



ATSDR

Consulta de salud



Contaminación ambiental en el valle del río Tijuana

Evaluación del sulfuro de hidrógeno en el aire exterior



Condado de San Diego, California



**Publicación para comentarios del público
23 de septiembre del 2026**

**Fecha límite para comentarios del
público 21 de noviembre del 2026**



U.S. Department of
Health and Human Services
Agency for Toxic Substances
and Disease Registry

Consulta de salud: nota explicativa

Una consulta de salud es la documentación por escrito que contiene el análisis y las conclusiones de la ATSDR sobre los riesgos para la salud relacionados con un sitio de la Lista de Prioridades Nacionales (NPL) u otro sitio específico, un escape de sustancias químicas o la presencia de material peligroso. A fin de prevenir o mitigar las exposiciones, una consulta puede dar lugar a medidas específicas, como restringir el uso de suministros de agua o reemplazarlos, intensificar el muestreo ambiental, restringir el acceso al sitio o retirar el material contaminado. Además, las consultas podrían recomendar medidas adicionales de salud pública, como realizar actividades de vigilancia de salud para evaluar la exposición o las tendencias de los efectos adversos para la salud; recolectar y analizar muestras ambientales adicionales para caracterizar mejor las exposiciones; llevar a cabo estudios de indicadores biológicos de exposición para evaluar dicha exposición; y ofrecer educación de salud a los proveedores de atención médica y a los miembros de la comunidad. Esta consulta de salud se publica para ofrecer un periodo de 45 días para comentarios del público. La ATSDR abordará todos los comentarios del público y revisará el documento o incorporará anexos según sea necesario. La consulta de salud se emitirá nuevamente como documento final. El documento final concluirá el proceso de evaluación de salud pública para este sitio, a menos que la ATSDR obtenga información adicional que, en opinión de la agencia, indique la necesidad de revisar las conclusiones emitidas anteriormente o incorporar anexos.

Puede llamar a la ATSDR de forma gratuita al teléfono 1-800-CDC-INFO o 1-800-232-4636,

o

visitar nuestra página de inicio: <https://www.atsdr.cdc.gov>

Comentarios a: OCHHAPublicComment@cdc.gov



Consulta de salud

Evaluación de la contaminación ambiental por
sulfuro de hidrógeno en el aire exterior del valle
del río Tijuana, California

Departamento de Salud y Servicios Humanos de
los EE. UU. y Agencia para Sustancias Tóxicas y el
Registro de Enfermedades, Oficina de Evaluación
de Peligros para la Salud de la Comunidad
Atlanta, Georgia 30333

Acerca de la ATSDR

La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) es una agencia de salud pública federal que forma parte del Departamento de Salud y Servicios Humanos (HHS) de los EE. UU. La ATSDR trabaja con otras agencias y con Gobiernos tribales, estatales y locales para estudiar posibles riesgos para la salud en comunidades donde las personas podrían entrar en contacto con sustancias químicas peligrosas. Para obtener más información sobre la ATSDR, visite el sitio web de la ATSDR en www.atsdr.cdc.gov/.



Contenido

1. Resumen	1
2. Antecedentes	8
2.1. Planteamiento del problema y objetivo	8
2.2. Descripción del sitio y cronograma	8
3. Descripción de la comunidad y preocupaciones	14
3.1. Características demográficas de la comunidad	14
3.2. Preocupaciones de la comunidad	17
3.3. Resumen de las encuestas e investigaciones de salud de los CDC y la ATSDR.....	17
3.3.1. Exposiciones al agua	18
3.3.2. Exposiciones al aire.....	19
3.3.3. Efectos en la salud	19
3.3.4. Salud mental	19
3.3.5. Encuestas de salud: Conclusión	20
4. Datos de los muestreos	20
4.1. Datos del aire exterior	20
4.1.1. Datos del SDAPCD del aire exterior	21
4.1.2. Datos de la UCSD del aire exterior	22
4.1.3. Resumen de los datos del aire exterior disponibles	23
4.1.4. Correlación de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno entre los sitios de monitoreo en la escuela primaria Berry y en la avenida Leon.....	26
4.2. Quejas por olores	26
4.3. Caudal del río	27
5. Evaluaciones científicas.....	27
5.1. Análisis de las vías de exposición.....	28
5.2. Evaluación del aire exterior	28
5.2.1. Información general.....	29
5.2.2. Análisis de detección	29
5.2.3. Concentraciones en el punto de exposición.....	31
5.3. Evaluación de los efectos en la salud	35
5.3.1. Antecedentes sobre el sulfuro de hidrógeno y sus efectos en la salud.....	35
5.3.2. Información general del proceso de evaluación de los efectos en la salud	37
5.3.3. Estimaciones del riesgo de cáncer	37
5.3.4. Evaluación de los riesgos para la salud no cancerosos derivados de exposiciones agudas	37

5.3.5. Evaluación de los riesgos para la salud no cancerosos derivados de exposiciones intermedias	40
5.3.6. Evaluación de los riesgos para la salud no cancerosos derivados de exposiciones crónicas	43
5.3.7. Olores ambientales	46
5.4. Respuesta a las preocupaciones de la comunidad	48
5.5. Resumen de las limitaciones e incertidumbres	50
5.5.1. Susceptibilidad de los niños	50
5.5.2. Limitaciones de los muestreos	51
5.5.3. Supuestos de exposición	51
5.5.4. Base de datos de literatura científica sobre exposiciones crónicas	52
6. Conclusiones	52
6.1. Conclusión 1: Olores ambientales	52
6.2. Conclusión 2: Exposiciones a corto plazo (agudas)	52
6.3. Conclusión 3: Exposiciones a más largo plazo (intermedias y crónicas)	53
6.4. Conclusión 4: Exposiciones anteriores a septiembre del 2024	54
7. Recomendaciones y plan de acción de salud pública	54
7.1. Recomendaciones	54
7.2. Plan de acción de salud pública	56
8. Autores, equipo en el sitio y colaboradores	57
9. Referencias	58
Apéndices	63
Apéndice A: Resumen del proceso de evaluación de salud pública de la ATSDR (PHA)	64
Apéndice B: Tablas y figuras adicionales	66
Apéndice C: Correlación entre los sitios de monitoreo de la avenida Leon y la escuela primaria Berry	75

Lista de tablas

Tabla 1. Cronología de los acontecimientos recientes relacionados con el sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana	14
Tabla 2: Fuentes de datos del aire exterior	23
Tabla 3: Resumen de las estadísticas de las fuentes de datos del aire exterior	25
Tabla 4: Resultados de las pruebas de detección de sulfuro de hidrógeno en el aire	31
Tabla 5: Concentraciones en el punto de exposición (EPC) agudas	33
Tabla 6: Concentraciones en el punto de exposición (EPC) intermedias	34
Tabla 7: Concentraciones en el punto de exposición (EPC) crónicas	35
Tabla 8: Cocientes de peligro: exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire	38

Tabla 9: Márgenes de exposición: exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire	40
Tabla 10: Cocientes de peligro: exposiciones intermedias al sulfuro de hidrógeno en el aire	41
Tabla 11: Márgenes de exposición: exposiciones intermedias al sulfuro de hidrógeno en el aire	42
Tabla 12: Cocientes de peligro: exposiciones crónicas al sulfuro de hidrógeno en el aire	44
Tabla 13: Márgenes de exposición: exposiciones crónicas al sulfuro de hidrógeno en el aire	44
Tabla 14: Respuesta de la ATSDR a las preocupaciones de la comunidad	48
Tabla 15: Comparación de las EPC agudas diurnas y nocturnas	66
Tabla 16: Resultados de la prueba de Dickey-Fuller aumentada (ADF)	76
Tabla 17: Correlación cruzada entre sitios de monitoreo.....	76
Tabla 18: Coeficiente de correlación tau de Kendall, prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras emparejadas y tamaño del efecto para cada periodo (avenida Leon y escuela primaria Berry)	78

Lista de figuras

Figura 1: Esquema de aguas residuales y flujo del río en Tijuana	10
Figura 2: Valle del río Tijuana: Comunidades y sitios de monitoreo del aire	13
Figura 3: Información demográfica en un radio de 5 millas del sitio y Coronado	17
Figura 4: Ubicaciones de monitoreo del aire	24
Figura 5: Gráficos polares basados en datos de Teledyne T101 de las ubicaciones de monitoreo	67
Figura 6: Concentraciones diarias promedio de sulfuro de hidrógeno en comparación con los valores orientativos de salud.....	68
Figura 7: Promedios consecutivos de 30 minutos comparados con los valores orientativos de salud para el sulfuro de hidrógeno.....	69
Figura 8: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en la escuela primaria Berry	70
Figura 9: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en la avenida Leon	70
Figura 10: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en el Centro Cívico de Imperial Beach	72
Figura 11: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en la estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	71
Figura 12: Estimaciones del caudal del río Tijuana registradas por hora en comparación con las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el sitio de monitoreo en la avenida Leon del 1 al 22 de septiembre del 2024	72
Figura 13: EPC agudas durante el día y la noche por ubicación comparadas con el MRL agudo de sulfuro de hidrógeno	73
Figura 14: EPC intermedias durante el día y la noche por ubicación comparadas con el MRL intermedio de sulfuro de hidrógeno.....	74
Figura 15: Gráfico del coeficiente de correlación tau de Kendall para todos los sitios de monitoreo	75
Figura 16: Gráfico de correlación cruzada entre la escuela primaria Berry y la avenida Leon.....	77
Figura 17: Concentraciones equiparadas de sulfuro de hidrógeno en la avenida Leon y la escuela primaria Berry.....	78

Siglas y abreviaturas

95UCL	Límite superior de confianza del 95 por ciento de la media aritmética
ACE	Evaluación de la exposición a sustancias químicas
ADF	Prueba de Dickey-Fuller aumentada
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
CASPER	Evaluación Comunitaria para la Respuesta a Emergencias de Salud Pública
CDC	Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades
CO	Monóxido de carbono
CV	Valor de comparación
DPW	Departamento de Obras Públicas
ED	Sala de emergencias
EMEG	Pautas de evaluación de medios ambientales
EPA	Agencia de Protección Ambiental
EPC	Concentración en el punto de exposición
ESS	Tamaño efectivo de la muestra
GRASP	Programa de Investigaciones, Análisis y Servicios Geoespaciales
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
HEPA	Filtro de aire de partículas de alta eficiencia
HHE	Evaluación de riesgos para la salud
HHSA	Agencia de Salud y Servicios Humanos del Condado de San Diego
HQ	Cociente de peligro
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
IBWC	Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos
LOAEL	Nivel mínimo con efecto adverso observado
LOAEL _{Adj}	LOAEL ajustado
LOAEL _{HEC}	LOAEL de concentración equivalente para humanos
MOE	Margen de exposición
MRL	Nivel de riesgo mínimo
n.d.	Sin fecha
NIOSH	Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica
NOAEL	Nivel sin efecto adverso observado
NOAEL _{Adj}	NOAEL ajustado
NOAEL _{HEC}	NOAEL de concentración equivalente para humanos
NTP	Programa Nacional de Toxicología
OCDAPS	Oficina de Desarrollo de la Capacidad y Ciencia de la Prevención Aplicada
OCHHA	Oficina de Evaluación de Peligros para la Salud de la Comunidad
PB CILA	Planta de Bombeo Comisión Internacional de Límites y Aguas (PB CILA) Estación de bombeo
PHA	Evaluación de salud pública
PPB	Partes por mil millones
PPE	Equipo de protección personal

PPM	Partes por millón
RfC	Concentración de referencia
RMEG	Pautas de evaluación de medios por dosis de referencia
SBIWTP	Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de South Bay
SDAPCD	Distrito de Control de Contaminación del Aire de San Diego
SO ₂	Dióxido de azufre
TeledyneT101	Analizador de H ₂ S por fluorescencia UV modelo T101 de Teledyne API
TVOC	Compuestos orgánicos volátiles totales
UCSD	Universidad de California en San Diego

1. Resumen

En mayo del 2024, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) recibieron una solicitud de miembros de la delegación del Congreso de California para investigar los efectos en la salud pública de la contaminación por aguas residuales en Tijuana, tanto en el río Tijuana como en las comunidades aledañas de Imperial Beach, Coronado y San Diego. La delegación del Congreso solicitó a los CDC/ATSDR que evaluaran la presencia de contaminantes en el agua, el suelo y el aire de las comunidades. También se pidió a los CDC/ATSDR que investigaran cualquier posible vínculo entre estos contaminantes y los aumentos notificados de enfermedades gastrointestinales y otros síntomas.

En julio del 2024, el director de los CDC/ATSDR respondió que la ATSDR iniciaría el proceso de solicitud para investigar preocupaciones específicas sobre salud ambiental. La ATSDR recolectó datos sobre aire, aguas superficiales, sedimentos y biota provenientes de colaboradores federales, estatales, locales y académicos, y determinó que existía información suficiente para aceptar la solicitud. El 7 de enero del 2025, el director de los CDC/ATSDR notificó a la delegación del Congreso que la ATSDR llevaría a cabo una evaluación de salud pública sobre el sulfuro de hidrógeno en el aire [CDC/ATSDR 2025].

La ATSDR dará a conocer los resultados de las actividades de evaluación de salud pública en dos informes. Este es el primero y se centra en las exposiciones potenciales a contaminantes presentes en el aire del valle del río Tijuana. Un segundo informe abordará otras vías de exposición potenciales, como las aguas superficiales, los sedimentos y el suelo. En esta consulta de salud, la ATSDR evaluó las exposiciones a contaminantes del aire a través del aire exterior en el valle del río Tijuana siguiendo el proceso de evaluación de salud pública (PHA) de la agencia, como se resume en el [Apéndice A](#) y se detalla en la [Explicación del proceso de PHA de la ATSDR](#) [ATSDR 2022].

La ATSDR llegó a las siguientes conclusiones tras evaluar los datos sobre el aire en el valle del río Tijuana y los riesgos para la salud asociados:

Conclusión 1

Los olores ambientales en el valle del río Tijuana pueden afectar negativamente la salud y el bienestar de las personas.

Fundamentos de la conclusión

- Se midieron niveles de sulfuro de hidrógeno en el aire exterior por encima del umbral de olor a sulfuro de hidrógeno en muestras de 30 minutos en los cuatro sitios de monitoreo de del aire en el valle del río Tijuana hasta el 93 % del tiempo.
 - Como resultado, las personas en el valle del río Tijuana podrían presentar síntomas de salud relacionados con olores ambientales, como dolores de cabeza, náuseas, estrés o molestia, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar [ATSDR 2014, ATSDR 2016].
-

-
- Algunos de los síntomas que las personas presentan debido a los olores ambientales son similares a los observados en estudios toxicológicos sobre el sulfuro de hidrógeno a concentraciones más elevadas (por ejemplo, 2000 ppb, el nivel más bajo en el que se han observado efectos en la salud en estudios toxicológicos). Sin embargo, el sulfuro de hidrógeno puede percibirse por el olfato a niveles mucho más bajos (tan bajos como aproximadamente 0.5 ppb). Esto significa que pueden aparecer síntomas en respuesta al olor mismo, incluso a niveles muy inferiores a los que se usan en estudios toxicológicos. Así, los olores ambientales pueden influir en cómo se sienten las personas, incluso cuando los niveles químicos medidos son bajos.
-

Conclusión 2

El sulfuro de hidrógeno en el aire exterior en el sitio de monitoreo en la avenida Leon, y probablemente también en el sitio de monitoreo en la escuela primaria Berry, ha alcanzado durante cortos periodos un nivel que podría dañar la salud de las personas. La exposición al sulfuro de hidrógeno a este nivel representa un riesgo para la salud pública.

