo con el objetivo de evaluar el efecto de la extensión geográfica en la estimación de concentraciones. Se incrementó la grilla de modelación a 25 puntos con separación de 1 000 metros, cubriendo una superficie total de 25 km². Esto permitió analizar si la ampliación del dominio mejora la captura de las zonas receptoras más alejadas y si existen diferencias en la forma y extensión de la pluma odorante entre ambos modelos.

4.6.3. Aumento de emisiones

En este tercer escenario se evaluó el efecto del incremento de las emisiones en el mismo periodo meteorológico del año 2021. Para ello, se duplicaron las tasas de emisión de todas las fuentes modeladas, simulando una condición operativa más exigente para el plantel. Este caso permitió analizar la respuesta de ambos modelos ante un aumento significativo de la carga odorante, observando la sensibilidad de cada modelo en la representación espacial y magnitud de las concentraciones.

5. Resultados

5.1. Modelación Anual completa

En la modelación base realizada con AERMOD, se estimaron las concentraciones de olor para distintos horizontes temporales: promedio horario (1 hora), promedio móvil de 8 horas y promedio anual. En el anexo se pueden observar los datos de entrada y en mayor detalle los resultados para las distintas modelaciones realizadas en AERMOD

Para el conjunto de las fuentes, se obtuvo una concentración horaria máxima de 1043,59 ouE/m³, un promedio móvil máximo de 8 horas de 434,31 ouE/m³, y una concentración media anual de 75,52 ouE/m³.

La Figura 9 muestra la distribución espacial de las concentraciones horarias máximas, evidenciando un gradiente de dispersión con las mayores concentraciones sobre el área del plantel, disminuyendo progresivamente con la distancia al emisor.

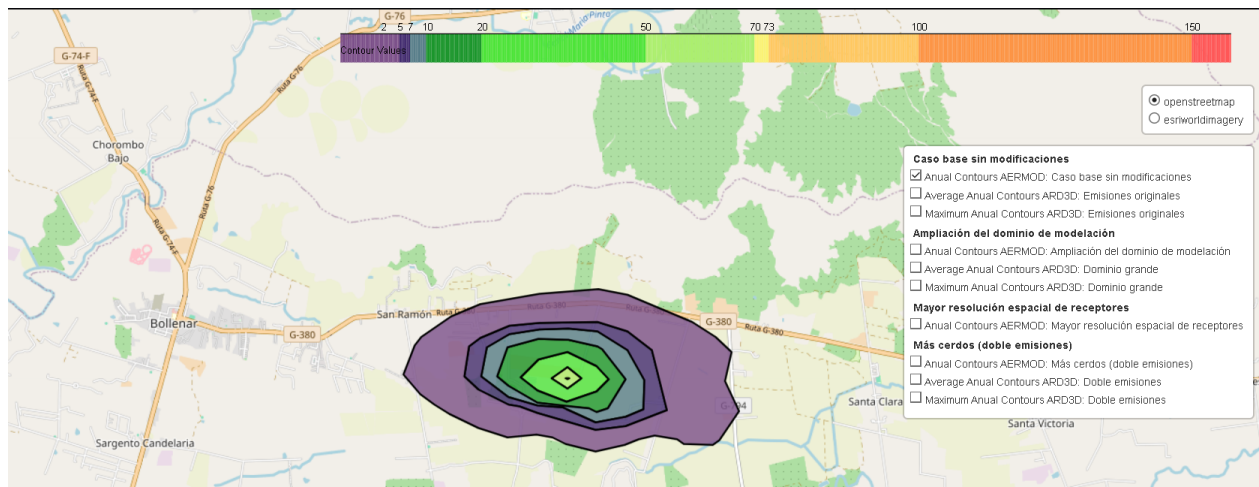


Figura 9. AERMOD - Caso base, promedio anual

El patrón de la pluma se orienta hacia el oriente, en coherencia con la dirección predominante del viento, conformando una distribución alargada y de contornos concéntricos que representa adecuadamente el comportamiento gaussiano del modelo.

En este sentido, AERMOD representa el campo de concentración de forma más general y extendida, donde las fuentes cercanas se integran en una misma masa de dispersión, generando una pluma continua y uniforme en dirección predominante del viento.

En el caso del modelo ARD3D, se tiene que la resolución espacial no depende de una grilla uniforme de receptores como en AERMOD, sino de una malla no uniforme de elementos finitos, que concentra nodos en las zonas de mayor gradiente y disminuye su densidad en áreas más estables.

Los resultados de ARD3D (Figura 10 y 11) muestran una distribución espacial coherente con la obtenida en AERMOD, manteniendo los máximos sobre el área del plantel y un descenso gradual hacia los bordes del dominio.

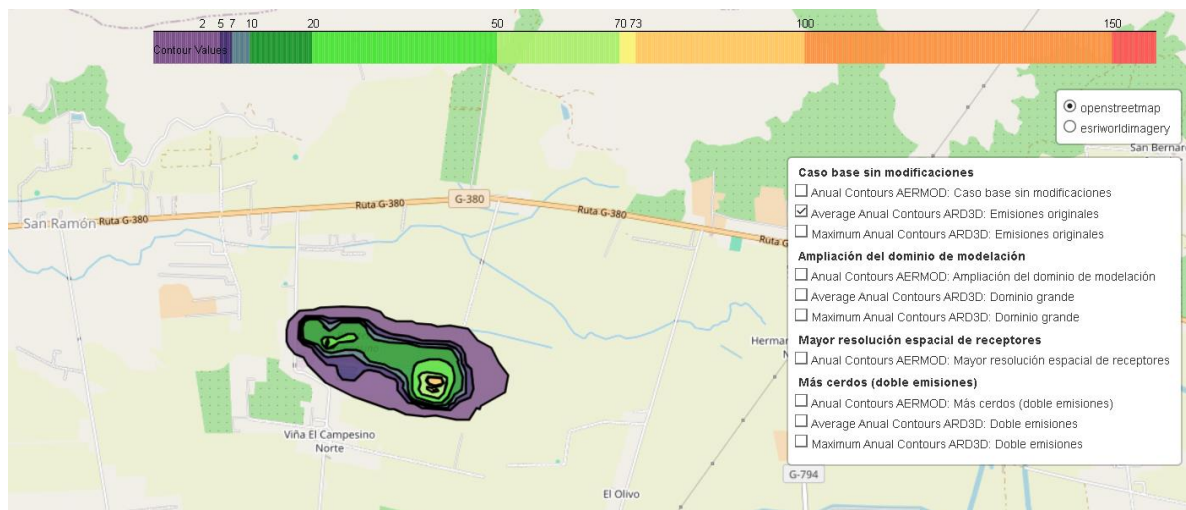


Figura 10. ARD3D - Caso base, promedio anual

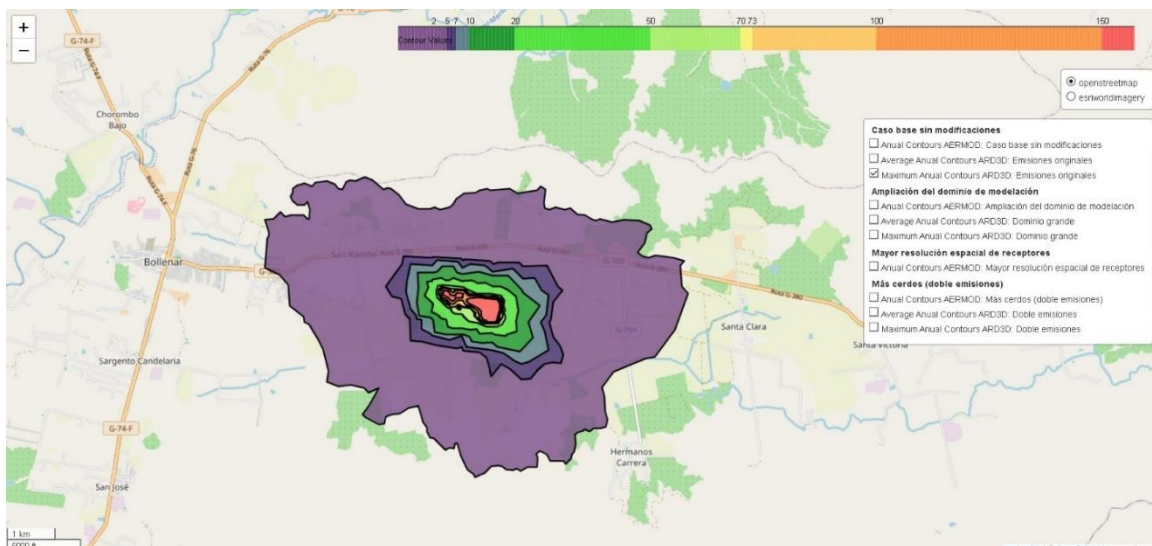


Figura 11. ARD3D - Caso base, valor máximo

Los valores obtenidos fueron 761,65 ouE/m³ (1h), 548,67 ouE/m³ (8h) y 80,22 ouE/m³ (anual), lo que indica que ARD3D entrega resultados del mismo orden de magnitud, aunque con valores máximos levemente inferiores.

A diferencia de AERMOD, la pluma de ARD3D presenta un alcance más acotado, pero una mayor definición local, permitiendo distinguir con claridad la contribución individual de cada fuente emisora, especialmente en las zonas donde se encuentran más próximas, esto se observa en la figura 12.

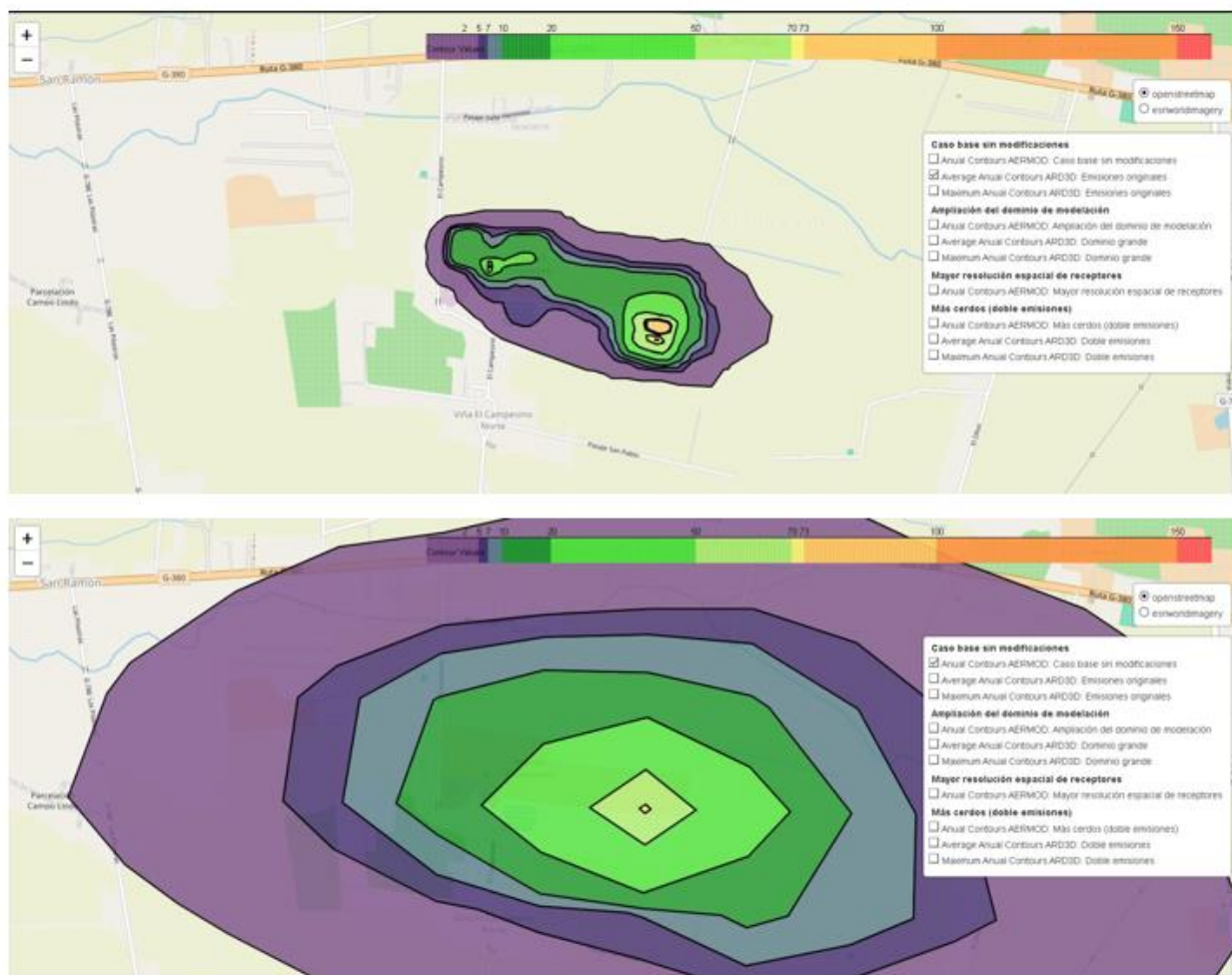


Figura 12. Imagen superior ARD3D promedio anual caso base, imagen inferior promedio anual AERMOD caso base

En este modelo, cada foco mantiene su influencia particular antes de mezclarse con las emisiones vecinas, lo que posibilita identificar qué sectores del plantel aportan con mayor intensidad a la concentración total.

En cambio, en AERMOD, las fuentes tienden a fusionarse en un mismo núcleo de concentración, generando una representación más homogénea y global de la pluma.

En términos comparativos, AERMOD alcanza una mayor extensión horizontal de la pluma, lo que lo hace más adecuado para evaluar la dispersión a escala regional y las zonas de impacto distal. Sin embargo, debido a su enfoque gaussiano estacionario, las emisiones provenientes de las distintas fuentes del plantel tienden a fusionarse en una única pluma continua, dificultando distinguir la contribución individual de cada sector (maternidad, recría, engorde o tratamiento de purines).

Por el contrario, ARD3D ofrece una representación más localizada y físicamente detallada, ya que su formulación tridimensional y su malla adaptable permiten identificar con mayor claridad cómo cada fuente de emisión aporta al campo total de concentraciones. De este modo, el modelo evidencia diferencias entre los sectores productivos y las áreas de tratamiento, mostrando cómo cada uno contribuye al desarrollo y forma de la pluma odorante sobre el área del plantel y sus alrededores.

En conjunto, esta diferencia metodológica explica que AERMOD sea más adecuado para representar el comportamiento general de la pluma a gran escala, mientras que ARD3D permite analizar con mayor precisión los efectos específicos de las distintas fuentes de emisión y su influencia en la formación de la pluma total de olor.

5.2. Aumento del Área de simulación

En este segundo escenario se amplió el dominio espacial de la modelación, tanto en AERMOD como en ARD3D. El objetivo principal fue evaluar cómo la extensión de la grilla de cálculo influye en la estimación de las concentraciones máximas y en la representación espacial de la pluma de olor, especialmente en zonas receptoras más alejadas.

En el caso de AERMOD, al aumentar el dominio se observa que la pluma mantiene una forma central similar al escenario base, pero con una mayor proyección lateral y longitudinal. La concentración horaria máxima alcanzó 793,7 ouE/m³, mientras que el valor máximo para el promedio móvil de 8 horas fue de 288,2 ouE/m³. En cuanto al promedio anual, la concentración estimada fue de 30,8 ouE/m³. Si bien el valor máximo horario disminuyó en comparación con el escenario base (1043,59 ouE/m³), la superficie cubierta por la pluma aumentó, permitiendo captar de mejor forma la atenuación progresiva de la concentración a medida que se aleja de la fuente.

En la Figura 13. se presenta la distribución espacial de concentraciones promedio anuales obtenida con AERMOD para el escenario de ampliación de dominio, donde se aprecia la expansión de la pluma hacia zonas receptoras más alejadas.

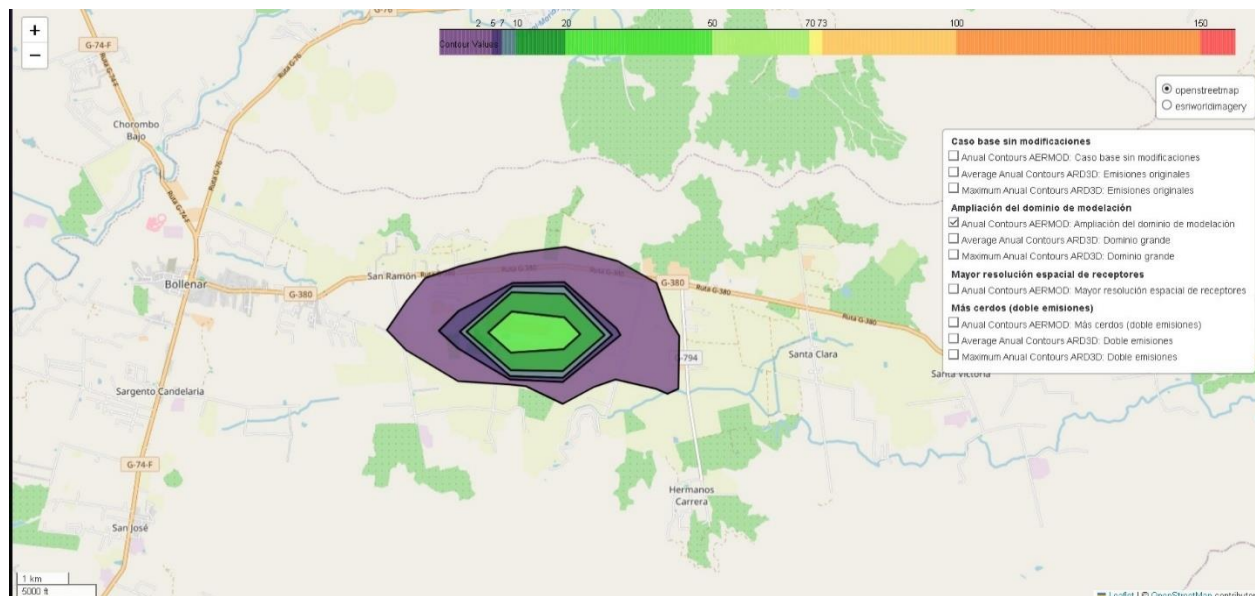


Figura 13. AERMOD – Aumento del área de simulación, promedio anual

En ARD3D el incremento del dominio revela una pluma más extensa e irregular, con mayor sensibilidad a las direcciones de viento y a la configuración local. Los valores obtenidos para la máxima horaria son de 671,79 ouE/m³, el máxima en 8 horas es de 571,29 ouE/m³ y máxima de todo el período se obtuvo un resultado de 95,452 ouE/m³. En comparación con el caso inicial de ARD3D, emergen zonas de concentración adicionales y una cobertura espacial mayor, lo que evita subestimar impactos a distancia.

En las Figuras 14 y 15 se presentan las isolíneas correspondientes al promedio anual y a la concentración máxima obtenidas con ARD3D para el escenario de dominio ampliado. La comparación entre ambas permite observar cómo el modelo captura no solo mayores concentraciones, sino también una extensión espacial considerablemente superior a la del escenario base.