Fundamentos de la conclusión

- Se tomaron lecturas de sulfuro de hidrógeno con intervalos de 1 minuto en cuatro sitios de monitoreo en el valle del río Tijuana. La ATSDR calculó promedios móviles de 30 minutos a partir de estos datos para comparar los resultados con las concentraciones en el aire citadas en la literatura toxicológica que examina los efectos del sulfuro de hidrógeno en la salud derivados de la exposición a corto plazo.
 - La concentración más alta en el punto de exposición (EPC; un promedio móvil máximo de 30 minutos) se registró en el sitio de monitoreo de la avenida Leon en septiembre del 2024; el promedio móvil de 30 minutos fue de 3021.5 partes por mil millones (ppb). Esta EPC está por encima del nivel mínimo con efecto adverso observado (LOAEL) de 2000 ppb identificada en el estudio de Jäppinen et al. (1990) usado para establecer el nivel de riesgo mínimo (MRL) agudo de la ATSDR.
 - Esto significa que las personas que respiraron sulfuro de hidrógeno en esta ubicación estuvieron expuestas, en ocasiones, a concentraciones superiores a aquellas que, según se ha demostrado, causan efectos en la salud de los seres humanos. Estos efectos en la salud incluyen dolores de cabeza, sequedad de la nariz y garganta y, posiblemente, dificultad al respirar en personas sensibles.
-

-
- En la avenida Leon, las concentraciones móviles de sulfuro de hidrógeno calculadas en intervalos de 30 minutos superaron el LOAEL de 2000 ppb durante el 0.04 % del tiempo. Los valores de EPC para las ubicaciones restantes fueron inferiores a 2000 ppb. La escuela primaria Berry se encuentra al otro lado de la calle frente al sitio de monitoreo de la avenida Leon. El monitoreo en Berry no comenzó sino hasta octubre del 2024 (después de que se registraran las concentraciones más altas de sulfuro de hidrógeno en la avenida Leon). Es probable que los niveles de sulfuro de hidrógeno también fueran elevados en la escuela primaria Berry, dado que ambas ubicaciones están muy cerca entre sí; sin embargo, la ATSDR no dispone de datos sobre la calidad del aire en dicha escuela previos al inicio del monitoreo. Sin embargo, la ATSDR demostró que existe una correlación significativa entre los niveles de sulfuro de hidrógeno en ambas ubicaciones.
-

Conclusión 3

No se prevé que las exposiciones al sulfuro de hidrógeno a más largo plazo (14 días o más) en los cuatro sitios de monitoreo representen un riesgo para la salud pública ni que provoquen efectos adicionales en la salud más allá de los vinculados a exposiciones elevadas de corta duración. Sin embargo, aún podrían estar relacionadas con síntomas causados por los olores.

Fundamentos de la conclusión

- **Duración intermedia (de más de 14 días a 364 días):** La ATSDR calculó promedios móviles de 14 días como la EPC para cada sitio de monitoreo, a modo de estimación conservadora de las exposiciones de duración intermedia. La EPC más alta correspondió a la avenida Leon (151.9 ppb). La siguiente EPC más alta correspondió a la escuela primaria Berry (31.6 ppb).
 - Las EPC en ambos sitios superaron el MRL intermedio de la ATSDR (20 ppb). Sin embargo, estos niveles fueron nueve veces más bajos (en la avenida Leon) y 44 veces más bajos (en Berry) que el nivel que, según la literatura toxicológica, provoca efectos en la salud (1380 ppb). Por lo tanto, la ATSDR no prevé que las exposiciones de duración intermedia al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana dañen la salud de las personas.
 - **Duración crónica (1 año o más):** La ATSDR promedió entre cuatro y siete meses de datos de monitoreo de cada ubicación de muestreo para determinar las EPC para exposiciones crónicas. El monitoreo del aire comenzó en diferentes momentos en cada sitio, lo que explica la
-

variación en el periodo durante el cual se dispone de datos para cada uno.

- La EPC más alta correspondió a la avenida Leon (23.6 ppb). La siguiente EPC más alta correspondió a la escuela primaria Berry (9.2 ppb). Estos niveles fueron 58 y 150 veces más bajos que los niveles que, según la literatura toxicológica, provoca efectos en la salud (1380 ppb). Por lo tanto, la ATSDR no prevé que la exposición crónica al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana dañe la salud de las personas.

Conclusión 4

La ATSDR no puede concluir si respirar sulfuro de hidrógeno en el aire exterior en el valle del río Tijuana antes de septiembre del 2024 pudo haber causado daños la salud de las personas. No se recolectaron datos suficientes antes de ese periodo.

Fundamentos de la conclusión

- En septiembre del 2024 comenzó el monitoreo del aire en el valle del río Tijuana, usando instrumentos adecuados para la evaluación de la salud pública. No se dispone de datos anteriores a esa fecha para evaluar los riesgos para la salud.
- La ATSDR entiende que el problema de las aguas residuales del río Tijuana ha persistido durante muchos años y que, casi con toda seguridad, se han producido exposiciones al sulfuro de hidrógeno en el aire exterior como consecuencia de ello. No podemos cuantificar ni caracterizar estas exposiciones pasadas sin datos.

Próximos pasos

La ATSDR dará a conocer estos hallazgos al público. Más adelante publicaremos un segundo informe que abordará otras posibles vías de exposición en el valle del río Tijuana, como la exposición a sustancias químicas presentes en el agua superficial, los sedimentos y el suelo.

La ATSDR tiene las siguientes recomendaciones de salud pública basadas en nuestra evaluación del sulfuro de hidrógeno en el aire exterior en cuatro sitios de monitoreo alrededor del valle del río Tijuana:

Recomendaciones para las agencias federales y estatales:

- Prevengan el flujo transfronterizo de aguas residuales hacia el valle del río Tijuana para mantener los niveles de sulfuro de hidrógeno lo más bajos posible, idealmente por debajo del umbral de olor de 0.5 ppb.

-
- Mejoren y mantengan la infraestructura de tratamiento de aguas residuales para manejar los flujos en el valle del río Tijuana.
 - Continúen colaborando con las agencias locales para implementar medidas que reduzcan las emisiones de sulfuro de hidrógeno en el punto donde el río Tijuana pasa por debajo del bulevar Saturn.

Recomendaciones para las agencias locales:

- Continúen monitoreando el sulfuro de hidrógeno en el aire. Notifiquen a los miembros de la comunidad, empresas, guarderías y escuelas cuando los niveles superen los umbrales establecidos por las agencias estatales o locales para proteger la salud. Usen diversos métodos para comunicarse con los miembros de la comunidad (por ejemplo, mensajes de texto y correos electrónicos).
 - Mantengan la señalización en todo el valle del río Tijuana para alertar a los visitantes sobre la posible presencia de sulfuro de hidrógeno.
 - Sigam ofreciendo purificadores de aire y filtros a través del Programa de alivio para la mejora del aire (Air Improvement Relief Effort Program).
 - Continúen documentando y monitoreando las quejas relacionadas con los olores. Consideren formas de identificar con precisión la ubicación de las quejas por olores para centrar el monitoreo del aire en las zonas críticas y comprender mejor la distribución geográfica de los olores.
 - Realicen monitoreos del aire para determinar los niveles de sulfuro de hidrógeno más allá de las ubicaciones con monitores fijos. Consideren ampliar el monitoreo del aire a otros contaminantes que puedan liberarse del río Tijuana, incluidos los compuestos orgánicos volátiles.
 - Continúen colaborando con agencias federales y estatales para reducir las emisiones de sulfuro de hidrógeno en el punto donde el río Tijuana pasa por debajo del bulevar Saturn.
 - Verifiquen que las intervenciones para abordar el problema del sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana no provoquen exposiciones dañinas continuas o adicionales.
 - Mantengan la Guía comunitaria sobre el sulfuro de hidrógeno:
<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>. Consideren colaborar
-

con las agencias estatales y federales pertinentes para elaborar e incorporar recomendaciones dirigidas a los trabajadores que no puedan salir del área o estar en un espacio interior durante su turno.

Recomendaciones para las escuelas:

- Monitoreen los niveles de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana a través del sitio web de monitoreo de la calidad del aire del Distrito de Control de Contaminación del Aire de San Diego (SDAPCD): <https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>. Sigán las directrices del SDAPCD y del Condado de San Diego sobre el sulfuro de hidrógeno para la comunidad.
- Consulten los materiales que se incluyen en la página web de recursos para escuelas del Condado de San Diego para tomar decisiones informadas sobre las actividades diarias: https://www.sandiegocounty.gov/content/sdc/hhsa/programs/phs/community_epidemiology/south-region-health-concerns/schools.html.

Recomendaciones para los miembros de la comunidad:

- Monitoreen los niveles de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana a través del sitio web de monitoreo de la calidad del aire del SDAPCD: <https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>. Sigán las directrices del SDAPCD y del Condado de San Diego sobre el sulfuro de hidrógeno para la comunidad.
- Las personas sensibles a los olores ambientales pueden reducir su exposición usando purificadores de aire, limitando las actividades al aire libre cuando los olores sean molestos, manteniendo cerradas las puertas y ventanas cuando los olores del exterior sean molestos, o abandonando el área según sea necesario cuando el monitoreo indique niveles elevados de sulfuro de hidrógeno. Eviten usar velas e incienso en el hogar para enmascarar los olores a sulfuro de hidrógeno. Las velas y el incienso en sí mismos pueden ser irritantes.
- Se anima a los residentes elegibles a obtener un purificador de aire gratuito a través del Programa de alivio para la mejora del aire del SDAPCD. Pueden encontrar información sobre el programa aquí: <https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river->

valley/aire.html. Información sobre el mejor uso de los purificadores de aire:
<https://www.sdapcd.org/content/dam/sdapcd/documents/tjrv/aire/CARB-CleanAirSpace-Infographic.pdf>. Los filtros purificadores de aire son más eficaces cuando se les da mantenimiento y se reemplazan según las instrucciones del fabricante.

- Reporten los olores en el valle del río Tijuana al SDAPCD llamando al (858) 586-2650 o enviando un correo electrónico a apcdcomp@sdapcd.org. Fuera del horario de atención, llamen al (858) 586-2650 y seleccionen la opción 2. También se puede descargar una aplicación para reportar olores en el sitio web de SDAPCD para inquietudes relacionadas con la calidad del aire:
<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/compliance/air-quality-complaints.html>.
- Se recomienda a las personas preocupadas por los efectos en la salud derivados de la exposición al sulfuro de hidrógeno que consulten a su médico. Consideren proporcionar una copia de la hoja informativa que resume este informe.

Más información

Los miembros de la comunidad pueden comunicarse con la oficina de la Región 9 de la ATSDR para obtener más información sobre los niveles de sulfuro de hidrógeno y los riesgos para la salud en el valle del río Tijuana. Pueden obtener la información de contacto del personal de la Región 9 de la ATSDR aquí:
<https://www.atsdr.cdc.gov/regional-offices/index.html> o llamando al 800-CDC-INFO (800-232-4636).

2. Antecedentes

2.1. Planteamiento del problema y objetivo

Durante décadas, aguas residuales sin tratar han fluído desde Tijuana (México) hasta el valle del río Tijuana y el océano Pacífico debido a problemas en la infraestructura de aguas residuales. Sulfuro de hidrógeno

El "gas de alcantarilla", que tiene un olor desagradable a huevo podrido, y otros contaminantes se liberan de estos flujos de aguas residuales, lo que produce problemas de calidad del aire y malos olores en las comunidades cercanas. El sulfuro de hidrógeno se forma en el río Tijuana a medida que las bacterias descomponen la materia orgánica presente en el río [OSHA 2005]. Diversas agencias federales, estatales y locales, universidades, organizaciones comunitarias y funcionarios electos participan en iniciativas para mejorar la infraestructura de aguas residuales y abordar las preocupaciones relacionadas con el medioambiente y la salud.

En mayo del 2024, los CDC y la ATSDR recibieron una solicitud de miembros del Congreso de California para investigar los efectos en la salud pública de la contaminación por aguas residuales en el río Tijuana y las comunidades cercanas. En respuesta, la ATSDR inició el proceso de revisión de solicitudes de la agencia [ATSDR 2024a] y, en enero del 2025, decidió llevar a cabo actividades de evaluación de salud pública. La ATSDR evaluó si la exposición al sulfuro de hidrógeno en el aire cerca del río Tijuana, en el sur del Condado de San Diego (California), podría dañar la salud de las personas.

Hay tanto contaminantes biológicos (por ejemplo, bacterias como *E. coli*) como contaminantes químicos (por ejemplo, sulfuro de hidrógeno) están presentes en los flujos de aguas residuales que afectan al valle del río Tijuana y a las aguas del océano Pacífico [CRWQCB 2024]. **Sin embargo, de conformidad con el mandato del Congreso a la ATSDR, las actividades de evaluación de salud pública se centran en la exposición a sustancias químicas potencialmente dañinas [ATSDR 2024b]. La evaluación de la ATSDR se compartirá en dos informes.** Este es el primer informe, que se centra en la exposición al sulfuro de hidrógeno en el aire. Un informe futuro abordará las exposiciones potenciales a sustancias químicas en el agua superficial, los sedimentos y el suelo.

2.2. Descripción del sitio y cronograma

El valle del río Tijuana, ubicado a lo largo de la frontera entre los Estados Unidos y México en el condado de San Diego, California, es una llanura aluvial natural de gran importancia ecológica, con una extensión de 8 millas cuadradas y usos mixtos del suelo [Ciudad de San Diego, n.d., CSLC 2025] (n.d. = sin fecha). El valle alberga actividades recreativas (como montar a caballo, senderismo, acampar y surfear), conservación, agricultura, actividades militares y zonas comerciales y residenciales. Imperial Beach y Coronado se encuentran entre las comunidades cercanas. La mayor parte del territorio del valle del río Tijuana es administrado por diversas agencias gubernamentales binacionales, federales, estatales y locales.

El valle del río Tijuana es una pequeña parte de la cuenca del río Tijuana, de 1700 millas

cuadradas, la mayor parte de la cual se encuentra en el norte de Baja California, México [Ciudad de San Diego n.d.]. El río Tijuana fluye hacia el norte desde México, atraviesa la ciudad de Tijuana y entra en los Estados Unidos, desembocando finalmente en el océano Pacífico. El caudal del río es muy variable y presenta fluctuaciones estacionales significativas debido a los patrones de precipitación.

El flujo transfronterizo se refiere al movimiento de agua a través de una frontera internacional. Durante la temporada de lluvias, el río puede experimentar aumentos rápidos en el flujo transfronterizo, lo que contribuye a inundaciones en ciertas zonas. Las lluvias torrenciales también depositan grandes cantidades de basura, escombros y sedimentos en el valle.

Además de los caudales estacionales propios de la época de lluvias, los flujos transfronterizos propios de la época seca son una preocupación importante en el valle del río Tijuana. Estos flujos se producen durante los periodos secos, cuando aguas residuales sin tratar (por ejemplo, aguas residuales y desechos industriales) procedentes de Tijuana ingresan al sistema fluvial. El rápido crecimiento de la población de Tijuana y los desafíos relacionados con la infraestructura de tratamiento de aguas residuales han agravado los problemas de contaminación transfronteriza persistentes.

Existen tres vías principales por las que la contaminación transfronteriza llega a las aguas de California en esta zona [CSLC 2025, EPA 2021a]:

1. Agua contaminada fluye por el cauce principal del río Tijuana, atraviesa el valle del río Tijuana y llega al océano Pacífico.
2. Agua contaminada ingresa al valle a través de cañones tributarios situados a lo largo de la frontera.
3. Aguas residuales sin tratar se descargan en el océano en territorio mexicano —cinco millas al sur de la frontera— y son arrastradas hacia el norte por las corrientes oceánicas hasta las aguas costeras del Condado de San Diego.

El manejo de las aguas residuales en el valle del río Tijuana es complejo, en parte debido a la naturaleza transfronteriza de la región. El esquema de la [Figura 1](#) describe la infraestructura de aguas residuales tanto en los Estados Unidos como en México. La Comisión Internacional de Límites y Aguas (IBWC) maneja los asuntos relacionados con el agua a lo largo de la frontera. La sección en los EE. UU. de la IBWC opera la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de South Bay (SBIWTP), situada en los Estados Unidos, cerca de la frontera [IBWC 2023]. La SBIWTP trata las aguas residuales provenientes de Tijuana [SDRWQCB n.d.]. La IBWC también es propietaria de cinco colectores de cañón destinados a captar los flujos transfronterizos en tiempo seco que se producen en los cañones tributarios a lo largo de la frontera. El agua captada por los colectores de cañón se bombea para su tratamiento en la SBIWTP [SDRWQCB n.d.]. Posteriormente, el agua tratada en la SBIWTP se bombea hacia el Emisario Oceánico de South Bay, en el océano Pacífico, a unas 3.5 millas de la costa. La infraestructura de aguas residuales en el valle del río Tijuana incluye la estación de bombeo principal en México (Planta de Bombeo Comisión Internacional de Límites y Aguas [“PB CILA”]) y otras estaciones de bombeo destinadas a desviar los flujos del río en tiempo seco hacia la SBIWTP o hacia la Planta de Tratamiento San Antonio de los Buenos, en México.