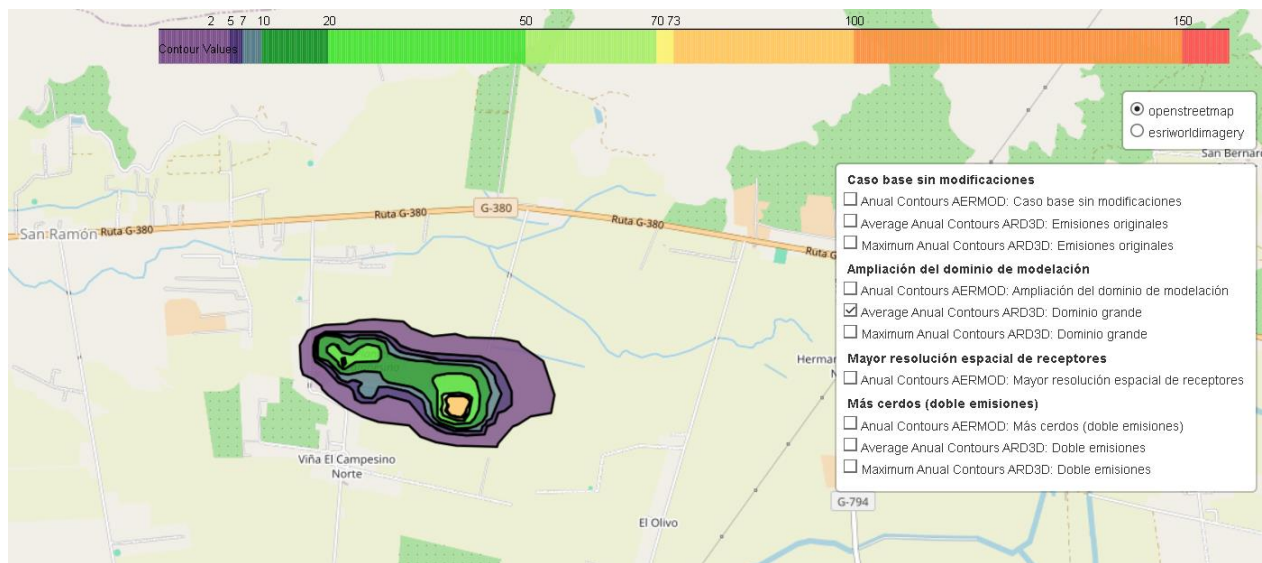


Figura 14. ARD3D - Aumento del área de simulación, promedio anual

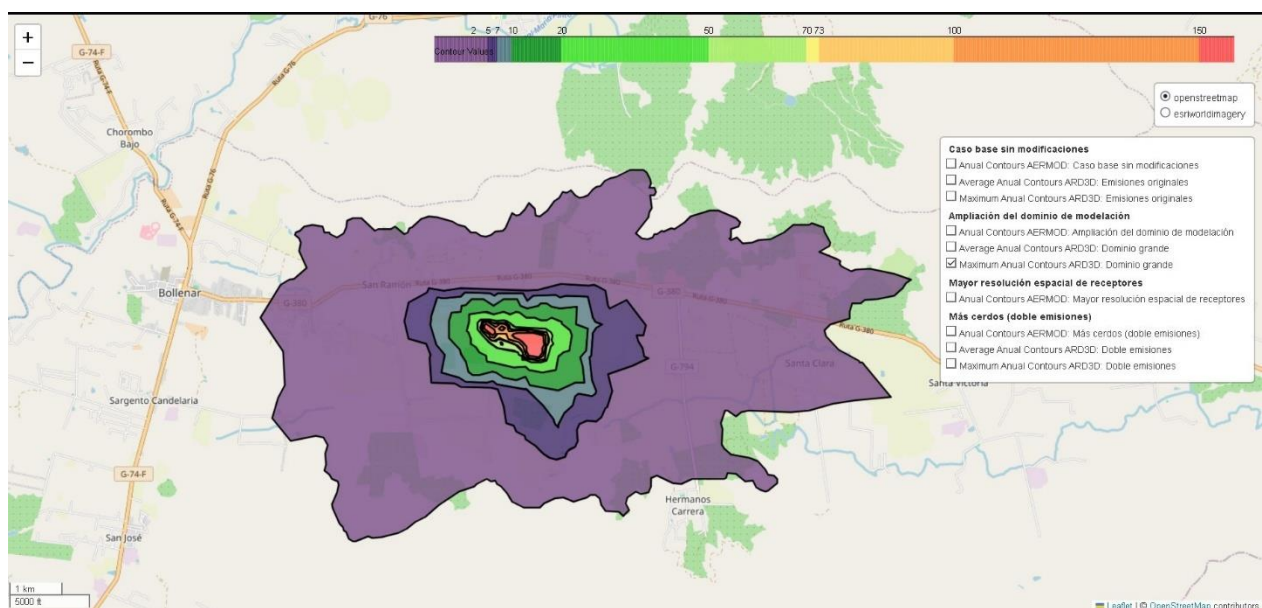


Figura 15. ARD3D - Aumento del área de simulación, valor máximo

5.3. Aumento de emisión

Este escenario evalúa el impacto de duplicar la cantidad de emisiones, representando una condición operativa más exigente para la instalación. El objetivo es observar cómo este cambio modifica tanto la magnitud de las concentraciones como la extensión espacial de la pluma en AERMOD y ARD3D.

En el escenario que contempla el aumento de las emisiones de las fuentes, las concentraciones estimadas con AERMOD reflejan un incremento considerable respecto de los casos anteriores. Para el conjunto de todas las fuentes la concentración máxima horaria alcanzo 2087,2 ouE/m³, mientras que el valor máximo para el promedio móvil de 8 horas fue de 868,6 ouE/m³ en cuanto al promedio anual, la concentración estimada fue de 1145,0 ouE/m³.

La figura 16 permite observar que el aumento de las emisiones genera una intensificación clara de las concentraciones en las inmediaciones del plantel, manteniendo el patrón característico de dispersión decreciente con la distancia al emisor. Sin embargo, en este caso los valores máximos se aproximan a triplicar los obtenidos en el escenario inicial, lo que evidencia la alta sensibilidad del modelo frente a cambios en la magnitud de las emisiones.

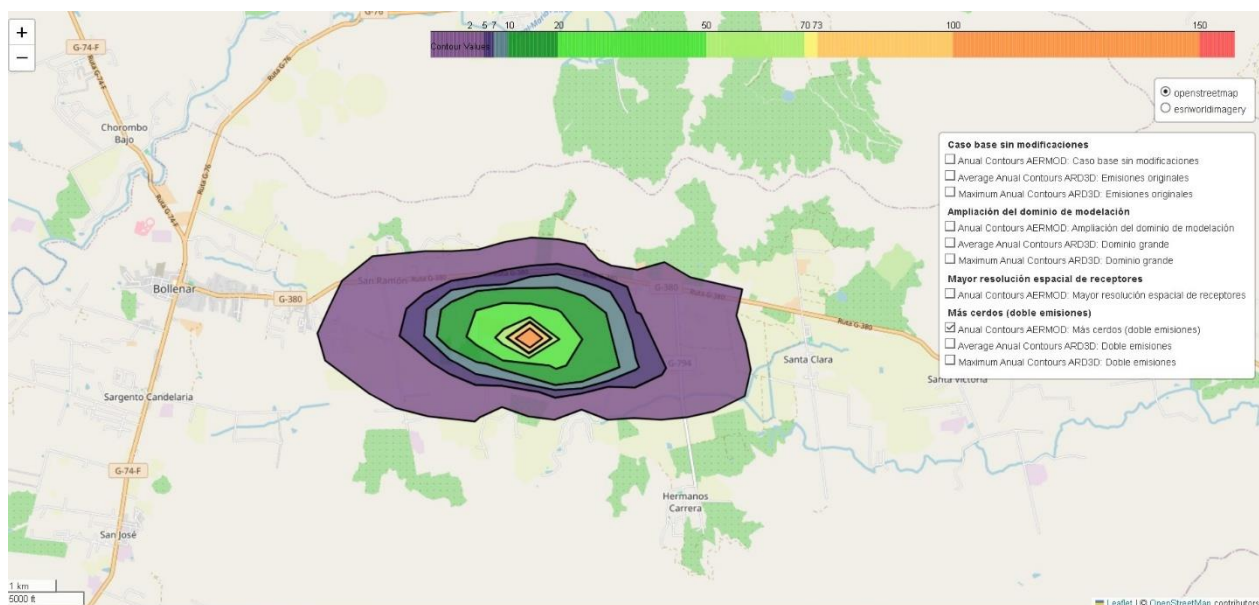


Figura 16. AERMOD – Aumento de emisiones, promedio anual

En el caso de ARD3D, el incremento de emisiones genera un cambio aún más marcado en la dispersión. Las concentraciones máximas obtenidas fueron de 1.523,31 ouE/m³ para el promedio horario, 1.097,34 ouE/m³ para el promedio móvil de 8 horas y 160,43 ouE/m³ como máximo para todo el período. Además del aumento en magnitud, se observa una expansión importante de la pluma y una orientación más definida en la dirección predominante del viento, determinado por la interacción entre la topografía y las condiciones meteorológicas preponderantes. En comparación con los escenarios anteriores, la extensión de las isolíneas se amplía de forma sustantiva, evidenciando zonas de impacto más alejadas y complejas.

En las figuras 17 y 18 se pueden observar los resultados de ARD3D para el caso del aumento de la cantidad de cerdos

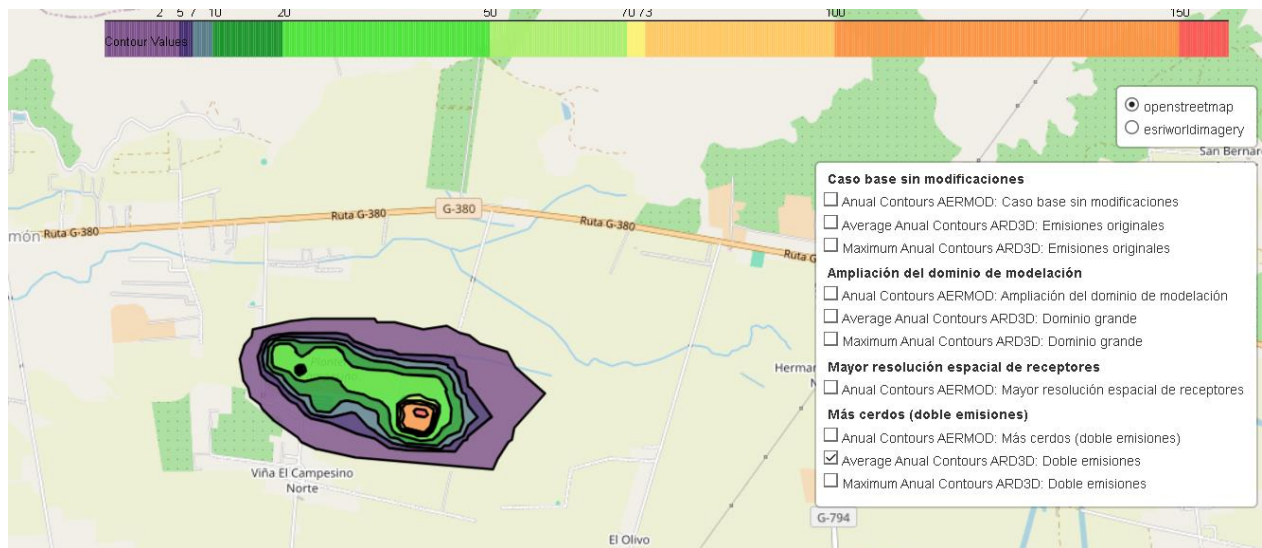


Figura 17. ARD3D - Aumento de emisiones, promedio anual

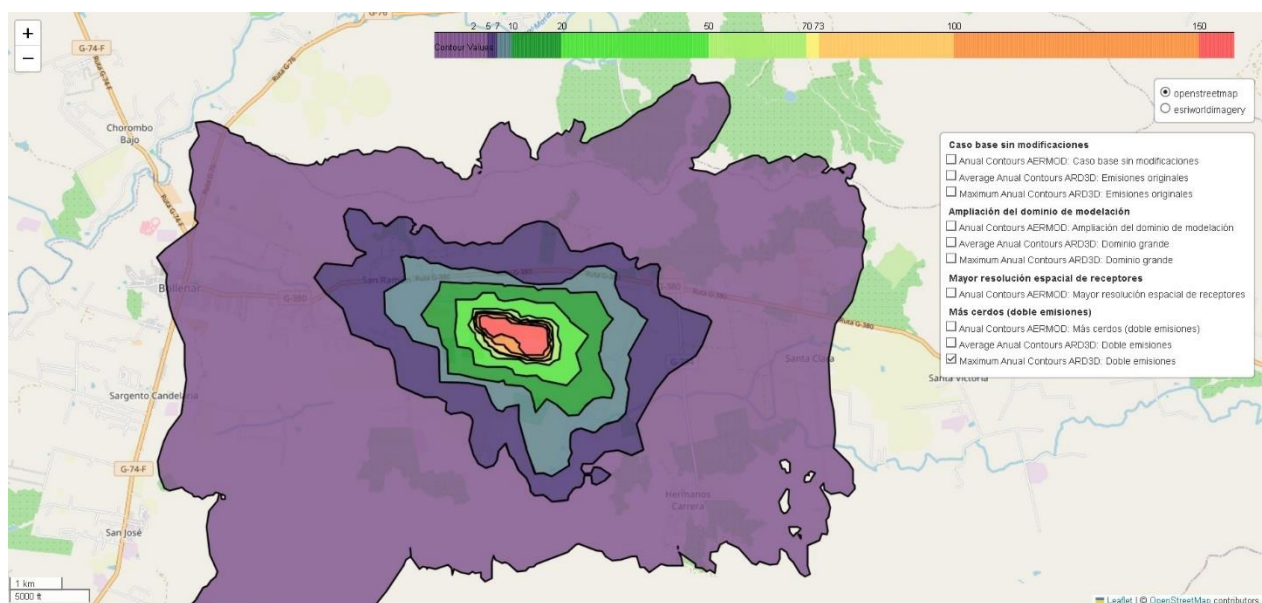


Figura 18. ARD3D - Aumento de emisiones, valor máximo

5.4. Análisis y visualización comparativa de resultados

A partir de los resultados obtenidos, se elaboraron gráficos comparativos que permiten observar con mayor claridad las diferencias espaciales entre ambos modelos (figuras 19, 20 y 21). Las isolíneas de concentración muestran cómo varía la intensidad de las fuentes emisoras en función del dominio y de las condiciones de emisión. En general, AERMOD genera una pluma más amplia y extendida, con una dispersión continua que abarca mayores distancias, mientras que ARD3D reproduce gradientes más suaves y un campo de concentraciones mejor definido en el entorno

inmediato del plantel. Estas representaciones bidimensionales facilitan la identificación de zonas críticas, la evaluación del alcance de los máximos y la comprensión de cómo el relieve y la disposición de las fuentes condicionan la dispersión atmosférica.

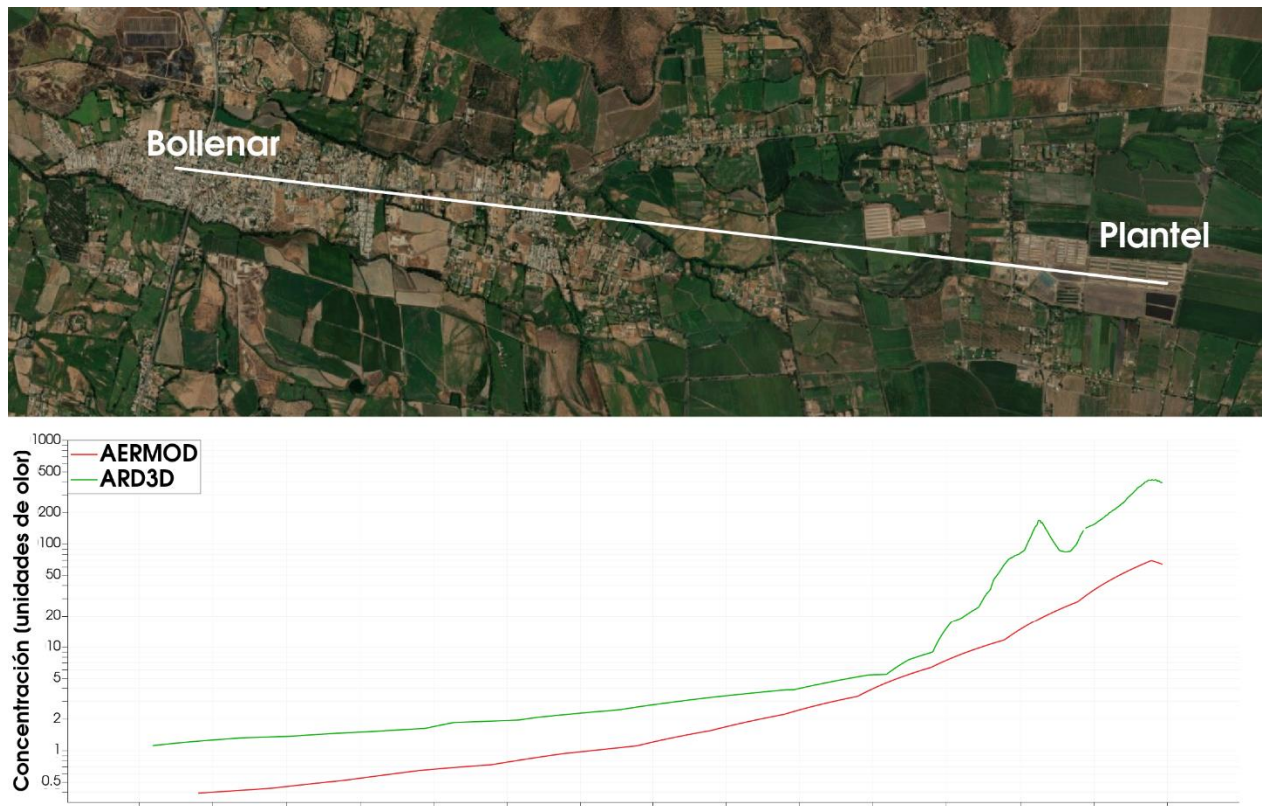


Figura 19. Comparaciones de isolíneas (AERMOD vs ARD3D), caso base

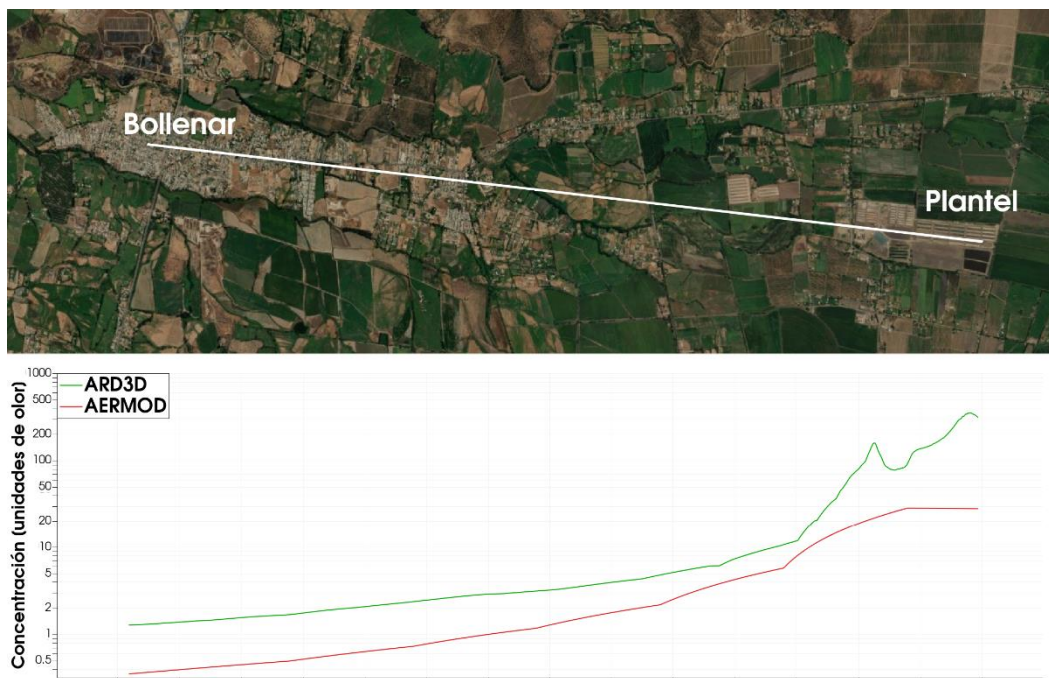


Figura 20. Comparaciones de isolíneas (AERMOD vs ARD3D), ampliación de dominio

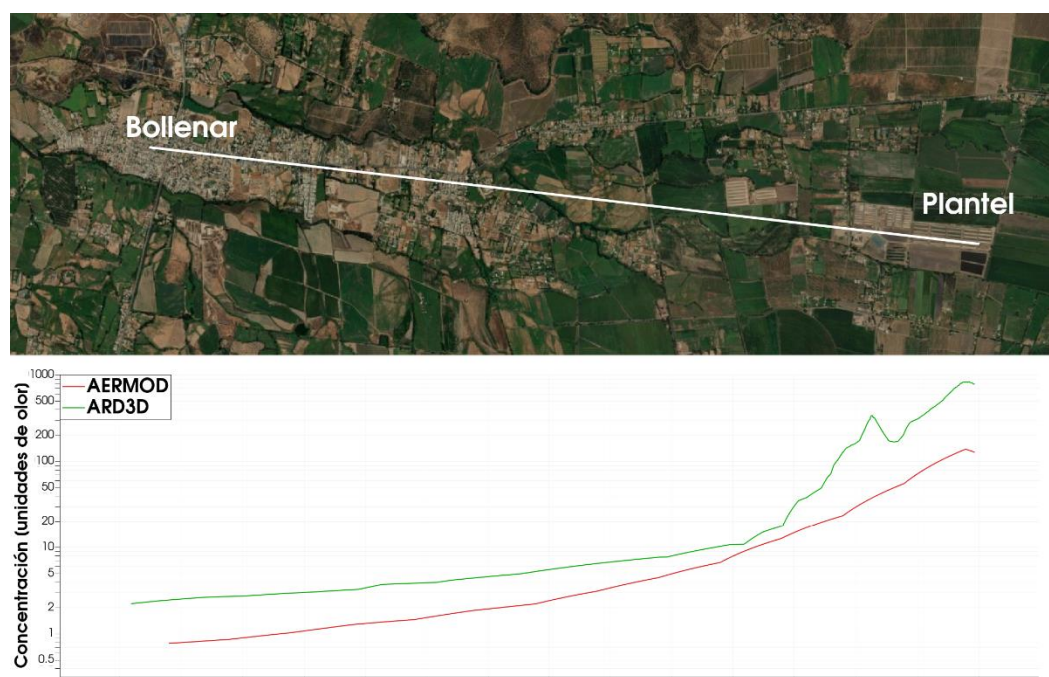


Figura 21. Comparaciones de isolíneas (AERMOD vs ARD3D), aumento de emisión

Para complementar el análisis bidimensional, se desarrollaron representaciones tridimensionales del campo de concentraciones que permiten visualizar la estructura volumétrica de la pluma odorante y su interacción con el relieve del valle de Mollarauco (figuras 22 a 26). Estas visualizaciones aportan una perspectiva más completa de la dispersión, mostrando el

comportamiento horizontal de las concentraciones (extensión y dirección de la pluma en el plano X, Y), y la influencia de las condiciones topográficas sobre la dinámica del flujo.

En el caso de ARD3D, los resultados tridimensionales evidencian una capacidad superior para representar la complejidad espacial del fenómeno. El modelo permite observar cómo las emisiones se elevan y adaptan a las irregularidades del terreno, mostrando gradientes verticales bien definidos y zonas de acumulación en áreas deprimidas o de menor ventilación. En los tres escenarios considerados —caso base, ampliación del dominio y duplicación de emisiones— se aprecia que ARD3D mantiene coherencia espacial y continuidad física, reproduciendo un comportamiento más realista del penacho, tanto en dirección como en extensión.

Por su parte, AERMOD presenta una representación tridimensional más limitada y menos continua, producto de su formulación gaussiana bidimensional, que asume condiciones atmosféricas homogéneas y carece de una modelación volumétrica explícita. Si bien se generó una visualización 3D correspondiente al caso base, ésta se incluyó únicamente con fines ilustrativos, ya que su resolución y continuidad espacial no permiten una interpretación detallada del fenómeno, como se puede observar en las figuras 22 y 23. En consecuencia, los resultados tridimensionales presentados en esta sección se enfocan principalmente en ARD3D, dado que su formulación numérica basada en ecuaciones de advección-difusión-reacción en tres dimensiones ofrece una descripción físicamente más consistente del transporte de contaminantes en entornos complejos.

Las figuras 24 a 26 permiten apreciar cómo ARD3D integra simultáneamente la componente horizontal y vertical de la dispersión, logrando representar la pluma de olor como un volumen dinámico que responde a las condiciones meteorológicas y al relieve local. Esta capacidad tridimensional constituye una ventaja significativa respecto a los modelos gaussianos tradicionales, ya que posibilita una interpretación más precisa del impacto potencial en zonas habitadas y una base técnica más sólida para la validación y aplicación del modelo en estudios regulatorios.