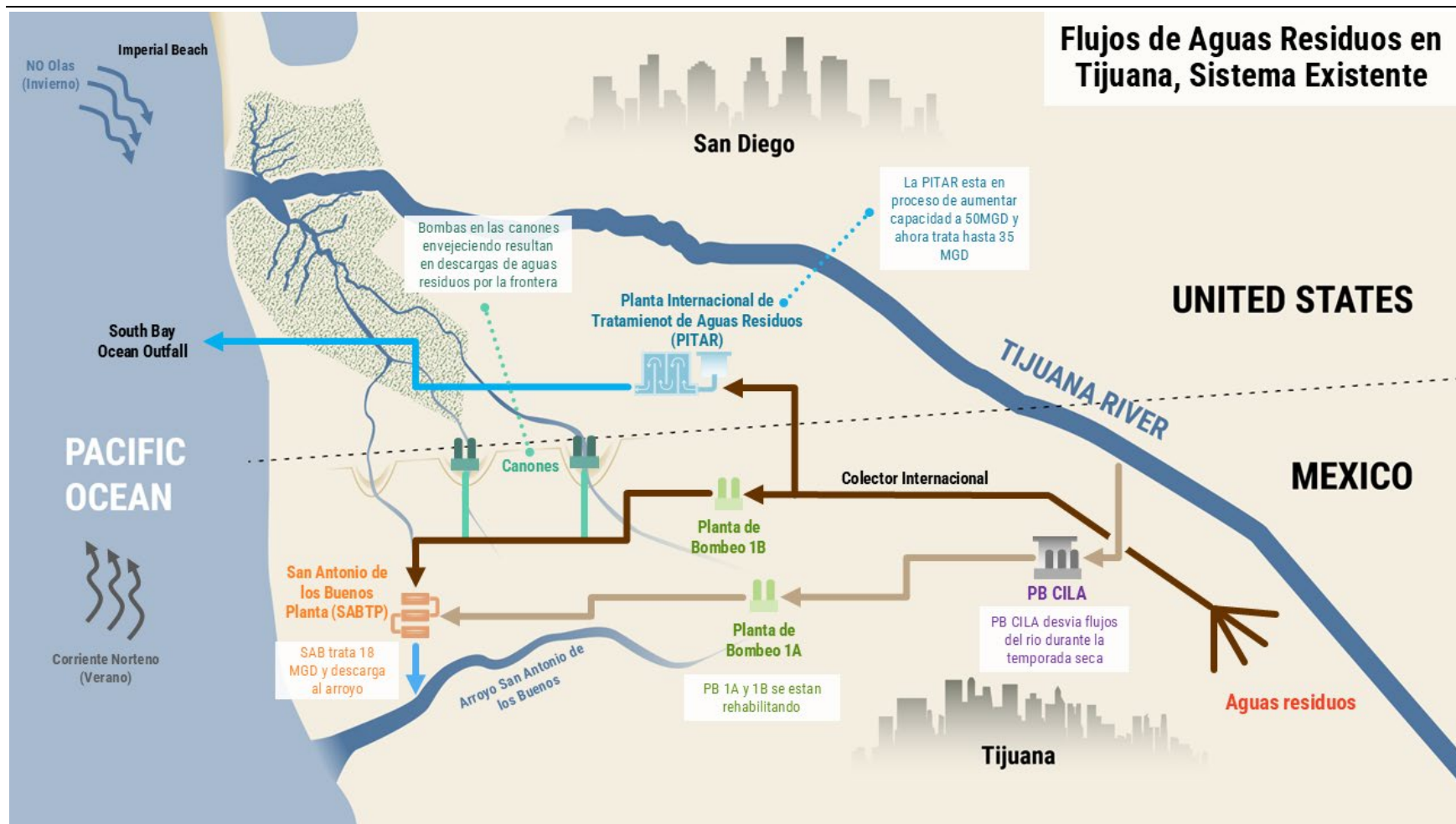


Figura 1: Esquema de aguas residuales y flujo del río en Tijuana

Fuente: [EPA 2021a]

Desde hace décadas se llevan a cabo esfuerzos binacionales para mejorar la infraestructura de captación y tratamiento de aguas residuales, pero persisten diversos desafíos. El volumen de aguas residuales provenientes de Tijuana a menudo supera la capacidad de la planta internacional de tratamiento. Además, los flujos transfronterizos, tanto en época de lluvias como en temporada seca, a veces rebasan la capacidad de los colectores de los cañones, descargando aguas residuales sin tratar en el valle del río Tijuana. También se han registrado numerosos derrames y descargas de aguas residuales sin tratar procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales obsoletas.

Tal como se establece en un acuerdo de julio del 2025 entre los Estados Unidos y México, se han realizado múltiples esfuerzos continuos para reducir y prevenir la contaminación por aguas residuales en la región de Tijuana-San Diego [EPA 2025]. Entre estas iniciativas se incluye el reciente aumento de la capacidad de la planta internacional de tratamiento, que pasó de 25 millones a 35 millones de galones diarios.

Diversas agencias y organizaciones trabajan para comprender mejor y abordar las preocupaciones relacionadas con la exposición al sulfuro de hidrógeno. En la [tabla 1](#) se presenta una visión general de las actividades recientes. En el 2024, el Condado de San Diego publicó una advertencia de salud [HHSa 2024a] y colaboró con los CDC y la ATSDR para realizar dos encuestas de salud comunitaria [HHSa 2024b, HHSa 2024c], que se describen con más detalle en la sección [3.3](#). El Distrito de Control de la Contaminación del Aire del Condado de San Diego (SDAPCD) monitorea los niveles de sulfuro de hidrógeno en el aire en tres ubicaciones del valle del río Tijuana ([Figura 2](#)). El SDAPCD publica estos resultados de monitoreo en un sitio web público y emite notificaciones a la comunidad cuando los niveles superan la norma de calidad del aire ambiental de California de 30 ppb [SDAPCD 2024].

El SDAPCD también colaboró con el Condado de San Diego y otras agencias, incluida la ATSDR, para elaborar recomendaciones de salud pública dirigidas a los miembros de la comunidad. Estas recomendaciones también están disponibles en el sitio web del SDAPCD dedicado al monitoreo de sulfuro de hidrógeno en el aire. Además, el SDAPCD distribuye purificadores de aire a los hogares elegibles en las zonas afectadas por los olores a sulfuro de hidrógeno [SDAPCD 2025b]. Para el 31 de julio del 2025, 4752 hogares habían recibido un purificador de aire a través del programa, y solo una pequeña parte de los usuarios (17 %) informó no haber experimentado ninguna mejora en su salud [SDAPCD 2025a].

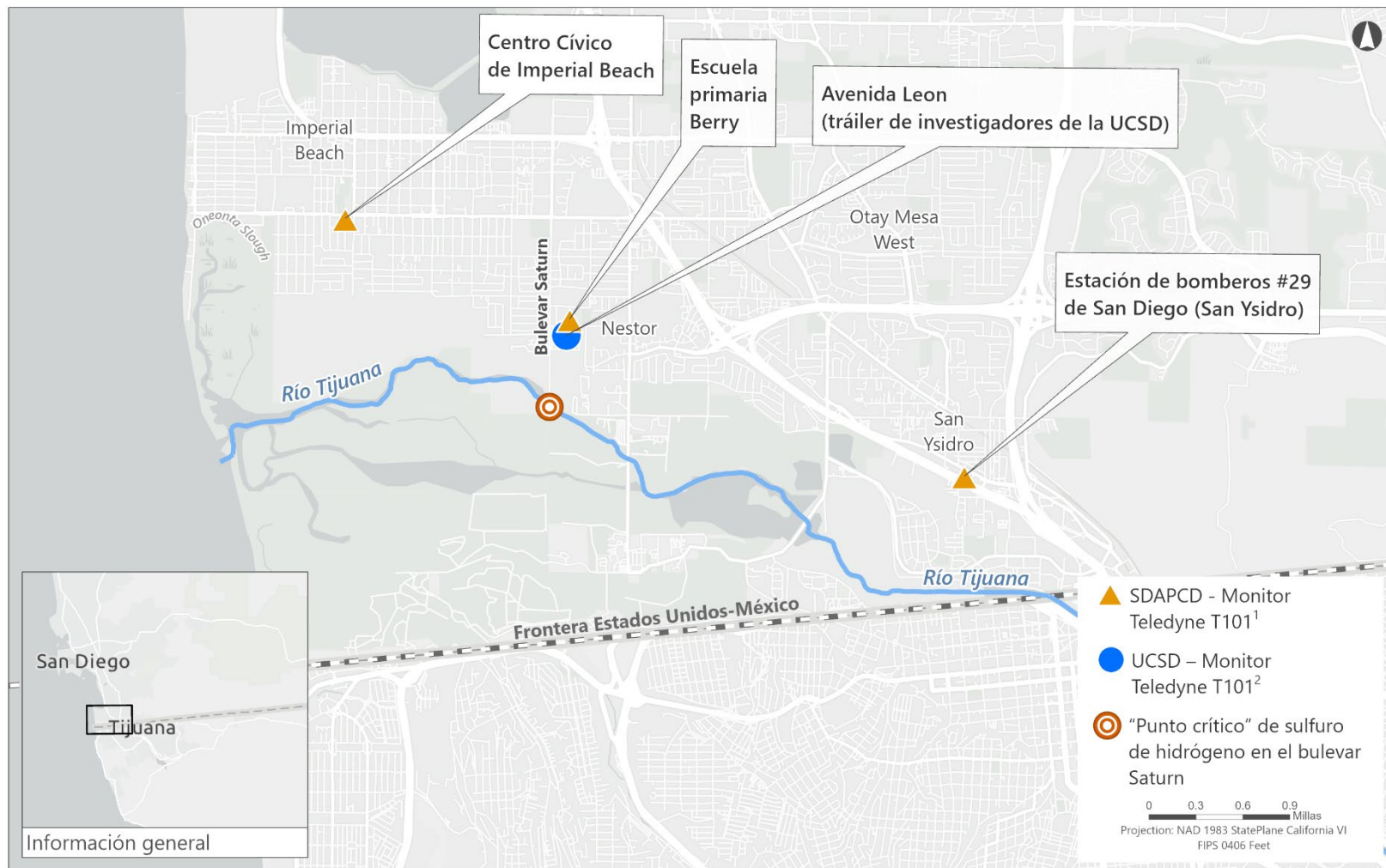
Investigadores de la Universidad de California en San Diego aprovecharon los conocimientos de los miembros de la comunidad para ayudar a identificar un punto crítico de emisión de sulfuro de hidrógeno causado por la turbulencia del río [Rico et al. 2025]. El punto crítico se encuentra donde el río Tijuana fluye por debajo del bulevar Saturn ([Figura 2](#)). La IBWC y las agencias locales están explorando soluciones para reducir los niveles de sulfuro de hidrógeno en esa ubicación [SDPR

2026, Soto 2025]. El Condado de San Diego también colocó señales de advertencia sobre la exposición al sulfuro de hidrógeno en partes del valle del río Tijuana en agosto del 2025 [Lightfoot 2025].

Como parte del proceso de evaluación de salud pública de la ATSDR, personal de esa agencia visitó el valle del río Tijuana en junio del 2025 para conocer la geografía de la zona y las formas en que las personas podrían exponerse a sustancias químicas presentes en el medioambiente. Durante dos días, recorrieron los sitios de muestreo ambiental, observaron cómo las personas utilizan el área, percibieron los olores a sulfuro de hidrógeno y se reunieron con diversas agencias y organizaciones.

Valle del río Tijuana: Comunidades y sitios de monitoreo del aire

Valle del río Tijuana, Condado de San Diego



ATSDR

Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades
Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades



Programa de Investigaciones, Análisis y Servicios Geoespaciales

PRJ ID 13711
9/1/2026

FINAL - PARA DISTRIBUCIÓN PÚBLICA

FUENTE(S) DE DATOS: ¹SDAPCD (Distrito de Control de Contaminación del Aire de San Diego), ²UCSD (Universidad de California en San Diego)

Figura 2: Valle del río Tijuana: Comunidades y sitios de monitoreo del aire

Tabla 1. Cronología de los acontecimientos recientes relacionados con el sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana

Fecha/Año	Evento
Marzo del 2023	Investigadores de la UCSD documentan las bacterias y sustancias químicas en aerosoles de rocío marino [Pendergraft et al. 2023].
Septiembre del 2023	SDAPCD comienza a monitorear el sulfuro de hidrógeno y otros contaminantes utilizando sensores AQMesh.
Mayo del 2024	Los CDC y la ATSDR reciben una solicitud de miembros de la delegación del Congreso de California para investigar los efectos en la salud pública de la contaminación por aguas residuales en Tijuana, tanto en el río Tijuana como en las comunidades aledañas de Imperial Beach, Coronado y San Diego.
Septiembre de 2024	Los flujos inusuales de los ríos durante la temporada seca aumentan las quejas por olores. Investigadores de la UCSD y el Condado de San Diego detectan niveles elevados de sulfuro de hidrógeno. El SDAPCD inicia el monitoreo de sulfuro de hidrógeno en San Ysidro usando un analizador modelo T101 de fluorescencia UV (Teledyne T101). Investigadores de la UCSD comienzan a monitorear el sulfuro de hidrógeno con un Teledyne T101 en la avenida Leon (Figura 2 , Figura 4).
Octubre del 2024	El Condado de San Diego y los CDC llevan a cabo la encuesta de Evaluación Comunitaria para la Respuesta a Emergencias de Salud Pública (CASPER). El Condado de San Diego y la ATSDR llevan a cabo la encuesta de la Evaluación de la exposición a sustancias químicas (ACE).
Octubre a diciembre del 2024	El SDAPCD comienza el monitoreo de sulfuro de hidrógeno con analizadores Teledyne T101 en la escuela primaria Berry y el Centro Cívico de Imperial Beach (Figura 2 , Figura 4). El SDAPCD publica un panel de información en línea con datos de monitoreo de sulfuro de hidrógeno. El SDAPCD y el Condado de San Diego emiten directrices para la comunidad sobre el sulfuro de hidrógeno.
Enero del 2025	Los CDC y la ATSDR aceptan las solicitudes y comienzan a realizar una evaluación de salud pública sobre el sulfuro de hidrógeno en el aire.
Febrero del 2025	El SDAPCD comienza a distribuir purificadores de aire gratuitos con filtros de partículas de aire de alta eficiencia (HEPA) con carbón activado y permanganato de potasio en las zonas afectadas por olores a sulfuro de hidrógeno.
Marzo del 2025	El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) completa una evaluación de riesgos para la salud (HHE), solicitada por la ciudad de Imperial Beach en agosto del 2024 [Shi 2025].
Junio del 2025	La ATSDR realiza una visita al sitio para la evaluación de salud pública del valle del río Tijuana.
Agosto del 2025	El Condado de San Diego coloca señales de advertencia sobre la exposición al sulfuro de hidrógeno en partes del valle del río Tijuana.

3. Descripción de la comunidad y preocupaciones

3.1. Características demográficas de la comunidad

El Condado de San Diego, California, abarca aproximadamente 4526 millas cuadradas [DPW n.d.]. Incluye 18 ciudades incorporadas y varias áreas no incorporadas, que presentan una mezcla de comunidades urbanas y rurales [HHSA n.d.]. Una porción significativa del área es rural, y la agricultura desempeña un papel vital en la economía local. Otros sectores económicos clave incluyen el aeroespacial, la ciberseguridad, las ciencias de la vida, el software, el turismo, la defensa y la manufactura [SDREDC 2024].

Alrededor del 10 % de la población del condado vive por debajo de la línea de pobreza [Bureau n.d.]. Las cinco áreas censales (6073010009, 6073010109, 6073010104, 6073010110 y 6073010200) que rodean el río Tijuana se sitúan entre los percentiles 50 y 93 en cuanto al porcentaje de población que vive por debajo de la línea federal de pobreza [OEHHA 2021]. Aproximadamente el 45 % de la población del condado tiene un título universitario o superior [Bureau n.d.]. Las cinco áreas censales cercanas al río se sitúan entre los percentiles 25 y 85 en cuanto al porcentaje de población mayor de 25 años con un nivel educativo inferior a la escuela secundaria superior [OEHHA 2021].