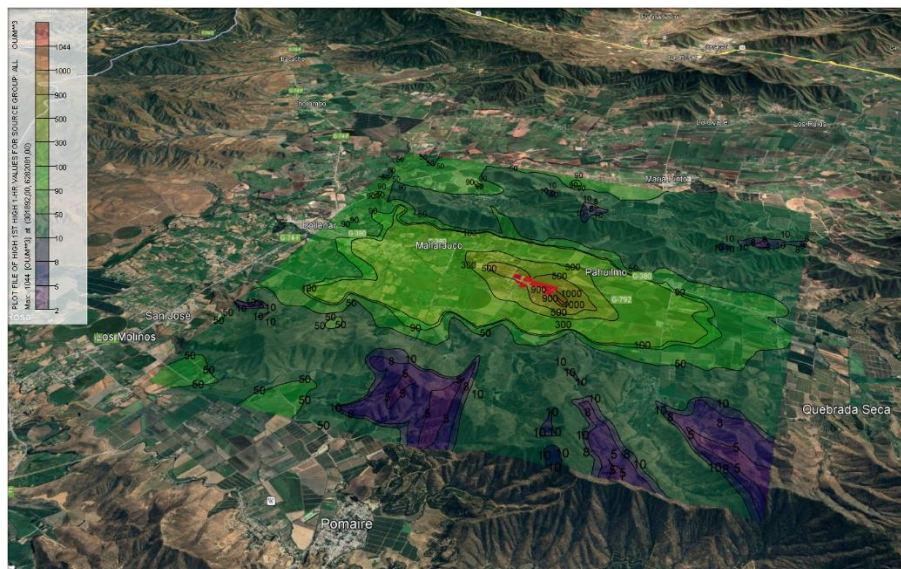


Figura 22.AERMOD, caso base (vista tridimensional, Google Earth)

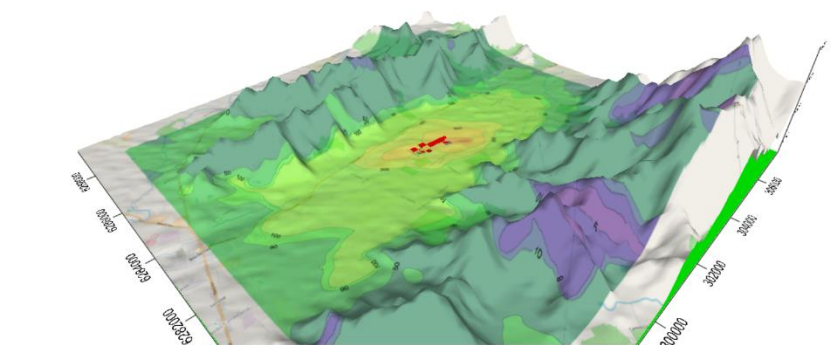


Figura 23.AERMOD, caso base (vista tridimensional, software)

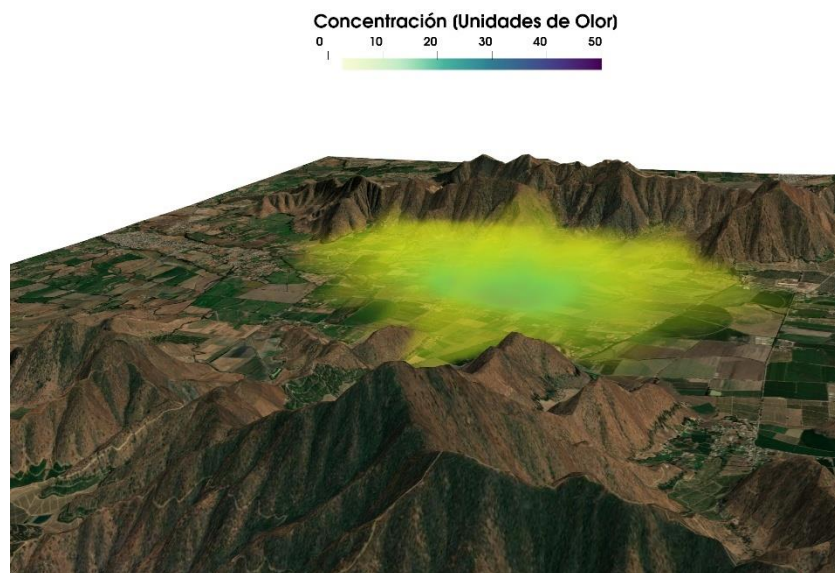


Figura 24. ARD3D, caso base (vista tridimensional)

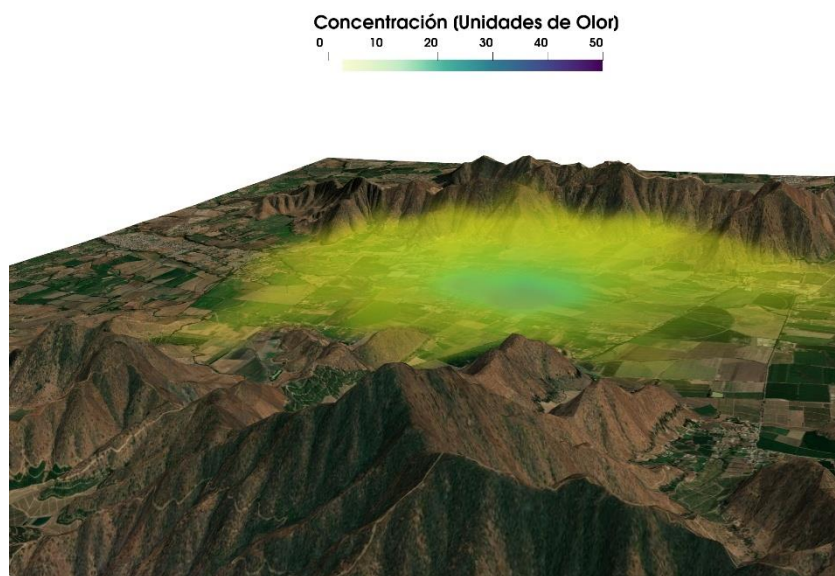


Figura 25. ARD3D, aumento del área de simulación (vista tridimensional)

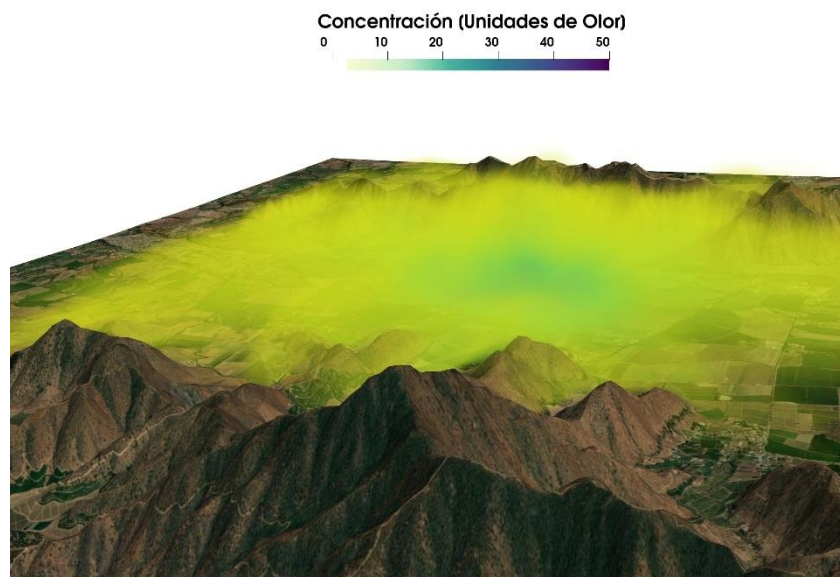


Figura 26. ARD3D, aumento de emisiones (vista tridimensional)

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos en los tres escenarios modelados, se elaboró una tabla comparativa que reúne las concentraciones máximas horarias, de promedio móvil de 8 horas y promedio anual para AERMOD y ARD3D (Tabla 5). Esta comparación permite observar de forma integrada cómo la ampliación del dominio y el aumento de las emisiones afectan tanto la magnitud de las concentraciones como su distribución espacial.

Tabla 5. Comparación de los resultados en cada caso

Escenario	Modelo	Máxima horaria ouE/m ³	Dif. de ARD3D respecto a Aermod %	Máxima 8 horas ouE/m ³	Dif. de ARD3D respecto a Aermod %	Promedio Anual ouE/m ³	Dif de ARD3D respecto a Aermod %
Caso inicial	AERMOD	1043,59	-27,02	434,41	-15,37	72,52	10,62
	ARD3D	761,65		548,67		80,22	
Aumento área de simulación	AERMOD	793,73	-15,37	288,16	98,25	30,8	209,94
	ARD3D	671,79		571,29		95,46	
Aumento de emisión	AERMOD	2087,17	-27,01	868,62	26,33	145,05	10,61
	ARD3D	1523,31		1097,34		160,43	

En el escenario base, ambos modelos presentan concentraciones del mismo orden de magnitud, aunque ARD3D entrega valores máximos horarios y promedios móviles de 8 horas ligeramente menores que AERMOD (-27 % y -15 %, respectivamente), lo que sugiere una dispersión más localizada y una menor acumulación instantánea. Sin embargo, el promedio anual de ARD3D es

un 10 % superior, lo que indica una mejor representación de las concentraciones sostenidas en el tiempo dentro del dominio.

En el escenario de aumento del área de simulación, AERMOD mantiene valores relativamente estables, mientras que ARD3D muestra un incremento notable en los promedios, especialmente en el anual, que resulta más del doble que el de AERMOD. Esto evidencia que ARD3D capta con mayor sensibilidad las variaciones topográficas y direccionales al ampliar el dominio, reflejando una dispersión más extendida y con mayores concentraciones residuales en zonas periféricas.

Finalmente, en el escenario de aumento de emisiones, ambos modelos responden de manera proporcional al incremento de la carga odorante. AERMOD presenta los valores absolutos más altos en los máximos horarios y de corto plazo, mientras que ARD3D alcanza concentraciones algo menores, pero más homogéneas, manteniendo una diferencia promedio cercana al 10 %. Este comportamiento confirma que ARD3D reproduce de manera consistente las tendencias del modelo de referencia, con una dispersión tridimensional que tiende a suavizar los picos, pero conservar la magnitud media global del olor en el dominio.

6. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como propósito evaluar y comparar la efectividad del modelo ARD3D, desarrollado por un grupo de investigación de la Universidad Técnica Federico Santa María, frente al modelo AERMOD, considerado como referencia por el *Servicio de Evaluación Ambiental* (SEA) de Chile para la modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos. A través de diversos escenarios aplicados sobre un plantel porcino ubicado en Mallarauco, se buscó analizar la capacidad de ambos modelos para representar la dispersión de olores, estimar concentraciones y reproducir el comportamiento de la pluma odorante en condiciones reales de operación.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que ambos modelos reproducen patrones coherentes con la meteorología local, especialmente en relación con la dirección predominante del viento y la ubicación de las fuentes emisoras. Sin embargo, las diferencias en la representación espacial de la pluma resultaron significativas: AERMOD proyectó un campo de concentración más homogéneo y extendido, adecuado para estimaciones regionales, mientras que ARD3D presentó un comportamiento más detallado y sensible a las variaciones topográficas, mostrando gradientes más suaves y una mayor precisión en la identificación de focos de emisión. Este comportamiento tridimensional permitió reconocer zonas receptoras a mayor distancia (particularmente hacia el oriente y sureste del dominio) donde el modelo detectó impacto odorante en áreas coincidentes con sectores poblados que han registrado reclamos ante la autoridad ambiental.

Mientras AERMOD tiende a subestimar la influencia del relieve y las condiciones locales, ARD3D logra representar de forma más realista la dispersión hacia los pueblos aledaños, evidenciando su potencial para complementar la evaluación de impactos en entornos donde la interacción entre topografía y meteorología es determinante. Este hallazgo sugiere que el modelo puede constituirse en una herramienta relevante para comprender y anticipar episodios de molestia por olor en comunidades rurales próximas a fuentes emisoras.

Desde el punto de vista técnico, ARD3D entregó resultados del mismo orden de magnitud que AERMOD, lo que respalda su consistencia numérica. Las diferencias observadas responden principalmente al enfoque no estacionario de ARD3D, basado en la resolución de ecuaciones de advección–difusión–reacciones dependientes del tiempo, frente al esquema gaussiano estacionario de AERMOD. Esta formulación confiere a ARD3D una ventaja en escenarios con condiciones meteorológicas cambiantes, permitiéndole capturar la dinámica temporal del transporte y la acumulación de contaminantes.

En cuanto a las fortalezas y limitaciones, AERMOD sigue siendo un modelo consolidado y aceptado en el marco regulatorio chileno, valorado por su estabilidad y respaldo normativo. No obstante, su dependencia de condiciones estacionarias y grillas uniformes puede limitar su aplicabilidad en terrenos irregulares o en estudios de olores, donde las variaciones locales son

relevantes. En contraste, ARD3D demostró mayor flexibilidad numérica y capacidad para adaptarse a la topografía, aunque su validación requiere un esfuerzo adicional en términos de comparación con mediciones experimentales y en la optimización del tiempo de cálculo, aspectos necesarios para su eventual incorporación en procesos oficiales de evaluación ambiental.

Con base en lo anterior, se concluye que ARD3D constituye una alternativa técnicamente viable y prometedora como modelo nacional de dispersión atmosférica, especialmente en el ámbito de los olores. Su capacidad para representar el comportamiento tridimensional de la pluma, identificar zonas receptoras coincidentes con comunidades afectadas y mantener coherencia con los resultados de AERMOD, lo posiciona como una herramienta con alto potencial para el fortalecimiento de la gestión ambiental en Chile.

Se recomienda, como proyección de este trabajo, ampliar la validación de ARD3D con campañas de medición en terreno, incluir la modelación de otros tipos de contaminantes y evaluar su desempeño en regiones con distintas condiciones meteorológicas.

7. Referencias

- Alvarado, M., Carrera, F., Cascón, J., Hernández, E., Naranjo, C., Prieto, D., . . . Wyman, V. (2021). ADRpaperAplicacion.
- BCN. (Junio de 2022). *Biblioteca del congreso nacional*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286&idParte=10341048>
- BCN. (2023). *Decreto 9: Establece norma de emisión de contaminantes en planteles porcinos que, en función de sus olores, generan molestia y constituyen un riesgo a la calidad de vida de la población*. Obtenido de Diario Oficial de la República de Chile. : <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1188661>
- BCN. (2024). *Clima y Vegetación Región Metropolitana de Santiago* . Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/clima.htm>
- Bergamini, K., Irarrázabal, R., Monckeberg, J., & Pérez, C. (2017). *Principales problemas ambientales en Chile: desafíos y propuestas*.
- Chile Atiende. (agosto de 2022). *chileatiende.gob.cl*. Obtenido de <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/2638-estudio-de-impacto-ambiental-eia-y-declaracion-de-impacto-ambiental-dia>
- Consejo Nacional de la Agenda 2030. (Mayo de 2023). *Estrategia de Chile para la implementación de la agenda 2030*. Obtenido de https://www.chileagenda2030.gob.cl/storage/docs/Estrategia_de_Implementacion_Agenda2030.pdf
- De Visscher, A. (2014). *Air Dispersion Modeling: Foundations and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Diaz, C. (2022). *olores.org*. Obtenido de <https://www.olores.org/>
- environmetrika. (2019). Obtenido de <https://environmetrika.com.co>
- INIA. (DICIEMBRE de 2005). SAG. Obtenido de Recomendaciones Técnicas para la Gestión Ambiental en el Manejo de Purines de la Explotación Porcina: https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/MANEJO_PURINES_PORCINOS.pdf
- INIA. (2023). *Manual de producción porcina*. Obtenido de <https://biblioteca.inia.cl/server/api/core/bitstreams/b25258f8-e8c0-49f1-9787-566455b399fa/content>
- Jacobson, M. (2005). *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. New York: Cambridge University Press.
- MMA. (Agosto de 2013). *BCN*. Obtenido de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053036>
- MMA. (2024). *olores*. Obtenido de <https://olores.mma.gob.cl/que-es-olor/>

- ODEPA. (Abril de 2019). *Producción sustentable, sustentabilidad, porcinos, producción porcina, desarrollo sustentable*. Obtenido de La industria porcina en Chile: oportunidades y desafíos para su sustentabilidad: https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/04/articulo-industria_porcina.pdf
- SEA. (2012). *Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA*.
- SEA. (s.f.). *sea.gob.cl*. Obtenido de <https://www.sea.gob.cl/que-es-el-seia-0>
- Silva, A., & Arcos, D. (2011). Aplicación del programa AERMOD para modelar dispersión de PM10 emitido por equipos de calefacción a leña en la ciudad de Constitución. *Obras y Proyectos*. 4-10.
- Silva, A., & Godoy, G. (2016). Modelado de la dispersión de material particulado en la ciudad de Los Ángeles (Chile) a partir de las estufas a leña en el período de invierno usando AERMOD. 44-54.
- Sinca. (2024). *Servicio de información nacional de calidad del aire*. Obtenido de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/info/id/M>
- SINCA,MMA. (2024). *SINCA*. Obtenido de <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma>
- Sinia,MMA. (Enero de 2022). *SINIA*. Obtenido de <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/01/C13-olores-rema-2021.pdf>
- SMA. (2022). *Informe técnico de fiscalización ambiental, inspección ambiental*. RM.
- Torres Brito, J. I. (2022). “Modelación de dispersión de olores de la industria porcina en Chile y análisis de factores claves para la adaptación a la nueva Ley de olores. Valparaíso, Chile.
- UAB. (Septiembre de 2019). “*MANEJO Y PRODUCCIÓN DE PORCINO*”. Obtenido de Breve manual de aproximación a la empresa porcina para estudiantes de veterinaria: <http://llojtjadevic.org/redaccio/arxiu/imatgesbutlleti/manual%20porcino%20final.pdf>

8. Anexos

Datos de entrada en AERMOD y resultados

Modelación anual completa, caso inicial

1. Datos de entrada

En la tabla 6 se presentan fuentes consideradas en la modelación anual completa, incluyendo áreas poligonales y fuentes circulares.

Tabla 6. Datos de emisión caso inicial

Type	ID	Desc	Base_Elev	Height	Diam	Emission_Rate
			m	m	m	
AREA_POLY	PAREA1	Maternidad	168,09	3		5,3
AREA_POLY	PAREA2	Recría	172,63	3		1,9
AREA_POLY	PAREA3	Engorda	170,01	3		2,1
AREA_CIRC	CAREA1	Estanque 1	166,52	2	5,642	83,4
AREA_CIRC	CAREA2	Estanque 2	167	2	5,642	83,4
AREA_CIRC	CAREA3	Pozo	167,51	2	2,93	83,4
AREA_POLY	PAREA4	Laguna anaerobia	167,26	0		0,2
AREA_POLY	PAREA5	Wetland	168,98	0		0,2
AREA_POLY	PAREA6	Laguna 1	168,18	0		4
AREA_POLY	PAREA7	Laguna 2	169,36	0		4

La red de receptores se definió mediante una grilla cartesiana uniforme de 25x25 puntos con separación de 500m, cubriendo un área de 12 x 12 km centrada en el plantel (coordenadas UTM 300892mE, 6282581 m N) en total se analizaron 625 receptores.

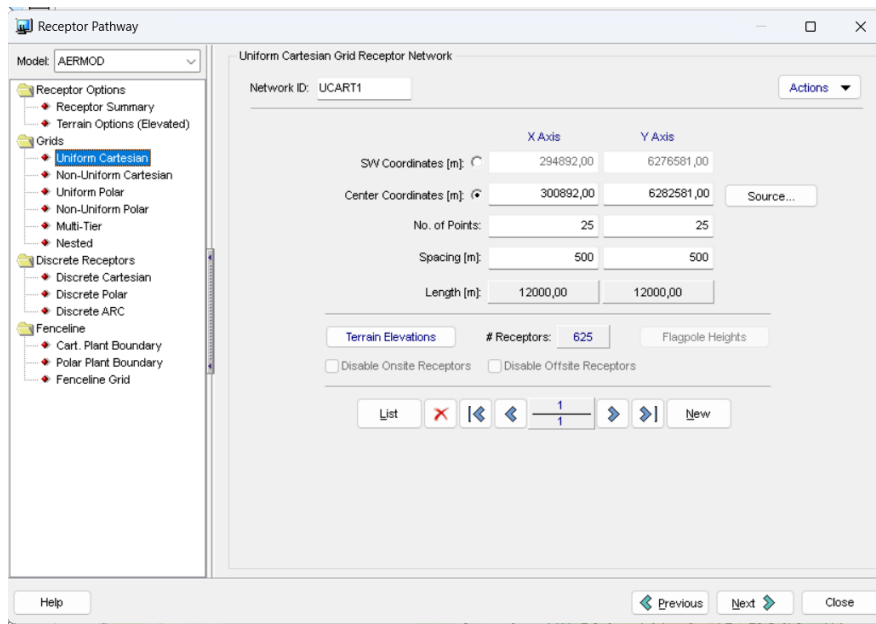


Figura 27. Datos del tamaño de grilla caso inicial

El modelo digital de elevación se integró mediante AERMAP, considerando las curvas de nivel extraídas de SRTM1, esto permite incorporar los efectos topográficos en la dispersión