El Programa de Investigaciones, Análisis y Servicios Geoespaciales (GRASP) de la ATSDR hizo los mapas y cálculos de los datos demográficos en el Condado de San Diego en un radio de dos y cinco millas del río Tijuana ([Figura 3](#)). La población en un radio de dos millas del río asciende a 104 781 habitantes. Esta cifra incluye a 78 161 personas identificadas como hispanas o latinas, 27 125 como de raza blanca, 3002 como de raza negra, 1662 como indígenas de los Estados Unidos y nativos de Alaska, 6592 como asiáticas, 373 como nativas de Hawái o de otra isla del Pacífico, 38 198 de alguna otra raza y 27 830 de dos o más razas.

En la localidad turística vecina de Coronado, que también alberga una base de la Marina, la población total es de 18 288 habitantes, incluyendo a 13 912 personas identificadas como de raza blanca, 3029 como hispanas o latinas, 2225 como de dos o más razas, 820 como de alguna otra raza, 637 como de raza negra, 548 como asiáticas, 99 como indígenas de los Estados Unidos y nativos de Alaska y 46 como nativas de Hawái o de otra isla del Pacífico.

Una parte significativa de la población se clasifica como socialmente vulnerable a los desastres y se sitúa en percentiles de medios a altos en cuanto a vulnerabilidad social general [GRASP 2022], lo que genera preocupación sobre la carga de las

exposiciones ambientales para la comunidad. Las cinco áreas censales que rodean el río se sitúan entre los percentiles 47 y 77 en cuanto a la tasa ajustada por edad de visitas a la sala de emergencias (ED) por asma por cada 10 000 habitantes (promedio del 2015 al 2017) [OEHHA 2021].

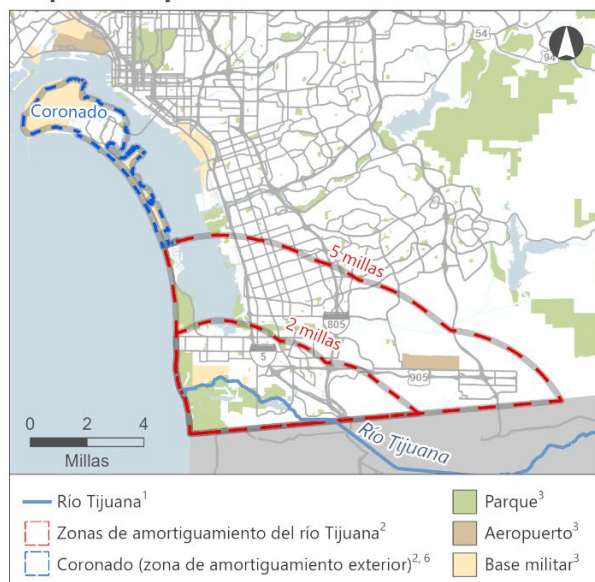
Aparte del inglés, el español es el idioma más hablado en el Condado de San Diego, dentro de un radio de dos millas del río Tijuana. Entre las personas que hablan inglés con un nivel inferior a "muy bien", aproximadamente el 89 % habla español. Otros idiomas destacados que se hablan en la zona son tagalo, chino, vietnamita, lenguas africanas y japonés [U.S. Census Bureau 2012].

Río Tijuana

Río Tijuana, Condado de San Diego, CA

SERIE DE MAPAS INTRODUCTORIOS
PERFIL GENERAL DEL SITIO
INSTALACIÓN EPA ID NA

Mapa de las proximidades del sitio



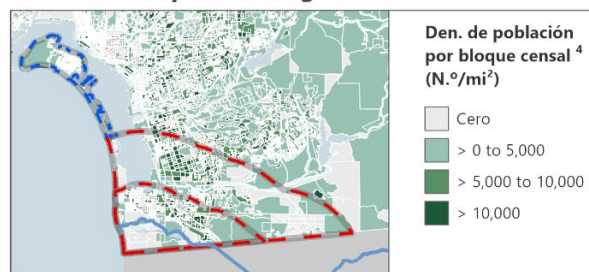
El mapa de perfil general del sitio muestra el sitio de interés, junto con cualquier uso del suelo relacionado con aeropuertos, industrias, instalaciones militares o parques. También proporciona estadísticas demográficas y de vivienda de la comunidad.

Estadísticas demográficas^{4,5}

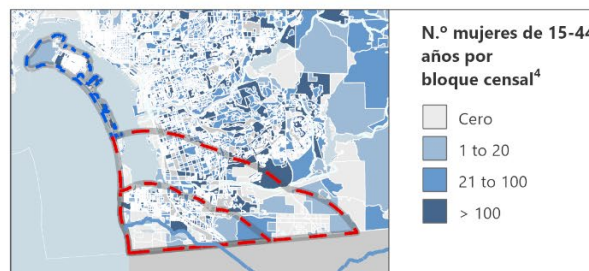
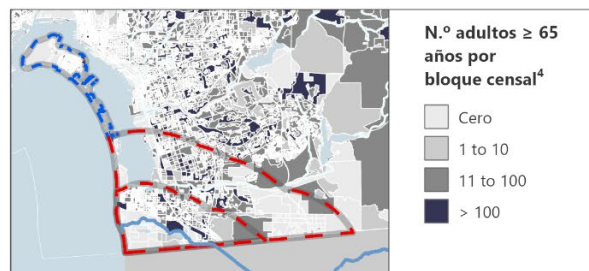
Dentro de las distancias de amortiguación especificadas y Coronado⁶

Medición	Amortiguamiento de 2 millas	Amortiguamiento de 5 millas	Coronado (amortiguamiento exterior)
Población total	104,781	228,975	18,288
Solo de raza blanca	27,125	55,925	13,912
Solo de raza negra	3,002	8,275	637
Indígenas de los EE. UU./nativos de Alaska	1,662	3,720	99
Solo asiáticos	6,592	18,818	548
Solo nativos de Hawái y de otras islas del Pacífico	373	1,052	46
Solo alguna otra raza	38,198	80,510	820
Dos o más razas	27,830	60,681	2,225
Hispanos o Latinos ⁶	78,161	166,813	3,029
Niños ≤ 6 años	8,500	18,589	1,090
Adultos ≥ 65 años	13,996	31,570	3,602
Mujeres de 15-44 años	22,410	48,622	3,226
Unidades de vivienda	32,494	70,352	8,525
Unidades de vivienda antes de 1950	1,365	2,981	2,187

Densidad de población general



Poblaciones sensibles



Fuentes de datos: ¹USGS, ²ATSDR GRASP, ³TomTom 2021Q3, ⁴Censo de los EE. UU. del 2020: Características demográficas y de vivienda., **Notas:** ⁵Calculado con el método de análisis espacial de proporción de áreas.

⁶Las personas que se identifican como hispanas o latinas pueden ser de cualquier raza. ⁷Porción del lugar designado por el censo de Coronado situada más allá de la zona de amortiguamiento de 5 millas. **Sistema de coordenadas:** El sistema de coordenadas usado para todos los paneles de mapas es NAD 1983 StatePlane California VI FIPS 0406 Feet



ATSDR Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades



Programa de Investigaciones, Análisis y Servicios Geoespaciales

PRJ ID 15765

FINAL - PARA DISTRIBUCIÓN PÚBLICA

9/2/2026

Figura 3: Información demográfica en un radio de 5 millas del sitio y Coronado

3.2. Preocupaciones de la comunidad

La ATSDR se propuso comprender las opiniones de la comunidad sobre la calidad del aire y los problemas de olores en el valle del río Tijuana a través de diversas fuentes. Usamos las encuestas CASPER de los CDC y ACE de la ATSDR, informes de noticias, videos documentales, comentarios en redes sociales y una visita al sitio realizada por personal de la ATSDR en el 2025. Tras la revisión y las conversaciones, los miembros de la comunidad de la zona sur del condado expresan su preocupación por los efectos del sulfuro de hidrógeno en la salud humana y animal, la calidad de vida y la economía local. En un programa de noticias local, un residente dijo: “Algunos días el olor es tan fuerte que provoca náuseas y dolor de cabeza” (NBC 7 San Diego, 00:53 – 00:57) [NBC 7 San Diego 2025].

La ATSDR señaló las siguientes preocupaciones de la comunidad:

- Olores desagradables y riesgos para la salud derivados de la mala calidad del aire causada por el sulfuro de hidrógeno y, posiblemente, otros contaminantes
- Síntomas físicos como irritación de los ojos, dolor de cabeza, náuseas, alergias y asma
- Las exposiciones propias de los niños y la decisión de cuándo cancelar actividades al aire libre, como el recreo o los entrenamientos deportivos organizados, o posponer eventos deportivos juveniles
- Menor disfrute o uso del hogar, los patios o las áreas de recreación al aire libre
- Cambios en los comportamientos en el hogar (mantener las ventanas cerradas, comprar y mantener equipos de purificación de aire)
- La salud de los animales, como los caballos alojados cerca del río y los perros
- Efectos negativos de los olores en los negocios locales y el turismo
- Frustración por el lento progreso en abordar los problemas de olores y sus causas de origen
- La calidad del agua potable y del agua de las playas

Las respuestas de la ATSDR a estas preocupaciones se detallan en la [Sección 5.4](#), Respuesta a las preocupaciones de la comunidad ([Tabla 14](#)).

3.3. Resumen de las encuestas e investigaciones de salud de los CDC y la ATSDR

Esta sección resume los resultados de las encuestas y evaluaciones de salud en el valle del río Tijuana realizadas por los CDC y la ATSDR en respuesta a solicitudes del Condado de San Diego, así como las llevadas a cabo por NIOSH en respuesta a una solicitud de la ciudad de Imperial Beach.

En junio del 2024, los Servicios de Salud Pública del Condado de San Diego solicitaron asistencia epidemiológica a los CDC y a la ATSDR para evaluar las inquietudes de la comunidad sobre la salud en relación con la crisis de aguas residuales en el valle del río Tijuana. En respuesta, los CDC y la ATSDR colaboraron con el condado para realizar dos encuestas de salud independientes.

- Los CDC llevaron a cabo una Evaluación Comunitaria para la Respuesta a Emergencias de Salud Pública (CASPER) entre el 17 y el 19 de octubre del 2024 [HHSA 2024c]. La evaluación analizó el estado de salud, las experiencias y las necesidades de los residentes de la región sur del Condado de San Diego, incluyendo información individual y estimaciones a nivel comunitario.
- Una investigación sobre la exposición a sustancias químicas (ACE) de la ATSDR, realizada entre el 21 de octubre y el 25 de noviembre del 2024 [HHSA 2024b], recolectó información sobre la exposición y la salud comunicada por los propios participantes. Se usó una encuesta en línea abierta a personas que viven, trabajan o visitan las comunidades de Imperial Beach, Nestor, San Ysidro, Otay Mesa West, Silver Strand y Coronado.

Además, en agosto del 2024, la ciudad de Imperial Beach solicitó una evaluación de riesgos para la salud (HHE) de NIOSH, la cual se completó en marzo del 2025 [Shi 2025]. La HHE analizó los peligros para los trabajadores de la ciudad de Imperial Beach en el valle del río Tijuana y en la playa, mediante la revisión de datos ambientales existentes y efectos en la salud, en combinación con entrevistas a los empleados.

3.3.1. Exposiciones acuáticas

Las tres evaluaciones (CASPER, ACE y HHE) analizaron la exposición al agua en diferentes poblaciones de la zona afectada.

3.3.1.1. CASPER

La encuesta CASPER estimó que el 8 % de los hogares tuvo contacto directo con agua del río Tijuana y el 16 % tuvo contacto con agua en Imperial Beach, Tijuana Slough o Silver Strand durante los cierres. Estas fueron las estimaciones de exposición más bajas, probablemente porque los residentes estaban conscientes de la contaminación y tomaron medidas para reducir el riesgo. Muchos hogares informaron haber reducido las visitas a la playa (66 %) y el tiempo que pasaban al aire libre (61 %). La encuesta CASPER indicó que el agua embotellada era la principal fuente de agua para beber en el 67 % de los hogares.

3.3.1.2. ACE

La encuesta ACE determinó que el 24 % de los encuestados tuvo contacto directo con agua contaminada de río o playa mientras estas permanecían oficialmente cerradas. También se evaluaron las actividades recreativas realizadas cerca de las zonas afectadas, y el 31 % de los encuestados reportaron realizar dichas actividades, lo que incluye natación (16 %), surf (7 %), recreación en botes (6 %) y pesca (5 %). De los 35 encuestados que eran empleados de la ciudad de Imperial Beach, el 43 % informó haber tenido contacto directo con agua de playa o río durante su jornada laboral en los últimos 30 días. En general, las estimaciones de exposición más elevadas en la ACE podrían reflejar el hecho de que la encuesta incluyó a personas no residentes, como trabajadores y visitantes, y usó una muestra de conveniencia. La encuesta ACE registró un alto consumo de agua embotellada (70 %) y filtrada (63 %) entre los encuestados cuando se encontraban en la zona afectada.

3.3.1.3. HHE

La evaluación HHE incluyó reuniones con representantes de los empleados, quienes informaron una exposición frecuente al agua durante el trabajo, especialmente entre el personal de seguridad marina (como salvavidas) y de obras públicas (como personal de mantenimiento). Se informó del uso inconstante de medidas de protección y prácticas de saneamiento tras la exposición.

3.3.2. Exposiciones al aire

La encuesta CASPER informó que un alto porcentaje (94 %) de los hogares percibió olor a aguas residuales durante el último mes, y la mayoría (69 %) señaló que el olor era más intenso al atardecer o por la noche. Entre los participantes de la encuesta ACE, el 95 % informó haber percibido olor a aguas residuales en los últimos 30 días, observándose una correlación entre la intensidad del olor y la frecuencia reportada.

3.3.3. Efectos en la salud

La encuesta CASPER informó que el 45 % de los hogares presentó al menos un síntoma de salud en el último mes. Los síntomas más frecuentes fueron dolor de cabeza (80 %), problemas gastrointestinales (76 %), tos (62 %), garganta seca o irritada (61 %) y mareos (51 %). El 70 % de los participantes de la encuesta ACE que tuvieron contacto directo con agua contaminada de ríos o playas notificaron síntomas. Los más comunes fueron dolor de cabeza (58 %), moqueo (54 %), irritación de los ojos (52 %), congestión (50 %), tos (50 %) y náuseas (46 %). Los síntomas fueron más frecuentes entre los participantes de la encuesta ACE expuestos directamente al agua e incluyeron también síntomas gastrointestinales y otros relacionados con la piel. Los trabajadores expuestos directamente al agua notificaron síntomas que incluían dolor de cabeza (73 %), moqueo o congestión nasal (80 %), irritación de los ojos (73 %), tos (80 %) y ardor en la nariz o la garganta (60 %). Los síntomas físicos notificados concordaron en las tres evaluaciones. Los síntomas, aunque generales, concuerdan con exposición a agua contaminada (bacterias, virus, metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes) y sulfuro de hidrógeno [EPA 2021b, HHSA 2024a, Szczesna, et al. 2023).

3.3.4. Salud mental

El 65 % de los participantes de la encuesta ACE informó haber presentado síntomas de salud mental que consideraban relacionados con la contaminación por aguas residuales; el 28 % de los encuestados reportó ansiedad y el 21 %, síntomas de depresión. En la encuesta CASPER, más de la mitad de los hogares reportaron un aumento del estrés (58 %), problemas para dormir (56 %) o signos de distrés emocional (63 %) debido a la contaminación por aguas residuales. Las estimaciones comunitarias de la encuesta CASPER indican que el 14 % de los residentes dieron positivo en la prueba de detección de depresión usando la escala PHQ-2 y el 12 % de los residentes dieron positivo en la prueba de detección de ansiedad usando la escala GAD-2. Además, la evaluación HHE determinó que el 60 % de los trabajadores con exposición directa al agua y el 30 % de los trabajadores sin exposición directa al agua informaron haber presentado síntomas de salud mental debido a la contaminación por aguas residuales. El número de hogares que indicaron haber cambiado sus rutinas diarias (35 %) probablemente contribuye al alto nivel de concientización en los hogares (85 %) y al aumento en los síntomas de salud mental.

3.3.5. Encuestas de salud: Conclusión

A pesar de que solo una pequeña proporción de la población ha tenido contacto directo con agua contaminada, la comunidad está presentando efectos tanto en la salud física como en la mental. Los síntomas físicos parecen ser leves, como lo muestra la baja tasa de búsqueda de atención médica tanto en la encuesta CASPER (18 % de los hogares) como en la ACE (21 % de los encuestados), pero aun así tienen un impacto significativo en la comunidad. Los participantes de la encuesta CASPER (70 % de los hogares con síntomas) consideraron que sus síntomas mejoraban al salir de la zona del valle del río Tijuana. La encuesta ACE mostró de manera constante una mayor prevalencia de síntomas físicos y mentales entre las personas expuestas a agua contaminada en los últimos 30 días. Los empleados entrevistados durante la evaluación HHE expresaron preocupaciones de un mayor riesgo debido a exposiciones relacionadas con el acceso irregular a equipos de protección personal (EPP), los limitados recursos de descontaminación y las prácticas de saneamiento inconstantes. La comunicación continua sobre las medidas de prevención, incluido el uso constante de EPP, podría reducir la exposición.

4. Datos de los muestreos

Esta sección describe los datos que usó la ATSDR para este informe. En este informe solo se evalúan las exposiciones a través del aire; por lo tanto, aquí nos centramos en los datos sobre el aire. Más adelante se publicará un informe independiente que evaluará otras vías de exposición.

4.1. Datos del aire exterior

A finales del 2024, la ATSDR comenzó a solicitar datos de los muestreos ambientales a colaboradores académicos, locales, estatales y federales. La ATSDR recibió respuestas del Distrito de Control de la Contaminación del Aire del Condado de San Diego (SDAPCD) y de investigadores de la Universidad de California en San Diego (UCSD), indicando que disponían de datos sobre el aire potencialmente relevantes. La ATSDR solicitó a ambas organizaciones datos sobre el aire que abarcaran hasta abril del 2025 para asegurarse de que la información cubriera la temporada de lluvias típica de la zona, que va de noviembre a marzo.

La ATSDR también recibió datos de los muestreos obtenidos mediante dispositivos electroquímicos por parte del Departamento de Salud Ambiental y Calidad del Condado de San Diego; sin embargo, estos datos no reunían la calidad suficiente para usarse en una evaluación de salud pública. Por lo general, los resultados de las pruebas de detección en el campo realizadas con estos dispositivos pueden tenerse en cuenta en el proceso de evaluación de salud pública (PHA), pero se requieren técnicas de muestreo más precisas para obtener los datos necesarios para sacar conclusiones sobre salud pública [ATSDR 2022].

A continuación, se ofrece información adicional sobre los conjuntos de datos sobre el aire que la ATSDR recibió del SDAPCD y de la UCSD.

4.1.1. Datos del SDAPCD del aire exterior:

El SDAPCD proporcionó datos recolectados entre el 25 de septiembre del 2023 y el 5 de mayo

del 2025, que consistían en lo siguiente:

- Datos con intervalos de 1 minuto provenientes del analizador de H₂S modelo T101 de fluorescencia UV (Teledyne API T101) para el monitoreo de sulfuro de hidrógeno
- Datos con intervalos de 15 minutos provenientes del equipo AQMesh para el monitoreo de sulfuro de hidrógeno (H₂S), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC)
- Datos meteorológicos recolectados en el Campo de Aterrizaje Secundario en Imperial Beach de la Marina de Guerra de Estados Unidos

4.1.1.1. Calidad de los datos y ubicaciones de monitoreo

El SDAPCD identificó problemas de calidad con los datos del equipo AQMesh al comparar los datos de monitoreo de AQMesh con los de sus monitores de aire Teledyne101. No se pudo calcular un factor de corrección para los monitores AQMesh que estaban midiendo el sulfuro de hidrógeno. Las comunicaciones posteriores con el SDAPCD indicaron que los datos de otros contaminantes que la ATSDR podía evaluar y que se midieron con el AQMesh no eran de suficiente calidad al analizarlos en una comparación informal entre sensores, por lo que SDAPCD aconsejó a la ATSDR no usar los datos del AQMesh como parte de la consulta.

Por lo tanto, la ATSDR excluyó de este análisis los datos de los monitores del AQMesh. Como resultado, los sitios de monitoreo del AQMesh excluidos de este análisis son el campamento del valle del río Tijuana (Tijuana River Valley Campground), la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales y el muelle de Imperial Beach. Los contaminantes excluidos de este análisis son CO, NO₂, SO₂, y TVOC. Por lo tanto, en esta consulta de salud solo se evalúan las exposiciones al sulfuro de hidrógeno.

Se determinó que los datos de monitoreo obtenidos por el SDAPCD con equipos TeledyneT101 tenían la calidad suficiente para este análisis. El SDAPCD comenzó a recolectar datos de monitoreo de sulfuro de hidrógeno con monitores Teledyne T101 en tres ubicaciones y en fechas distintas:

- Estación de bomberos #29 de San Diego, en San Ysidro: 17 de septiembre del 2024
- Escuela primaria Berry: 9 de octubre del 2024
- Centro Cívico de Imperial Beach: 24 de diciembre del 2024.

Las ubicaciones de monitoreo se muestran en la [Figura 4](#)

En ocasiones, los monitores presentaron errores operativos y las lecturas fueron señaladas por sesgo potencial. En la estación de bomberos #29 de San Diego, en San Ysidro, el instrumento presentó problemas de calibración el 12 de septiembre del 2024 y se recalibró el 16 de septiembre del 2024. El monitor Teledyne T101 de la escuela primaria Berry también generó datos señalados por problemas de calibración o ambientales. Todas las mediciones relacionadas con la calibración o que fueron señaladas por otro motivo fueron excluidas del conjunto de datos final. Dado que se eliminaron estas lecturas problemáticas, no se preveía

que los problemas afectaran la calidad de los datos válidos recolectados cuando el equipo funcionaba correctamente.

4.1.2. Datos del UCSD del aire exterior:

Los datos proporcionados por la UCSD se recolectaron entre el 1 de septiembre del 2024 y el 1 de mayo del 2025, y consistieron en lo siguiente:

- Datos de 1 minuto del equipo TeledyneT101 que monitoreaba el sulfuro de hidrógeno
- Datos meteorológicos recolectados mediante monitores de calidad del aire MODULAIR™ ubicados en el mismo lugar

4.1.2.1. Calidad de los datos y ubicaciones de monitoreo

Se determinó que los datos obtenidos por la UCSD con equipos Teledyne T101 tenían la calidad suficiente para este análisis. El sitio de monitoreo de la UCSD con equipos Teledyne T101 se encontraba en una propiedad privada en la avenida Leon. La ATSDR estima que este sitio de monitoreo está a tan solo unos 600 pies del sitio de monitoreo del SDAPCD en la escuela primaria Berry. Las ubicaciones de monitoreo se muestran en la [Figura 4](#).

4.1.3. Resumen de los datos disponibles del aire exterior

La [Tabla 2](#) resume las fuentes de datos usadas en esta evaluación y las ubicaciones de monitoreo. **Tabla 2: Fuentes de datos del aire exterior**

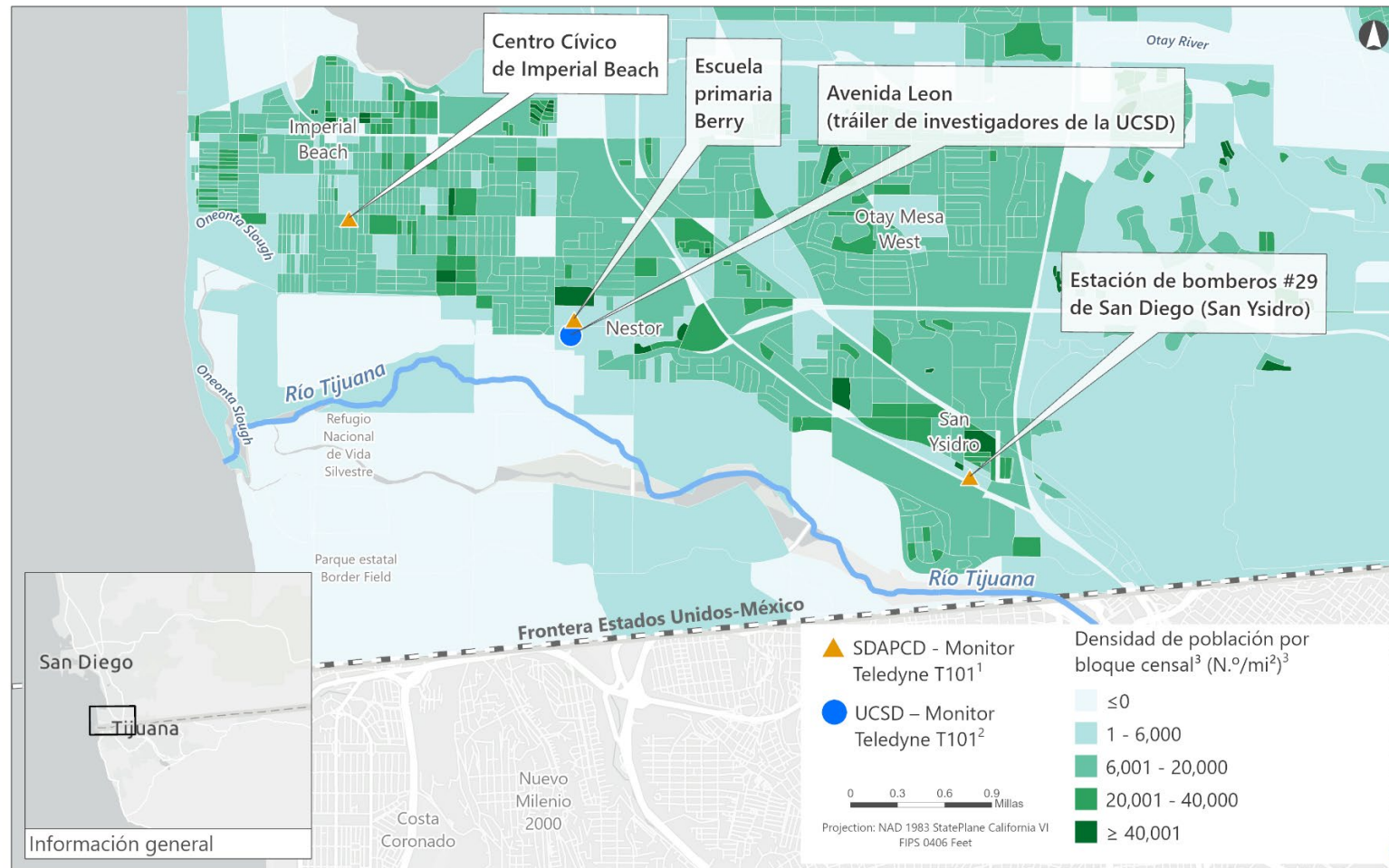
Ubicación	Fuente de datos	Monitor
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	SDAPCD	Teledyne T101
Escuela primaria Berry	SDAPCD	Teledyne T101
Avenida Leon (tráiler de investigadores de la UCSD en propiedad privada)	UCSD	Teledyne T101
Centro Cívico de Imperial Beach	SDAPCD	Teledyne T101

Abreviaturas: SDAPCD = Distrito de Control de Contaminación del Aire de San Diego;
UCSD = Universidad de California en San Diego

La [Figura 4](#) muestra las ubicaciones del equipo de monitoreo tanto del SDAPCD como de la UCSD. La [Figura 4](#) también muestra la densidad de población alrededor del valle del río Tijuana y la ubicación de los sitios de monitoreo en relación con las comunidades aledañas.

Sitios de monitoreo de sulfuro de hidrógeno en el aire

Valle del río Tijuana, Condado de San Diego



ATSDR

Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades
Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades



Programa de Investigaciones, Análisis y Servicios Geoespaciales

PRJ ID 13711
9/1/2026

FINAL - PARA DISTRIBUCIÓN PÚBLICA

FUENTE(S) DE DATOS: ¹SDAPCD (Distrito de Control de Contaminación del Aire del Condado de San Diego), ²UCSD (Universidad de California en San Diego), ³Características demográficas y de vivienda del Censo de los EE. UU. del 2020.

Figura 4: Ubicaciones de monitoreo del aire

En la [Tabla 3](#) se presentan las estadísticas resumidas de los datos sobre el aire que la ATSDR usó en esta evaluación. En resumen, la ATSDR usó datos recolectados entre septiembre del 2024 y mayo del 2025 en cuatro ubicaciones de monitoreo. La recolección de datos comenzó en septiembre del 2024 en la estación de bomberos #29 de San Diego y en los sitios de monitoreo de la avenida Leon, pero no se inició en la escuela primaria Berry ni en el Centro Cívico de Imperial Beach hasta octubre del 2024 y diciembre del 2024, respectivamente. Para este informe se analizaron entre 139 719 y 262 373 mediciones correspondientes a cada sitio de monitoreo.

Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el aire exterior fueron lo suficientemente bajas como para que el equipo no pudiera detectar su presencia entre el 4 % y el 30 % del tiempo, dependiendo de la ubicación de monitoreo. La mayor parte del tiempo, el equipo Teledyne T101 logró detectar sulfuro de hidrógeno en el aire exterior. El límite de detección del Teledyne T101 es de 0.4 ppb. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el aire exterior oscilaron desde niveles inferiores al límite de detección hasta 4513 ppb (4.513 partes por millón [ppm]). Aunque los datos del dispositivo de fotoionización (PID) del Departamento de Salud y Calidad Ambiental de San Diego no son adecuados para usar en este análisis, un dato del PID indica que los niveles de sulfuro de hidrógeno en el punto donde el río Tijuana pasa por debajo del bulevar Saturn ([Figura 2](#)) alcanzaron hasta 15 500 ppb (15.5 ppm) el 9 de septiembre del 2024.

Tabla 3: Estadísticas resumidas de las fuentes de datos del aire exterior

Ubicación	Periodo	Número de mediciones	No detecta	Rango de mediciones (ppb)
Estación de bomberos #29 (San Ysidro)	9/17/24–5/2/25	139,719	30 %	<0.4–80
Escuela primaria Berry	10/9/24–5/5/25	262,373	4 %	<0.4–1455
Avenida Leon (UCSD)	9/1/24–5/1/25	231,665	14 %	<0.4–4513
Centro Cívico de Imperial Beach	12/24/24–5/5/25	185,195	11 %	<0.4–384

Abreviación: ppb = partes por mil millones; UCSD = Universidad de California en San Diego

Los gráficos polares de la [Figura 5](#) muestran que los niveles de sulfuro de hidrógeno en los sitios de monitoreo de la escuela primaria Berry y la avenida Leon fueron más altos cuando las velocidades del viento eran bajas, independientemente de la dirección en que soplara el viento. Las concentraciones más altas aparecen en sombreado rojo, naranja y amarillo cerca del centro de los gráficos.

Este hallazgo parece indicar que hay una o varias fuentes de sulfuro de hidrógeno ubicadas cerca de estos dos sitios de monitoreo. Cuando el viento está en calma, el sulfuro de hidrógeno se acumula en los monitores. Cuando el viento es más fuerte, el sulfuro de hidrógeno se dispersa y las concentraciones disminuyen. Dado que se registran concentraciones elevadas con vientos suaves provenientes de todas las direcciones, y no solo de una dirección específica, es probable que la fuente se encuentre muy cerca de estas ubicaciones. Los otros dos sitios de monitoreo presentan patrones diferentes, lo que indica

que no están tan cerca de una fuente de sulfuro de hidrógeno.

4.1.4. Correlación de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno entre los sitios de monitoreo en la escuela primaria Berry y la avenida Leon

En septiembre del 2024, se detectaron las concentraciones más altas de sulfuro de hidrógeno en el sitio de monitoreo de la avenida Leon, sin embargo, el monitoreo aún no había comenzado al otro lado de la calle, en la escuela primaria Berry. El monitoreo del aire exterior en la escuela primaria Berry comenzó el 9 de octubre del 2024. Dado que los niños pasan muchas horas en la escuela y son una población sensible, la ATSDR consideró importante determinar cuáles pudieron haber sido los niveles de exposición en la escuela primaria Berry durante septiembre del 2024, ya que fue en ese periodo cuando se detectaron los niveles más altos de sulfuro de hidrógeno en el aire.

Para comprender mejor la exposición en la escuela primaria Berry antes de que comenzara el monitoreo en el sitio, la ATSDR evaluó el grado de correlación entre las concentraciones de sulfuro de hidrógeno registradas en la escuela y las de la avenida Leon durante los periodos en que se dispuso de datos de ambos sitios simultáneamente (Apéndice C). El análisis reveló que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en la avenida Leon y en la escuela primaria Berry presentaban, en general, una correlación significativa entre sí, con una diferencia estadísticamente pequeña de 0.69 ppb ([Tabla 18](#)). Al comparar diferentes periodos en los datos, todos mostraron una buena correspondencia visual entre sí. Hubo un periodo en el que las dos ubicaciones presentaron diferencias significativas, con una diferencia de 1.65 ppb. Estos resultados indican que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en ambas ubicaciones eran similares, aunque no siempre coincidían a la perfección.