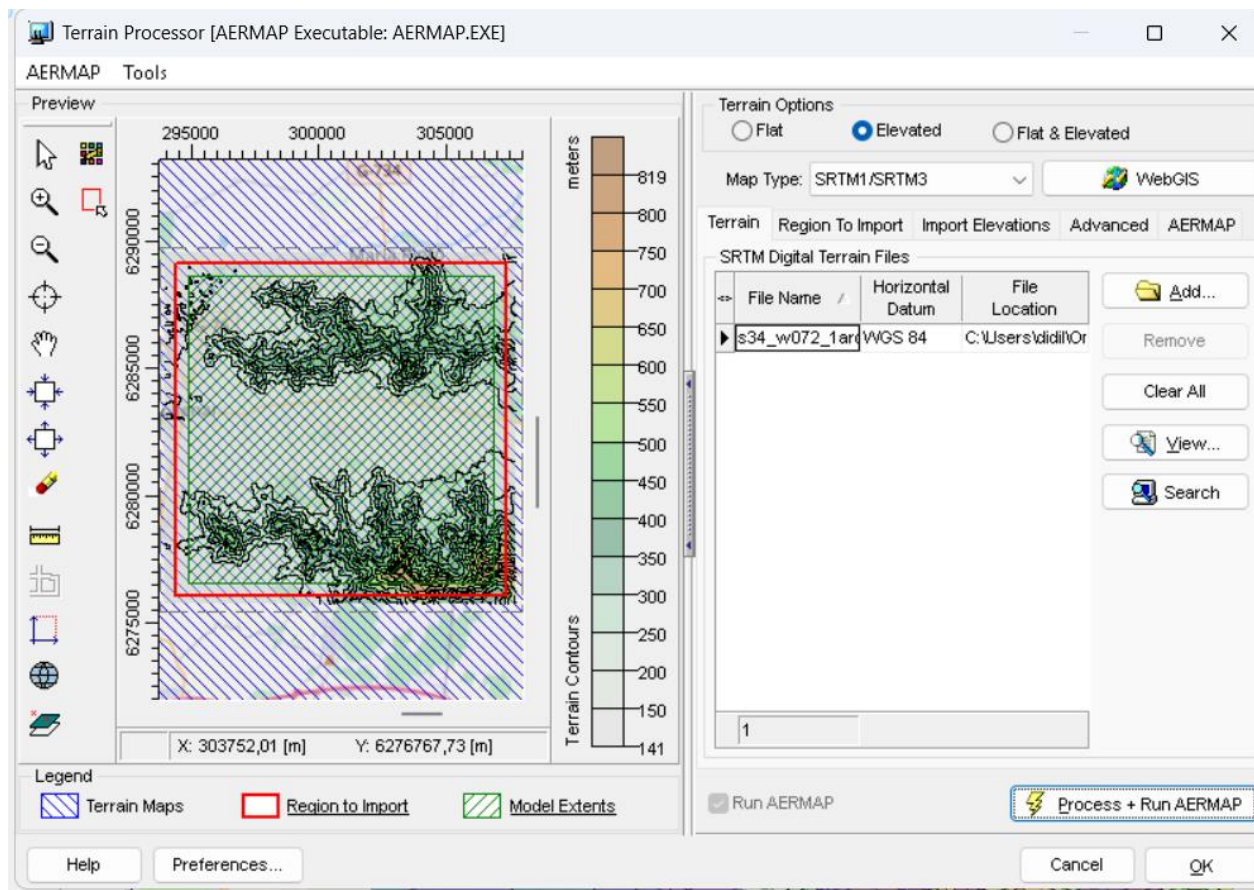


Figura 28. Datos de terreno

En las figuras anexas se muestran las distribuciones de concentraciones para cada horizonte temporal, observando en todos los casos una gradiente decreciente desde el centro del plantel hacia las zonas periféricas, con máximos localizados en el área de corrales y lagunas.

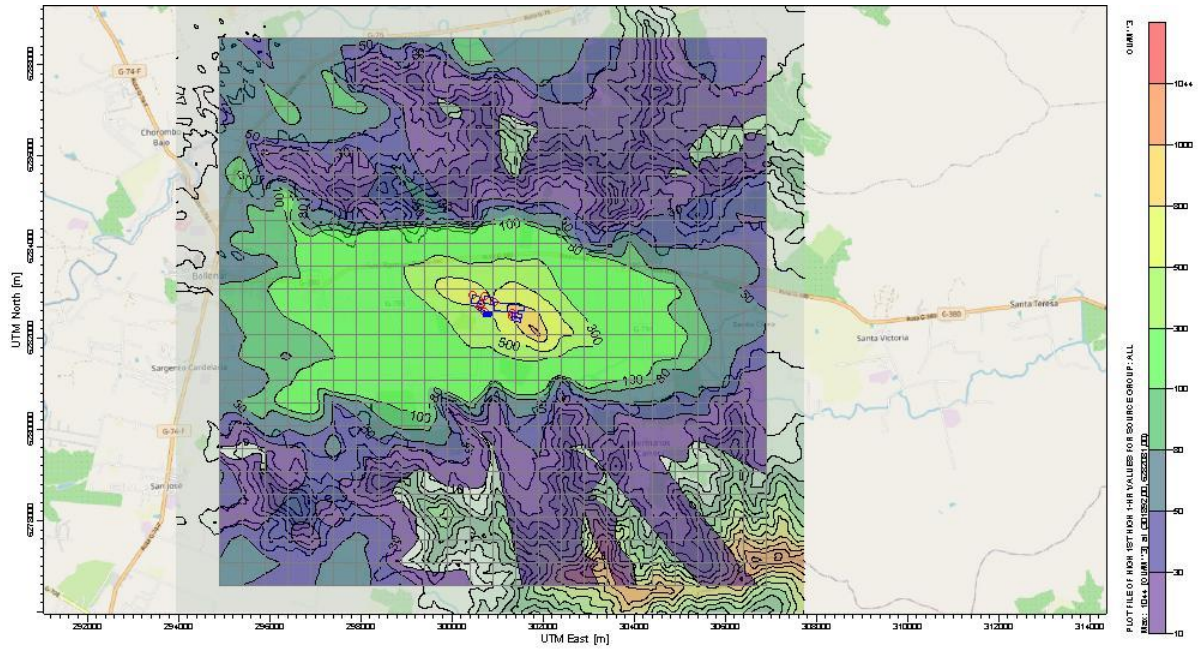


Figura 29. Concentraciones máximas a 1 hora, caso inicial

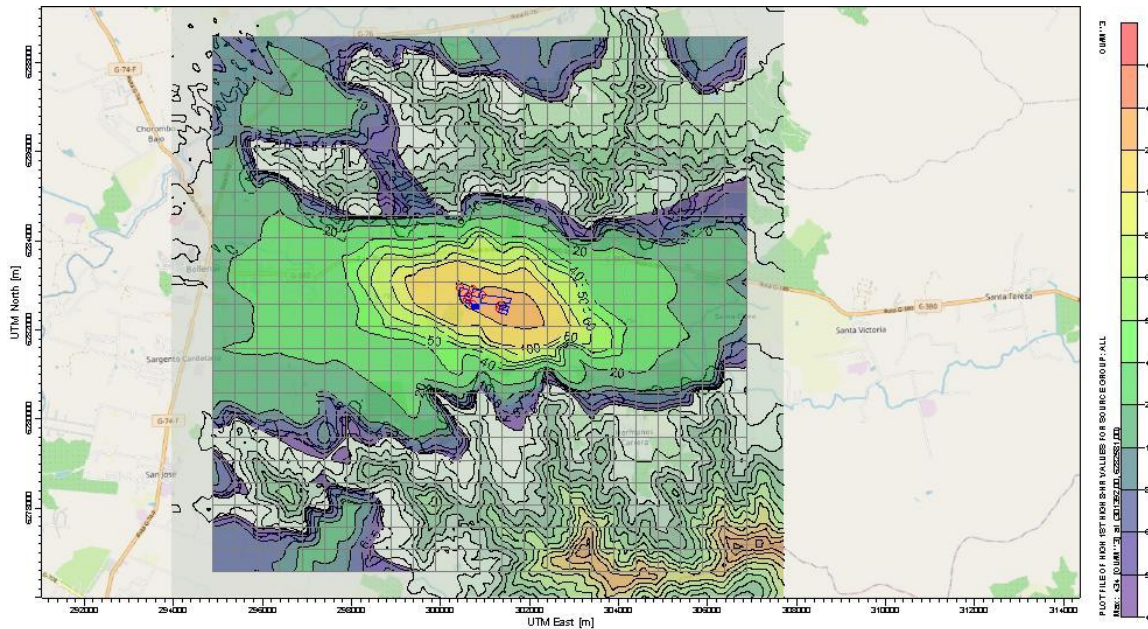


Figura 30. Concentraciones máximas 8 horas, caso inicial

Aumento del área de simulación

Para este escenario se amplió la grilla cartesiana con el objetivo de cubrir un dominio más extenso, se mantuvieron los 625 puntos (25x25) pero esta vez se realizó una separación de 1000

m entre receptores cubriendo una extensión total de 24 x 24 km, manteniendo el centro utilizado en el primer caso.

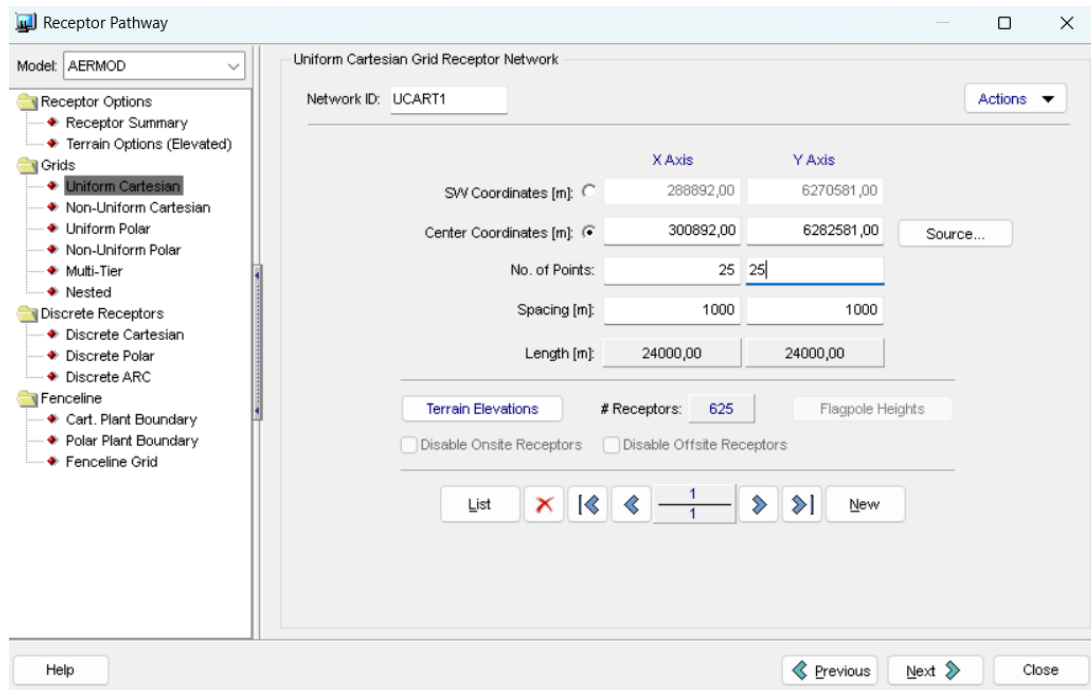


Figura 31. Tamaño de grilla para el caso: aumento del área de simulación

En este caso en comparación con el caso inicial, las concentraciones máximas disminuyen, lo que refleja que al ampliar la grilla la dispersión se distribuye en un dominio más grande.

En las figuras anexas se muestran la distribución de concentraciones para este escenario, en todas las figuras se aprecia que las concentraciones más altas siguen ubicándose en torno al plantel, aunque la extensión espacial de la pluma es mayor.

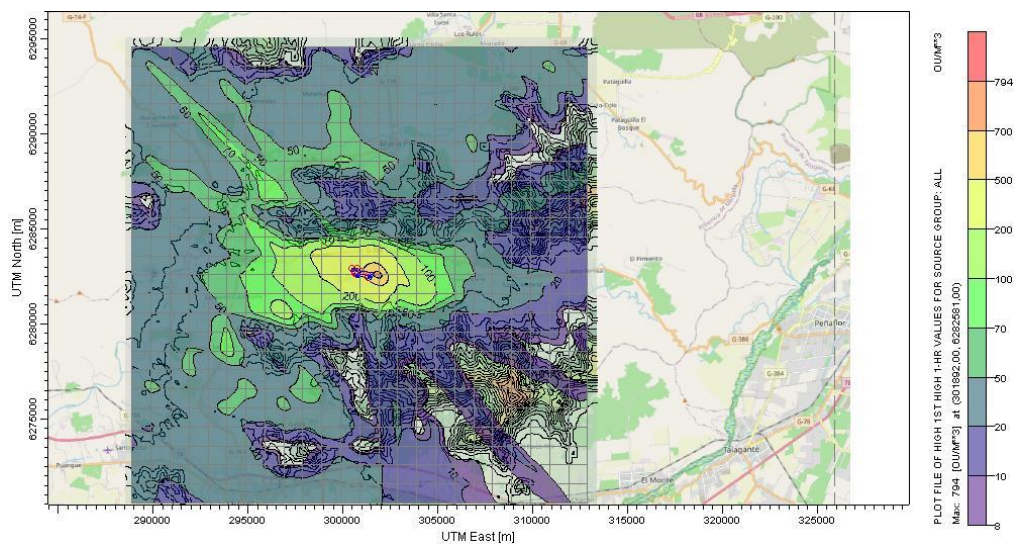


Figura 32. Concentraciones máximas a 1 hora, caso aumento de grilla

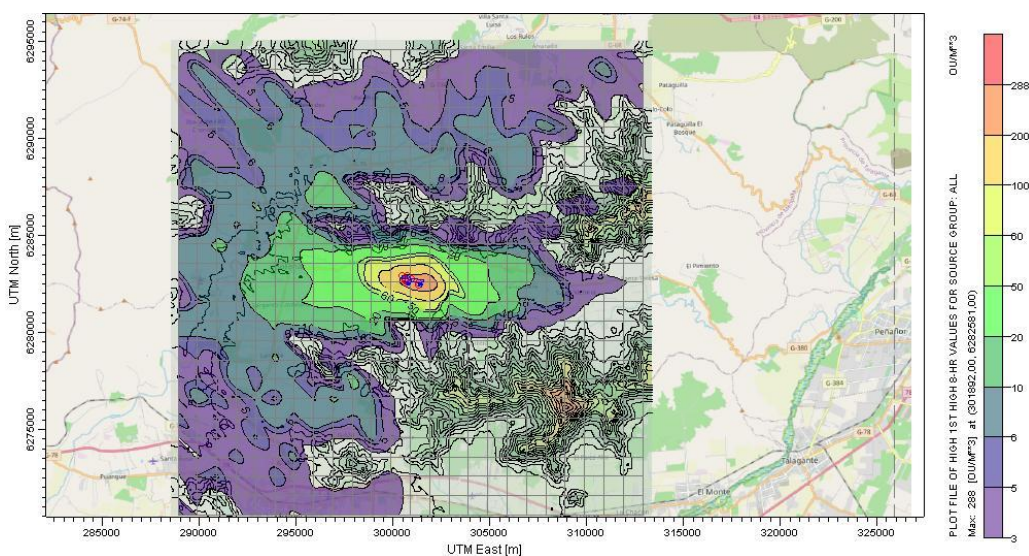


Figura 33. Concentraciones máximas a 8 horas, caso aumento de grilla

Aumento de la cantidad de cerdos

En este escenario se consideró un incremento del 100% en las tasas de emisión de todas las fuentes modeladas, con el fin de evaluar la sensibilidad del modelo frente a condiciones extremas de generación de olor, en las figuras 23 y en la tabla 6 se observan los cambios realizados en AERMOD para este caso

The screenshot shows the 'Receptor Pathway' software window. On the left is a tree view with categories: Receptor Options (Receptor Summary, Terrain Options (Elevated)), Grids (Uniform Cartesian, Non-Uniform Cartesian, Uniform Polar, Non-Uniform Polar, Multi-Tier, Nested), Discrete Receptors (Discrete Cartesian, Discrete Polar, Discrete ARC), and Fenceline (Cart. Plant Boundary, Polar Plant Boundary, Fenceline Grid). The 'Model' dropdown is set to 'AERMOD'. The main panel is titled 'Uniform Cartesian Grid Receptor Network' and contains the following fields:

- Network ID: UCART1
- SW Coordinates [m]: X Axis 294892,00, Y Axis 6276581,00
- Center Coordinates [m]: X Axis 300892,00, Y Axis 6282581,00 (with a 'Source...' button)
- No. of Points: 25 (with a dropdown arrow)
- Spacing [m]: 500
- Length [m]: 12000,00
- Terrain Elevations: # Receptors: 625, Flagpole Heights
- Disable Onsite Receptors: ☐ Disable Offsite Receptors: ☐
- Navigation buttons: List, X, Left Arrow, Right Arrow, 1/1, New

At the bottom of the window are buttons for 'Help', 'Previous', 'Next', and 'Close'.

Figura 34. Tamaño de grilla para el caso: aumento de emisiones

Tabla 7. Datos de emisión, aumento de las emisiones

Type	ID	Desc	Base_Elev	Height	Diam	Emission_Rate
			m	m	m	
AREA_POLY	PAREA1	Maternidad	168,09	3		10,6
AREA_POLY	PAREA2	Recría	172,63	3		3,8
AREA_POLY	PAREA3	Engorda	170,01	3		4,2
AREA_CIRC	CAREA1	Estanque 1	166,52	2	5,642	166,8
AREA_CIRC	CAREA2	Estanque 2	167	2	5,642	166,8
AREA_CIRC	CAREA3	Pozo	167,51	2	2,93	166,8
AREA_POLY	PAREA4	Laguna anaerobia	167,26	0		0,4
AREA_POLY	PAREA5	Wetland	168,98	0		0,4
AREA_POLY	PAREA6	Laguna 1	168,18	0		8
AREA_POLY	PAREA7	Laguna 2	169,36	0		8

Los resultados obtenidos muestran un aumento significativo en los valores de concentraciones respecto de los casos anteriores, las figuras 35 y 36 muestran la distribución espacial de las concentraciones máximas para los horizontes de tiempo de una hora y 8 horas, se observa que. Si bien la forma del patrón de dispersión de mantiene con máximos en las inmediaciones del

plantel y una disminución progresiva hacia la periferia, la magnitud de los valores prácticamente se duplica alcanzando niveles críticos en torno a las lagunas y áreas de engorda.

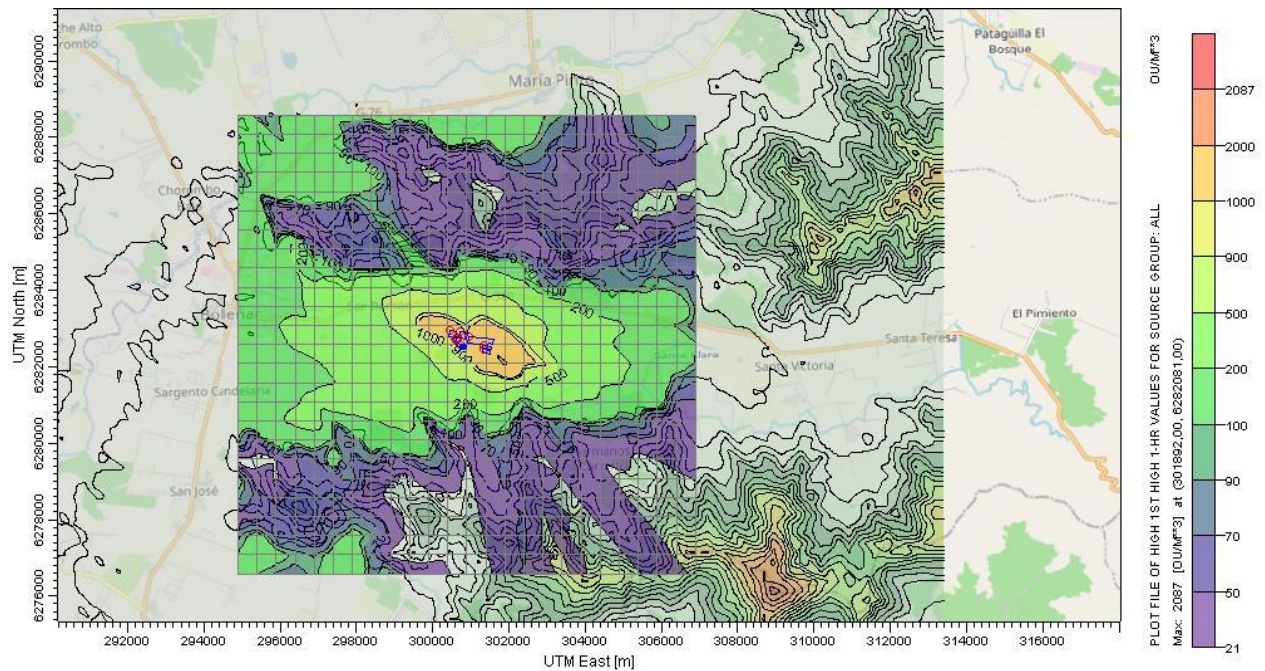


Figura 35. Concentraciones máximas a 1 horas, caso aumento de aumento de las emisiones

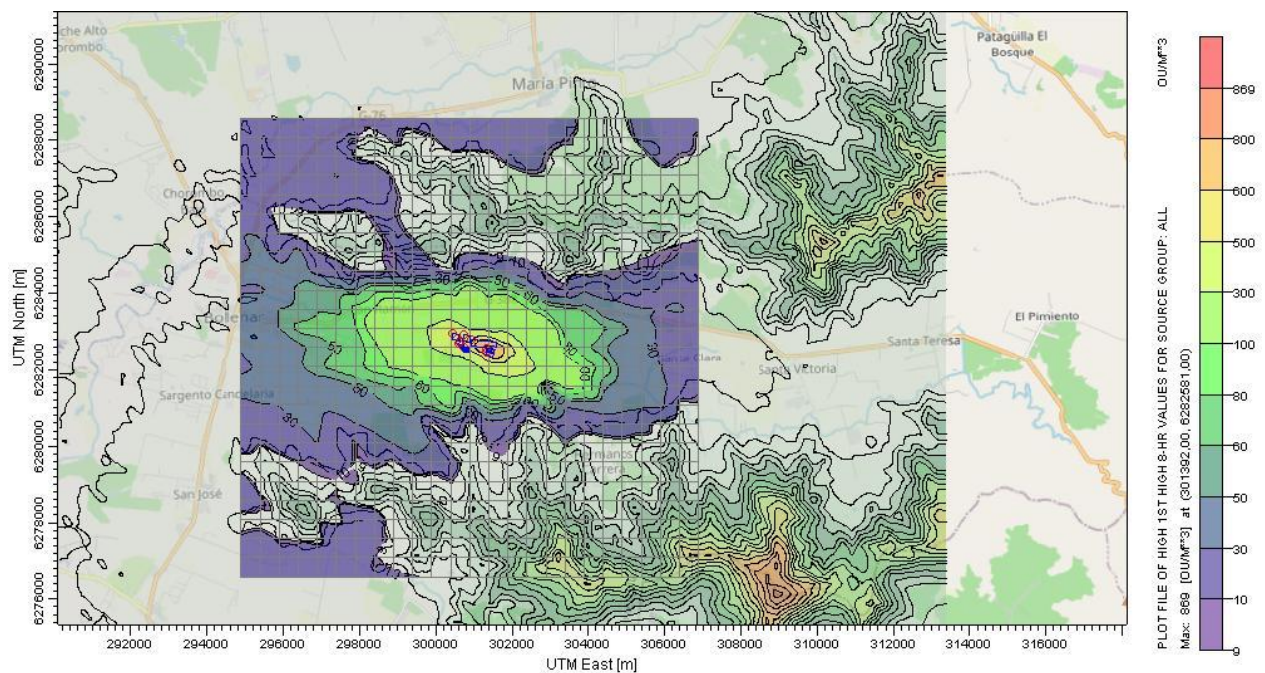


Figura 36. Concentraciones máximas a 8 horas, caso aumento de aumento de las emisiones