4.2. Quejas por olores

El SDAPCD documenta las quejas de los residentes por olores en el área de South Bay [SDAPCD 2025c] a través de una aplicación, por teléfono o por correo electrónico. Los datos sobre quejas por olores que la ATSDR recibió del SDAPCD incluían el número de identificación del registro de la queja, la fecha de recepción, la ubicación y la naturaleza del olor que dio lugar a la queja. Se recibieron más de 1382 quejas por olores entre el 17 de septiembre del 2024 y el 5 de mayo del 2025, correspondientes a los códigos postales 91901, 91911, 91932, 92105, 92116, 92118, 92131 y 92154.

La mayoría de las quejas por olores ambientales, aunque no todas, estaban relacionadas con olores a sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana. La ATSDR excluyó del análisis aquellas quejas no relacionadas con olores a sulfuro de hidrógeno (total de quejas excluidas: 9). Cuando la persona que presentaba la queja no indicaba una ubicación específica, el SDAPCD asignaba una ubicación genérica a la queja. Muchas quejas presentaban ubicaciones genéricas, lo que impedía realizar un análisis espacial significativo basado en la ubicación específica de las mismas.

Para analizar las quejas por olores, la ATSDR calculó promedios móviles de dos días a partir de promedios de 24 horas de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno para cada

ubicación de monitoreo. La ATSDR seleccionó un periodo de dos días para tener en cuenta que algunas personas podrían no reportar hasta la mañana siguiente los olores fuertes percibidos durante la noche. La ATSDR comparó los promedios de sulfuro de hidrógeno de dos días con el número de quejas por olores por día y observó que las quejas parecían seguir una tendencia similar a la de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno. Los resultados se presentan en el Apéndice B, en la [Figura 8](#) (escuela primaria Berry), la [Figura 9](#) (avenida Leon), la [Figura 10](#) (Centro Cívico de Imperial Beach) y la [Figura 11](#) (estación de bomberos #29 de San Diego, en San Ysidro).

4.3. Caudal del río

La ATSDR llevó a cabo una evaluación limitada de cómo el caudal del río Tijuana afecta las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana. La ATSDR comparó las estimaciones del caudal promedio de una hora registrada en la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales con los promedios correspondientes de una hora de las lecturas de sulfuro de hidrógeno obtenidas en el sitio de monitoreo de la avenida Leon entre el 1 y el 22 de septiembre del 2024 ([Figura 12](#)).

Este fue un periodo en el que se detectaron concentraciones elevadas de sulfuro de hidrógeno. La ATSDR determinó que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno tendían a ser más altas cuando el caudal era más alto, lo cual concuerda con un informe previo que indicaba un aumento en las quejas por olores al incrementarse el caudal durante ese mismo periodo [Rico et al., 2025]. No se comprende del todo la relación completa entre el flujo del río, tanto en condiciones de tiempo seco como en condiciones de lluvia, y los niveles de sulfuro de hidrógeno.

5. Evaluaciones científicas

Tras examinar la información y los datos disponibles específicos del sitio, el siguiente paso de la ATSDR es

llevar a cabo una serie de pasos que incluyen:

- Evaluación de escenarios de exposición y vías de exposición potenciales específicos del sitio (Sección [5.1](#))
- Comparación de las concentraciones de contaminantes con los niveles de detección específicos para cada medio (Sección [5.2.2](#))
- Estimación de las concentraciones de exposición (Sección [5.2.3](#))
- Análisis de la información toxicológica de los contaminantes, si es necesario, para evaluar los riesgos potenciales para la salud (Sección [5.3](#))

Esta sección explica la evaluación científica realizada por la ATSDR sobre las exposiciones y los riesgos para la salud potenciales derivados de sustancias químicas presentes en el aire exterior del valle del río Tijuana. Esta consulta de salud aborda únicamente la exposición al sulfuro de hidrógeno en el aire. Otras vías de exposición (es decir, la exposición a sustancias químicas en el río Tijuana, suelos, sedimentos, etc.) se evaluarán en una evaluación de salud pública independiente que la ATSDR publicará más adelante.

5.1. Análisis de las vías de exposición

Para evaluar si un contaminante en el aire exterior afectará la salud humana, la ATSDR debe evaluar primero las vías de exposición del sitio. Una vía de exposición es el vínculo entre una liberación o fuente ambiental y el punto donde una población podría entrar en contacto con el contaminante ambiental [ATSDR 2025a].

La ATSDR determina si las vías de exposición son completas, potenciales o están eliminadas antes de evaluar si las exposiciones darán lugar a efectos dañinos para la salud. Para que las personas estén expuestas a un contaminante químico, deben entrar en contacto directo con dicho contaminante a través de una vía de exposición completa. Una vía de exposición completa consta de cinco partes principales:

1. Una **fuentes** de contaminación (como sustancias químicas en el río Tijuana)
2. Un medio de **transporte** ambiental (aire, agua, suelo, sedimentos, etc.) que permite que los contaminantes se desplacen desde la zona de origen hasta un punto donde entran en contacto con las personas
3. Un **punto de exposición** donde las personas entran en contacto físico con el contaminante
4. Una **ruta de exposición** (ingestión, inhalación o contacto con la piel), es decir, la forma en que un contaminante entra al cuerpo de las personas
5. Una **población en riesgo**, es decir, personas con probabilidades de entrar en contacto con el contaminante

Para las personas que viven, trabajan, realizan actividades recreativas, van a la escuela o pasan tiempo haciendo actividades en el valle del río Tijuana o sus alrededores, existe una vía de exposición completa al sulfuro de hidrógeno en el aire. Es decir, el sulfuro de hidrógeno está presente en el río Tijuana (fuente) y se libera de él, se desplaza a través del aire exterior (transporte) hacia áreas del valle del río Tijuana (punto de exposición) donde las personas (poblaciones en riesgo) lo inhalan (vía de exposición).

Aunque existe una vía de exposición completa, el contacto físico con un contaminante por sí solo no conlleva necesariamente efectos dañinos para la salud. La capacidad de un contaminante para afectar la salud de una persona depende de lo siguiente:

- La cantidad de contaminante a la que se expone la persona (dosis)
- Cuánto tiempo está expuesta la persona (duración)
- Qué tan seguido se expone la persona (frecuencia)
- La toxicidad del contaminante (cómo interactúan los contaminantes con el cuerpo para hacer que se enfermen)

5.2. Evaluación del aire exterior

Esta sección describe cómo la ATSDR evalúa las sustancias químicas inicialmente, o hace pruebas de detección, para determinar si la exposición a una de ellas requiere una evaluación más detallada. Los análisis estadísticos del sulfuro de hidrógeno en el aire exterior a lo largo del tiempo en cada sitio de monitoreo se realizaron en R versión 4.5.0, usando el paquete *Openair* [R 2025].

5.2.1. Información general

Una vez determinado que existe una vía de exposición completa y que hay datos de calidad y representatividad suficientes para realizar una evaluación, la evaluación de salud humana se lleva a cabo en dos etapas:

- Paso 1, **análisis de detección**: Las concentraciones máximas de los contaminantes se comparan con los valores de detección para determinar qué contaminantes superan los niveles de comparación basados en la salud y requieren una evaluación adicional.
- Paso 2, **evaluación de las implicaciones para la salud**: Se llevan a cabo evaluaciones detalladas de cualquier contaminante que supere los valores de detección.

5.2.2. Análisis de detección

5.2.2.1. *Información general sobre los valores de comparación (CV) y los niveles de riesgo mínimo (MRL)*

Para realizar un análisis de detección, la ATSDR compara las concentraciones máximas de las sustancias químicas detectadas con los valores de detección. Como valores de detección, la ATSDR usa sus valores de comparación (CV) específicos para cada sustancia química y medio. Los valores de comparación (CV) de la ATSDR son siempre concentraciones químicas en un medio específico —como el agua, el suelo o el aire— que no es probable que causen efectos dañinos para la salud en las personas expuestas. Que la concentración de un contaminante iguale o supere un CV no significa que se vayan a producir efectos dañinos para la salud, sino que es necesario realizar una evaluación más detallada. No se prevé que los contaminantes cuyas concentraciones detectadas sean inferiores a los CV causen efectos dañinos para la salud, por lo que no requieren un análisis adicional.

La ATSDR crea valores independientes, llamados valores orientativos de salud o niveles de riesgo mínimo (MRL, por sus siglas en inglés), que generalmente se expresan como dosis (la cantidad que entra al cuerpo). Los MRL estiman el nivel de exposición diaria que probablemente no cause efectos adversos para la salud (no carcinógenos) y no representan niveles de acción regulatoria [ATSDR 2024c]. **Para la inhalación, los CV de la ATSDR son los mismos que los MRL y representan concentraciones en el aire.**

5.2.2.2. *CV y MRL para el sulfuro de hidrógeno en el aire*

Para la exposición al sulfuro de hidrógeno en el aire, se dispone de dos tipos de valores de comparación (CV):

- Pautas de evaluación de medios ambientales de la ATSDR (EMEG) para inhalación
 - Estiman las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el aire que las personas podrían respirar sin presentar efectos dañinos no cancerígenos para duraciones de exposición **agudas** (1-14 días) o **intermedias** (15-364 días).
 - Son iguales a los correspondientes niveles de riesgo mínimo (MRL) de sulfuro de hidrógeno para exposiciones agudas e intermedias.
- Pautas de evaluación de medios por dosis de referencia de la ATSDR (RMEG) para

inhalación.

- Representan una concentración de sulfuro de hidrógeno en el aire a la cual es poco probable que la exposición diaria **crónica** (365 días o más) provoque efectos en la salud no cancerígenos.
- Es igual a la concentración de referencia (RfC) correspondiente de la EPA. Las RfC de la EPA son estimaciones de las concentraciones de contaminantes a las que cualquier persona podría estar expuesta durante toda la vida sin presentar efectos en la salud [EPA 2024].

El MRL agudo de inhalación de la ATSDR y, por consiguiente, el CV agudo, es de 70 ppb. El MRL de inhalación de duración intermedia de la ATSDR y, por consiguiente, su CV intermedio para el aire, y la RfC crónica de la EPA se derivan del mismo estudio realizado por Brenneman et al. 2000. En ese estudio, se identificó 460 ppb como la concentración más baja ajustada y equivalente para humanos que no causaba efectos en la salud, y se usó para derivar tanto el MRL como la RfC. La ATSDR aplicó un factor de incertidumbre de 30 para establecer su MRL a fin de tener en cuenta la extrapolación de animales a seres humanos, con ajuste dosimétrico, y la variabilidad entre los seres humanos. Por lo tanto, el MRL de inhalación de duración intermedia de la ATSDR es de 20 ppb ($460 \text{ ppb} \div 30 = 15 \text{ ppb}$; redondeado a una cifra significativa = 20 ppb). La EPA aplicó un factor de incertidumbre de 300, añadiendo un factor adicional de 10 para tener en cuenta que se trataba de un estudio subcrónico (p. ej., de 10 semanas) en lugar de un estudio crónico completo. Inicialmente, la EPA realizó sus cálculos en mg/m^3 , lo que dio como resultado una RfC de $0.002 \text{ mg}/\text{m}^3$ (1.4 ppb).

5.2.2.3. *Realización de un análisis de detección*

Para un análisis de detección, la ATSDR compara la concentración máxima medida de cada contaminante con el CV apropiado para ese contaminante (en este caso, los CV de sulfuro de hidrógeno en el aire). Esta consulta de salud evalúa únicamente el sulfuro de hidrógeno (ver Sección [4.1.1.1](#)). Dado que no se ha demostrado que el sulfuro de hidrógeno cause cáncer en los seres humanos [ATSDR 2016], no se llevó a cabo ninguna evaluación ni prueba de detección de riesgo de cáncer.

En esta sección se analiza la comparación realizada por la ATSDR entre las concentraciones máximas de sulfuro de hidrógeno en el aire registradas en los sitios de monitoreo y los valores de comparación (CV) de la ATSDR para el sulfuro de hidrógeno en el aire. Para justificar una evaluación adicional, basta con que un contaminante alcance o supere el CV más bajo, pero en la [Tabla 4](#) se presentan para su comparación todos los CV disponibles para el sulfuro de hidrógeno en el aire.

Tabla 4: Resultados de las pruebas de detección de sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación	Concentración máxima de sulfuro de hidrógeno (ppb)*,**	Aguda según las EMEG (ppb)	Intermedia según las EMEG (ppb)	Crónica según las RMEG (ppb)
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	80	70	20	1.4
Escuela primaria Berry	1,455	70	20	1.4
Avenida Leon	4,513	70	20	1.4
Centro Cívico de Imperial Beach	384	70	20	1.4

Abreviaturas: ppb = partes por mil millones; EMEG = pautas de evaluación de medios ambientales; RMEG = pautas de evaluación de medios por dosis de referencia

†**Texto en negrita** = se superó el CV

Aguda según las EMEG = nivel de riesgo mínimo (MRL) agudo de la ATSDR; Intermedia según las EMEG = MRL intermedio de la ATSDR; Crónica según las RMEG = concentración de referencia (RfC) de la EPA

*Para esta comparación se usan las lecturas de sulfuro de hidrógeno máximas de un minuto

**Los niveles de fondo de sulfuro de hidrógeno en áreas urbanas de los Estados Unidos varían entre 0 y 1 ppb [ATSDR 2016].

Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el aire superaron todos los CV de la ATSDR para esta sustancia química en todos los sitios de monitoreo. Por consiguiente, la exposición al sulfuro de hidrógeno en el aire requería una evaluación más detallada, la cual se analiza en las secciones siguientes. La [Figura 6](#) muestra las concentraciones diarias promedio de sulfuro de hidrógeno en comparación con los niveles de detección agudos, intermedios y crónicos. De manera similar, la [Figura 7](#) muestra los promedios de 30 minutos para las cuatro ubicaciones en comparación con los niveles de detección.

5.2.3. Concentraciones en el punto de exposición

Las sustancias químicas que superan los CV se evalúan más a fondo mediante el cálculo de las concentraciones en el punto de exposición (EPC, por sus siglas en inglés). Una EPC es una estimación conservadora de la concentración de una sustancia química, por lo general un valor máximo o del límite superior de confianza del 95 % de la media aritmética (95UCL). Representa la cantidad de una sustancia química con la que una persona podría entrar en contacto durante un determinado periodo de tiempo, para cada área y ruta de exposición. La EPC puede ajustarse para tener en cuenta la duración, la frecuencia y el momento de la exposición, basándose en las acciones y los hábitos de la población expuesta. Posteriormente, las EPC ajustadas se comparan con los valores orientativos de salud (p. ej., MRL o RfC) específicos para cada contaminante y la duración de la exposición para determinar si existe algún riesgo para la salud.

Para los datos de monitoreo del aire, la ATSDR calcula estadísticas descriptivas para usarlas como EPC. Dado que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el aire (y, por ende, las EPC) pueden compararse directamente con las concentraciones de sulfuro de hidrógeno

usadas en estudios científicos, la ATSDR no necesitó calcular también las dosis de exposición para este análisis. Más adelante en el proceso de la ATSDR, las EPC se comparan con las concentraciones químicas usadas en estudios científicos para determinar si es probable que se produzca un efecto en la salud (Sección [5.3](#)).

Para completar el análisis de las EPC, la ATSDR calculó las EPC de sulfuro de hidrógeno en cada ubicación de monitoreo y la duración de cada exposición (es decir, exposiciones agudas, intermedias y crónicas). Las EPC se describen en las Secciones [5.2.3.1-5.2.3.3](#).

5.2.3.1. EPC para exposición aguda

El MRL y el CV (70 ppb) para la inhalación aguda de sulfuro de hidrógeno se basaron en un estudio en el que se expuso a adultos a 2000 ppb de sulfuro de hidrógeno durante 30 minutos [ATSDR 2016, Jäppinen et al.]. 1990]. Para ofrecer la mejor comparación con el estudio de Jäppinen et al., la ATSDR calculó promedios móviles de 30 minutos de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno medidas en el aire. Dado que era posible calcular un promedio real a partir de los datos de medición en el aire, no fue necesario calcular el 95UCL de la EPC. Por consiguiente, se usó el promedio móvil máximo de 30 minutos de cada ubicación como la EPC.

Los promedios móviles suavizan los datos al calcular promedios a lo largo de una ventana de tiempo móvil. Para crear promedios móviles de 30 minutos a partir de las mediciones del aire tomadas cada minuto, la ATSDR comenzó promediando los primeros 30 minutos de datos (minutos 1-30). Luego, la ATSDR avanzó un minuto para promediar los minutos 2-31, después avanzó otro minuto para promediar los minutos 3-32, y repitió este proceso de forma continua hasta llegar al final de los datos. Los promedios móviles son útiles porque ayudan a las personas a ver las tendencias al reducir las fluctuaciones de un momento a otro en los datos. En lugar de ver cada pico y valle, las personas ven el patrón general a lo largo del tiempo, lo que facilita identificar cuándo los niveles estuvieron generalmente altos o bajos a lo largo del día. Para el análisis, los valores no detectados fueron remplazados por el límite de detección de cada medición.

Aunque el 5.2 % de los promedios de 30 minutos superó el MRL en la estación de monitoreo de la avenida Leon, solo el 0.04 % de los promedios de 30 minutos superó los 2000 ppb, que fue el nivel que mostró causar efectos en la salud en el estudio de Jäppinen et al. de 1990. Los promedios móviles de 30 minutos superaron el MRL en el Centro Cívico de Imperial Beach y en la escuela primaria Berry el 0.4 % y el 2.0 % del tiempo, respectivamente. El nivel con efectos para la salud (2000 ppb) se superó en la avenida Leon únicamente durante periodos de tiempo entre el 8 y el 10 de septiembre del 2024.

Tabla 5: EPC agudas

Ubicación	Promedio móvil máximo de 30 minutos (ppb)*	Porcentaje de promedios móviles de 30 minutos que superaron el MRL agudo **, nivel con efectos para la salud†
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	48.2	0 %, 0 %
Escuela primaria Berry	749.2	2.0 %, 0 %
Avenida Leon	3021.5	5.2 %, 0.04 %
Centro Cívico de Imperial Beach	333.0	0.4 %, 0 %

Abreviaturas: EPC = concentraciones en el punto de exposición; ppb = partes por mil millones; MRL = nivel de riesgo mínimo

*Esta es la EPC para cada ubicación

**El MRL agudo es de 70 ppb

†El nivel con efectos para la salud de efectos agudos es de 2000 ppb [ATSDR 2016], [Jäppinen et al. 1990]

Tal como la ATSDR pudo captar durante la visita al sitio y según indican los resultados de la encuesta ACE, los olores a sulfuro de hidrógeno pueden percibirse con mayor intensidad durante la noche. Para profundizar en este aspecto, la ATSDR comparó las EPC agudas registradas durante el día y la noche (Apéndice B, [Tabla 15](#) y [Figura 13](#)). A excepción de la estación de bomberos #29 de San Diego, el promedio móvil de 30 minutos más alto en todos los sitios se registró durante la noche. Esta diferencia entre las EPC diurnas y nocturnas fue más pronunciada en el Centro Cívico de Imperial Beach, donde la EPC nocturna (333 ppb) fue casi seis veces mayor que la diurna (54 ppb). En la escuela primaria Berry, la EPC nocturna (749 ppb) duplicó a la diurna (318 ppb). La EPC nocturna también fue más elevada en la ubicación de monitoreo de la avenida Leon. La explicación más probable es que, durante la noche, el aire no se mezcla hacia arriba tanto como durante el día. Como resultado, las concentraciones de sustancias químicas como el sulfuro de hidrógeno pueden acumularse en mayor medida durante las horas nocturnas. Otras razones podrían ser las diferencias diurnas y nocturnas en los patrones de flujo, los niveles de aguas residuales, los patrones del viento y cualquier combinación de estos factores.

5.2.3.2. *EPC intermedias*

El estudio del MRL intermedio, que también sirve de base para la RfC crónica de la EPA usada en el análisis crónico de este informe, expuso a ratas a sulfuro de hidrógeno de forma intermitente durante 10 semanas, y los datos se ajustaron para una exposición continua de 24 horas [ATSDR 2016; Brenneman et al., 2000]. Para reflejar las condiciones de exposición en el valle del río Tijuana, que podrían incluir exposiciones de 24 horas durante los 7 días de la semana, la ATSDR calculó promedios móviles de 14 días. Las exposiciones de duración intermedia suelen oscilar entre 15 y 364 días, por lo tanto, el promedio móvil de 14 días (que

representa un periodo completo de 14 días de exposición) es un enfoque más conservador para estimar esas exposiciones. Además, dado que fue posible calcular un promedio bien definido, no fue necesario calcular un 95UCL para la EPC. El promedio móvil máximo de 14 días para cada ubicación se usó como la EPC de cada ubicación ([Tabla 6](#)).

El MRL de la ATSDR para exposición intermedia por inhalación de aire es de 20 ppb. Aproximadamente el 13 % de los promedios de 14 días en la avenida Leon superó el MRL intermedio de sulfuro de hidrógeno, y aproximadamente el 9 % de los promedios de 14 días en la escuela primaria Berry superó el MRL intermedio (Apéndice B, [Figura 14](#)). Las concentraciones promedio de 14 días en las otras dos ubicaciones no superaron el MRL. El MRL de la ATSDR se deriva del nivel más bajo de sulfuro de hidrógeno ajustado equivalente para humanos (460 ppb) que no causó efectos en la salud en el estudio de Brenneman et al. del 2000. Los promedios móviles de 14 días no superaron este nivel (460 ppb) en ninguna de las ubicaciones de monitoreo.

Tabla 6: EPC intermedias

Ubicación	Promedio móvil máximo de 14 días (ppb)*	Porcentaje de promedios móviles de 14 días que superaron el MRL **, nivel con efectos para la salud†
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	3.3	0 %, 0 %
Escuela primaria Berry	31.6	8.9 %, 0 %
Avenida Leon	151.9	12.7 %, 0 %
Centro Cívico de Imperial Beach	7.6	0 %, 0 %

Abreviaturas: EPC = concentraciones en el punto de exposición; ppb = partes por mil millones; MRL = nivel de riesgo mínimo

*Esta es la EPC para cada ubicación

**El MRL intermedio es de 20 ppb

†El nivel con efectos en la salud de efectos intermedios es de 1380 ppb

5.2.3.3. EPC crónicas

La ATSDR usó todos los datos de ocho meses (o menos, según la ubicación) de monitoreo del aire para estimar las exposiciones crónicas. De acuerdo con las directrices de la ATSDR, es apropiado calcular un 95UCL para estimar las exposiciones crónicas [ATSDR 2023]. Sin embargo, los datos de monitoreo del aire del valle del río Tijuana presentaban una autocorrelación significativa, lo que indicaba que los datos no eran independientes. Para abordar la dependencia de los datos, los valores de 95UCL se ajustaron usando el tamaño efectivo de la muestra (ESS, por sus siglas en inglés). El uso del ESS permite calcular un 95UCL para datos autocorrelacionados como si provinieran de una muestra aleatoria. El ESS se calculó a partir de los datos sin procesar de 1 minuto para estimar el 95UCL del periodo de muestreo. Las EPC para cada una de las cuatro ubicaciones se presentan en la [Tabla 7](#).

El mismo estudio que la ATSDR usó para establecer el MRL de inhalación de duración intermedia (Brenneman et al., 2000) fue usado por la EPA para establecer la RfC crónica (1.4 ppb). Se superó la RfC en las cuatro ubicaciones de monitoreo, pero todas las EPC crónicas fueron muy inferiores al nivel más bajo de sulfuro de hidrógeno ajustado a equivalente para humanos (460 ppb) que no causó efectos adversos para la salud en el estudio de Brenneman et al. del 2000. La ATSDR analiza las limitaciones de la base de datos sobre exposiciones crónicas en la Sección [5.3.6.4.](#)

Tabla 7: EPC crónicas

Ubicación	95UCL (ppb)*
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	2.8
Escuela primaria Berry	9.2
Avenida Leon	23.6
Centro Cívico de Imperial Beach	4.0

Abreviaturas: EPC = concentraciones en el punto de exposición; 95UCL = límite superior de confianza del 95 % de la media aritmética; ppb = partes por mil millones

*Esta es la EPC crónica para cada ubicación

5.3. Evaluación de los efectos en la salud

Esta sección describe cómo la ATSDR comparó la EPC de cada una de las cuatro ubicaciones con los valores de las directrices de salud pública y cómo interpreta los resultados.

5.3.1. Antecedentes sobre el sulfuro de hidrógeno y sus efectos en la salud¹

El sulfuro de hidrógeno es un gas inflamable sin color, que huele a huevos podridos. Las personas por lo general pueden oler el sulfuro de hidrógeno a bajas concentraciones en el aire, que oscilan entre 0.5 a 300 ppb de sulfuro de hidrógeno. En concentraciones altas, una persona podría perder la capacidad de percibir su olor. Esto es importante porque la persona podría creer erróneamente que el sulfuro de hidrógeno ya no está presente y aumentar su riesgo de exponerse a niveles en el aire que podrían causar efectos graves para la salud.

El sulfuro de hidrógeno se origina tanto de forma natural como a través de procesos creados por el ser humano. Se encuentra en los gases emitidos por volcanes, manantiales de azufre, respiraderos submarinos, pantanos y masas de agua estancada, así como en el petróleo crudo y el gas natural. El sulfuro de hidrógeno también está asociado a los sistemas de alcantarillado municipal y a las plantas de tratamiento de aguas residuales, a las instalaciones de confinamiento y manejo de estiércol porcino, y a las plantas de producción de celulosa y papel. Otras fuentes industriales de sulfuro de hidrógeno incluyen refinerías de petróleo, plantas de gas natural, plantas petroquímicas, plantas de hornos de coque, plantas de

¹ Esta información incluida en la sección 5.3.1 está disponible en la declaración de salud pública sobre el perfil toxicológico del sulfuro de hidrógeno y el sulfuro de carbonilo y se puede consultar aquí <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp114-c1.pdf>.

procesamiento de alimentos y curtidurías. Las bacterias de la boca y del tubo digestivo de las personas producen sulfuro de hidrógeno durante la digestión de alimentos que contienen proteínas vegetales o animales.

La mayor parte del sulfuro de hidrógeno liberado al aire proviene de fuentes naturales, tales como pantanos, marismas y volcanes. Cualquiera de las fuentes industriales mencionadas anteriormente también puede liberar sulfuro de hidrógeno. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el aire provenientes de fuentes naturales oscilan entre 0.11 y 0.33 ppb. En las zonas urbanas, las concentraciones en el aire suelen ser inferiores a 1 ppb. El sulfuro de hidrógeno permanece en la atmósfera durante aproximadamente 1 a 42 días, dependiendo de la estación del año. Puede transformarse en dióxido de azufre y sulfatos en el aire.

El sulfuro de hidrógeno puede liberarse al agua a través de los residuos líquidos de una instalación industrial o como resultado de un fenómeno natural. Puede estar presente de forma natural en el agua de pozo. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en las aguas superficiales suelen ser muy bajas, ya que se evapora fácilmente del agua oxigenada. También puede estar presente en las aguas subterráneas. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en las aguas subterráneas son generalmente inferiores a 1 ppm; sin embargo, las concentraciones de azufre medidas en aguas superficiales y residuales han oscilado entre poco menos de 1 y 5 ppm. El sulfuro de hidrógeno puede llegar al suelo mediante deposición atmosférica o a causa de derrames. En el suelo, el sulfuro de hidrógeno es consumido por bacterias que lo transforman en azufre.

El sulfuro de hidrógeno entra al cuerpo principalmente a través del aire que se respira. Cantidades mucho menores pueden entrar al cuerpo a través de la piel. Dado que el sulfuro de hidrógeno es un gas, es poco probable que la exposición se produzca por ingestión. Al respirar aire que contiene sulfuro de hidrógeno o cuando el sulfuro de hidrógeno entra en contacto con la piel, este se absorbe en el torrente sanguíneo y se distribuye por todo el cuerpo. En el cuerpo, el sulfuro de hidrógeno se convierte principalmente en sulfato y es excretado en la orina. El sulfuro de hidrógeno se elimina rápidamente del cuerpo.

Es poco probable que una persona presente efectos en la salud si se expone a las concentraciones ambientales habituales de sulfuro de hidrógeno. Una persona puede presentar efectos respiratorios y neurológicos si se expone a concentraciones más elevadas de sulfuro de hidrógeno. Los efectos pueden incluir:

- Irritación de los ojos
- Irritación en la nariz
- Irritación de la garganta
- Dificultad para respirar en personas con asma
- Dolores de cabeza
- Mala memoria
- Cansancio
- Problemas de equilibrio

Si una persona se expone a concentraciones muy elevadas de sulfuro de hidrógeno, podría presentar problemas respiratorios graves, incluso si no tiene ninguna condición médica respiratoria preexistente. Una persona podría perder el conocimiento si se expone brevemente a concentraciones muy altas (más de un millón de veces superiores a la cantidad que se encuentra habitualmente en el medioambiente). Si esto sucede, es posible que recupere el conocimiento sin presentar otros efectos. Sin embargo, algunas personas pueden presentar efectos más duraderos, como dolores de cabeza, poca capacidad de concentración, mala memoria y función motora deficiente.

5.3.2. Información general del proceso de evaluación de los efectos en la salud

La probabilidad de que se produzcan efectos en la salud no cancerígenos puede evaluarse calculando los cocientes de peligro (HQ, por sus siglas en inglés) para contaminantes individuales. Un cociente de peligro es la relación entre la EPC y un valor orientativo de salud para que se produzcan efectos no cancerígenos, como un MRL o una RfC por inhalación. Si el HQ es inferior a uno, no se prevé que la exposición al contaminante cause efectos adversos para la salud no cancerígenos. Si el HQ es igual o superior a uno, se justifica realizar una evaluación toxicológica más detallada mediante la revisión de los estudios críticos y de respaldo usados para establecer el valor orientativo de salud.

La ATSDR también realiza cálculos del margen de exposición (MOE) para evaluar más a fondo los efectos de la exposición al sulfuro de hidrógeno. Hacer estos análisis permite a la ATSDR sacar conclusiones sobre el potencial de que se produzcan efectos dañinos para la salud debido a la exposición a la sustancia química.

En esta sección, la ATSDR usa las EPC de sulfuro de hidrógeno calculadas para exposiciones agudas, intermedias y crónicas, y así calcular los cocientes de peligro. Para los escenarios de exposición con un HQ igual o superior a 1, la ATSDR analiza las implicaciones potenciales para la salud.

5.3.3. Estimaciones del riesgo de cáncer

No se ha demostrado que el sulfuro de hidrógeno cause cáncer en seres humanos y actualmente no está clasificado como carcinógeno [ATSDR 2016]. La EPA, en su evaluación más reciente sobre el cáncer, determinó que los datos disponibles son insuficientes para evaluar el potencial carcinogénico del sulfuro de hidrógeno [EPA 2003a, EPA 2003b]. Ni el Programa Nacional de Toxicología (NTP) ni la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), han clasificado la carcinogenicidad del sulfuro de hidrógeno. Por lo tanto, no se calcularon estimaciones del riesgo de cáncer en esta evaluación.

5.3.4. Evaluación de los riesgos para la salud no cancerosos derivados de exposiciones agudas

Esta sección describe cómo la ATSDR evaluó cuantitativamente los riesgos para la salud no cancerígenos de las exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire en el Valle del Río Tijuana y qué efectos en la salud podrían resultar de dichas exposiciones.

5.3.4.1. *Cocientes de peligro: exposición aguda*

La [Tabla 8](#) compara la EPC aguda (promedio móvil máximo de 30 minutos de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno) con el MRL agudo según la ubicación y presenta los HQ calculados. Los HQ superaron el valor de 1 en la escuela primaria Berry (HQ = 11), la avenida Leon (HQ = 43) y el Centro Cívico de Imperial Beach (HQ = 4.7). En estas tres ubicaciones, los promedios móviles de 30 minutos superaron el MRL entre el 0.4 % y el 5.2 % del tiempo. Dado que el HQ fue superior a uno en estas tres ubicaciones, se justifica evaluar en mayor detalle las exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire. El HQ no superó el valor de uno en la estación de bomberos de San Diego (# 29, San Ysidro).

Tabla 8: Cocientes de peligro: exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación	EPC (ppb)*	MRL agudo (ppb)	% de promedios móviles de 30 minutos que superan el MRL agudo	HQ agudo**
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	48.2	70	0 %	0.69
Escuela primaria Berry	749.2	70	2 %	11[†]
Avenida Leon	3021.5	70	5.2 %	43[†]
Centro Cívico de Imperial Beach	333.0	70	0.4 %	4.7[†]

Abreviaturas: EPC = concentración en el punto de exposición; ppb = partes por mil millones; MRL = nivel de riesgo mínimo; HQ = cociente de peligro

†Texto en negrita = HQ superior a 1

*EPC calculado como el promedio máximo de 30 minutos

**HQ = EPC/MRL

5.3.4.2. *Márgenes de exposición: exposiciones agudas*

Un HQ superior a 1 indica que se exceden los valores orientativos de salud para efectos no cancerígenos y que se requiere evaluación adicional. Cuando los HQ son mayores que 1, la ATSDR realiza un segundo análisis complementario que compara numéricamente la concentración específica del sitio con la concentración de efecto sobre la salud del estudio original que sirvió de base para el MRL [ATSDR 2025b]. Esta comparación se realiza dividiendo el nivel mínimo con efecto adverso observado (LOAEL) del estudio crítico entre las concentraciones de exposición específicas del sitio. El valor obtenido se llama margen de exposición (MOE). El LOAEL usado como base para el MRL agudo de inhalación se describe con mayor detalle en la sección 5.3.4.3.

Un MOE igual o inferior a 1 indica que la concentración específica del sitio es igual o superior al nivel del estudio sobre efectos en la salud, lo que probablemente indique la posibilidad de efectos dañinos. Un valor superior a 1 significa que la concentración específica del sitio es inferior al nivel del estudio sobre efectos en la salud. Los MOE para exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire en los cuatro sitios se presentan en la [Tabla 9](#).

Tabla 9: Márgenes de exposición: exposiciones agudas al sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación	LOAEL* (ppb)	EPC (ppb)	MOE**
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	2000	48.2	41.5
Escuela primaria Berry	2000	749.2	2.7
Avenida Leon	2000	3021.5	0.7†
Centro Cívico de Imperial Beach	2000	333.0	6.0

Abreviaturas: LOAEL = nivel mínimo con efecto adverso observado; ppb = partes por mil millones; EPC = concentración en el punto de exposición; MOE = margen de exposición

†**Texto en negrita** = MOE igual o menor que 1

*[ATSDR 2016], [Jäppinen, et al. 1990]; **MOE = LOAEL/EPC

De los cuatro sitios, el MOE fue inferior a 1 únicamente en la ubicación de la avenida Leon (MOE = 0.7). Sin embargo, el MOE para la ubicación de la escuela primaria Berry fue de 2.7, lo que indica que la concentración específica del sitio se está acercando al nivel de efecto. Con base en estos hallazgos, es probable que las exposiciones en la avenida Leon, y potencialmente en la escuela primaria Berry, puedan dar lugar a efectos en la salud similares a los observados en el estudio utilizado para establecer el MRL agudo de la ATSDR, el cual se analiza en la siguiente sección.

Cabe destacar que la ATSDR no dispone de datos de todos los lugares ni de todos los momentos en que se produjeron exposiciones a sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana, por lo que es posible que se hayan producido exposiciones de preocupación en otras ubicaciones o momentos no monitoreados. Por ejemplo, el monitoreo en la escuela primaria Berry comenzó después de que se registraran los niveles más altos de sulfuro de hidrógeno en la avenida Leon. Aunque la ATSDR no puede cuantificar las exposiciones en la escuela primaria Berry previas al inicio del monitoreo en dicho centro, analizó si había una correlación entre estos dos sitios (Sección [4.1.4](#) y Apéndice C). Los resultados de las pruebas de correlación indicaron que existe una correlación significativa entre ambos sitios, lo que significa que es probable que las altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno registradas en la avenida Leon también se correlacionen con altas concentraciones en la escuela primaria Berry.

5.3.4.3. Análisis toxicológico: exposiciones agudas

Para realizar un análisis toxicológico, la ATSDR revisa los estudios que se usaron para establecer el MRL (por ejemplo, estudios críticos) y compara las concentraciones en el sitio (como los sitios de monitoreo del valle del río Tijuana) con las concentraciones en los estudios críticos. Si las concentraciones en el sitio superan las concentraciones de los estudios críticos usados para establecer el MRL, ello indica que podrían producirse efectos en la salud debido a la exposición en el sitio.

Un estudio realizado por Jäppinen et al. (1990) sirvió de base para el MRL agudo de inhalación de la ATSDR (70 ppb) [ATSDR 2016]. En este estudio, 10 adultos, tres hombres (de 33 a 50 años)

y siete mujeres (de 31 a 61 años), fueron expuestos a 2 ppm (2000 ppb) de sulfuro de hidrógeno durante 30 minutos en una cámara de exposición. Se evaluó su función respiratoria en respuesta a una prueba de provocación con histamina antes y después de la exposición de 30 minutos al sulfuro de hidrógeno. Todos los participantes tenían asma bronquial preexistente desde hacía entre 1 y 13 años (media = 3.7 años) y requerían medicamento, no se consideró que ninguno tuviera asma grave. No se incluyó en el estudio a personas con asma grave, ya que se recomendaba que los participantes pasaran dos días sin medicamento antes de la exposición al sulfuro de hidrógeno.

Entre los 10 adultos expuestos a 2 ppm de sulfuro de hidrógeno durante 30 minutos, todos percibieron un olor desagradable a sulfuro de hidrógeno y presentaron sequedad en la nariz y garganta al inicio de la exposición. Tres sujetos se quejaron de dolores de cabeza tras la exposición. No se produjeron cambios estadísticamente significativos en la función respiratoria, aunque se observó cierto aumento en la resistencia de las vías respiratorias. Dos de los 10 adultos presentaron cambios superiores al 30 % en la resistencia de las vías respiratorias y en la conductancia específica de las vías respiratorias, lo cual indicaba una obstrucción bronquial.

5.3.4.4. Resumen: exposiciones agudas

La EPC más alta, registrada en el sitio de monitoreo de la avenida Leon en septiembre del 2024, fue de 3021.5 ppb (3.0 ppm). Esta EPC supera el LOAEL de 2 ppm identificada en el estudio de Jäppinen et al. (2000). Asimismo, la EPC en la escuela primaria Berry (0.7 ppm) se acerca al valor del LOAEL. Las personas expuestas al sulfuro de hidrógeno en las áreas del valle del río Tijuana en la avenida Leon, y potencialmente en la escuela primaria Berry, podrían presentar efectos en la salud similares a los observados en los 10 adultos expuestos a 2 ppm de sulfuro de hidrógeno durante 30 minutos en el estudio de Jäppinen et al. (1990). Estos efectos en la salud incluyen sequedad en la nariz y garganta, dolores de cabeza y resistencia de las vías respiratorias o posibles signos de obstrucción bronquial (p. ej., dificultad para respirar) en personas sensibles. Además, las personas expuestas al sulfuro de hidrógeno podrían presentar efectos en la salud similares a aquellos relacionados con olores ambientales desagradables, como dolores de cabeza, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar [ATSDR 2014]. Los olores ambientales y los efectos en la salud relacionados se tratan con mayor detalle en la sección [5.3.7.](#)

Además, el Departamento de Salud y Calidad Ambiental de San Diego evaluó la presencia de sulfuro de hidrógeno en el aire con dispositivos PID y registró niveles de hasta 15 500 ppb (15.5 ppm) en el punto donde el río Tijuana fluye por debajo del bulevar Saturn. Aunque estos datos no tenían la calidad suficiente para usarse en este informe, indican que podrían darse niveles aún más elevados que los incluidos en este análisis durante breves periodos de tiempo.

5.3.5. Evaluación de los riesgos para la salud no cancerosos derivados de exposiciones intermedias

La ATSDR considera que las exposiciones con una duración de 15 a 364 días son exposiciones intermedias. Para esta evaluación, se supuso que las exposiciones duraban 24 horas diarias. La ATSDR promedió 14 días completos de lecturas de sulfuro de hidrógeno para representar las exposiciones de duración intermedia. Este método se eligió por ser el más conservador y

protector de la salud para estimar las exposiciones de duración intermedia. Esta sección describe cómo la ATSDR evaluó cuantitativamente los riesgos para la salud de las exposiciones de 14 días al sulfuro de hidrógeno en el aire del valle del río Tijuana y qué efectos en la salud, si los hubiera, podrían resultar de las exposiciones de duración intermedia.

5.3.5.1. *Cocientes de peligro: exposiciones intermedias*

La [Tabla 10](#) compara la EPC intermedia (promedio móvil máximo de 14 minutos de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno) con el MRL intermedio (20 ppb) según la ubicación y presenta los HQ calculados. Los HQ excedieron el valor de 1 en la escuela primaria Berry (HQ = 1.6) y en la avenida Leon (HQ = 7.6). Los promedios móviles de 14 días excedieron el MRL entre el 9 % y el 13 % del tiempo en estas dos ubicaciones. Dado que el HQ fue superior a 1 en estas dos ubicaciones, se justifica evaluar en mayor profundidad las exposiciones intermedias al sulfuro de hidrógeno en el aire. Los HQ no excedieron el valor de 1 en la estación de bomberos de San Diego (#29, San Ysidro) ni en el Centro Cívico de Imperial Beach.

Tabla 10: Cocientes de peligro: exposiciones intermedias al sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación de la EPC	(ppb)*	Intermedio MRL (ppb)	% Excede el MRL intermedio	Intermedio HQ **
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	3.3	20	0 %	0.16
Escuela primaria Berry	31.6	20	9 %	1.6[†]
Avenida Leon	151.9	20	13 %	7.6[†]
Centro Cívico de Imperial Beach	7.6	20	0 %	0.38

Abreviaturas: EPC = concentración en el punto de exposición; ppb = partes por mil millones; MRL = nivel de riesgo mínimo; HQ = cociente de peligro

[†]**Texto en negrita** = HQ iguales o menores que 1

*EPC calculado usando el promedio móvil máximo de dos semanas

**HQ = EPC/MRL

5.3.5.2. *Márgenes de exposición: exposiciones intermedias*

El MRL de inhalación de duración intermedia de la ATSDR se derivó a partir del nivel sin efecto adverso observado (NOAEL) de un estudio crítico; sin embargo, la ATSDR no usa este valor para los cálculos del MOE. Dado que se usa el mismo estudio crítico para el MRL intermedio y la RfC, la ATSDR adoptó el LOAEL de concentración equivalente para humanos (LOAEL_{HEC}) que la EPA calculó para la derivación de la RfC. En la Sección [5.3.5.3](#) se proporciona información adicional sobre cómo se calculó el valor LOAEL_{HEC,ADJ} ajustado (1.38 ppm). Luego, la ATSDR dividió el valor de LOAEL_{HEC,ADJ} por la EPC obtenida en los cuatro puntos de monitoreo del aire para determinar los MOE.

Un MOE igual o inferior a 1 indica que la concentración específica del sitio supera el nivel del estudio sobre efectos en la salud, lo que indica la posibilidad de que se produzcan efectos dañinos. Un valor superior a 1 significa que la concentración específica del sitio es inferior al nivel del estudio sobre efectos en la salud. Los MOE para exposiciones intermedias al sulfuro de hidrógeno en el aire en los cuatro sitios se presentan en la [Tabla 11](#).

Tabla 11: Márgenes de exposición: exposiciones intermedias al sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación	LOAEL _{HEC} * (ppb)	EPC (ppb)	MOE**
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	1380	3.3	418.2
Escuela primaria Berry	1380	31.6	43.7
Avenida Leon	1380	151.9	9.1
Centro Cívico de Imperial Beach	1380	7.6	181.6

Abreviaturas: LOAEL_{HEC} = LOAEL de concentración equivalente para humanos; ppb = partes por mil millones; EPC = concentración en el punto de exposición; MOE = margen de exposición

*Fuente de LOAEL: [ATSDR 2016, Brenneman, et al. 2000]

**MOE = LOAEL_{HEC}/EPC

El MOE para la estación de bomberos #29 de San Diego, la escuela primaria Berry y el Centro Cívico de Imperial Beach fueron todos muy superiores a 1. Esto significa que no es probable que se produzcan efectos en la salud derivados de exposiciones de duración intermedia en estas áreas. El MOE para la avenida Leon fue de 9.1. Este MOE es superior a 1, pero lo suficientemente bajo como para considerarse que se está acercando al nivel en el que se observan efectos. Esto no significa que vayan a producirse efectos en la salud con toda certeza, pero sí indica que justifica evaluación toxicológica adicional.

No se recolectaron datos en la escuela primaria Berry en el momento (septiembre del 2024) en que se detectaron las concentraciones más altas de sulfuro de hidrógeno en la avenida Leon. Por lo tanto, la EPC intermedia de la escuela podría ser más alta si se hubieran recolectado datos ahí en septiembre del 2024. Sin embargo, no cabría esperar que la EPC de la escuela fuera superior a la EPC de la avenida Leon, ya que la escuela se encuentra más alejada del río Tijuana (véase el Apéndice C).

5.3.5.3. *Análisis toxicológico: exposiciones intermedias*

La ATSDR señaló en su perfil toxicológico del 2016 para el sulfuro de hidrógeno y el sulfuro de carbonilo que los estudios en animales destacan el aparato respiratorio y el sistema nervioso como sistemas afectados sensibles a las exposiciones de duración intermedia al sulfuro de hidrógeno [ATSDR 2016]. Un estudio realizado por Brenneman et al. (2000) sirvió de base para establecer el MRL de inhalación de duración intermedia (20 ppb) de la ATSDR. En este estudio, grupos de 12 ratas macho Sprague Dawley fueron expuestas a 0, 10, 30 u 80 ppm de sulfuro de hidrógeno durante seis horas al día, siete días a la semana, por 10 semanas. Se llevó a cabo un examen exhaustivo de las cavidades nasales de las ratas expuestas para evaluar la toxicidad de las exposiciones.

Solo las ratas expuestas a 30 u 80 ppm presentaron lesiones nasales en la mucosa olfativa. Para este estudio, el NOAEL fue de 10 ppm y el LOAEL fue de 30 ppm.

Al establecer el MRL de duración intermedia, se ajustó el NOAEL a una exposición de 24 horas usando la siguiente ecuación:

$$\text{NOAEL ajustado (NOAEL}_{\text{Adj}}) = 10 \text{ ppm} \times (6 \text{ horas}/24 \text{ horas}) \times (7 \text{ días}/7 \text{ días}) = 2.5 \text{ ppm}$$

La ATSDR realizó cálculos adicionales para tener en cuenta las diferencias en el área superficial de la nariz y en la frecuencia respiratoria entre ratas y seres humanos [ATSDR 2016]. Para ello, la ATSDR calculó un cociente de dosis de gas regional (RGDR) para la región extratorácica. La RGDR calculada fue de 0.184.

Se calculó un NOAEL equivalente para humanos (NOAEL_{HEC}) final usando la siguiente fórmula:

$$\text{NOAEL}_{\text{HEC}} = \text{NOAEL}_{\text{Adj}} \times 0.184 = 2.5 \text{ ppm} \times 0.184 = 0.46 \text{ ppm}$$

A modo de comparación, el LOAEL equivalente para humanos correspondiente al mismo estudio es de 1.38 ppm:

$$\text{LOAEL}_{\text{HEC}} = \text{LOAEL}_{\text{Adj}} \times 0.184 = 30 \text{ ppm} \times (6 \text{ horas}/24 \text{ horas}) \times (7 \text{ días}/7 \text{ días}) \times 0.184 = 1.38 \text{ ppm}$$

5.3.5.4. *Resumen: exposiciones intermedias*

La EPC más alta, registrada en el sitio de monitoreo de la avenida Leon en septiembre del 2024, fue de 151.9 ppb (0.152 ppm). Esta EPC es aproximadamente 10 veces más baja que el LOAEL_{HEC} del estudio crítico y tres veces más baja que el NOAEL_{HEC}.

No se prevé que las exposiciones intermedias (es decir, de 15 a 364 días) al sulfuro de hidrógeno en el aire del valle del río Tijuana, en los cuatro sitios de monitoreo, causen efectos adversos para la salud. Sin embargo, las personas expuestas al sulfuro de hidrógeno podrían presentar efectos en la salud relacionados con la percepción de olores desagradables, como dolores de cabeza, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar [ATSDR 2014]. Los olores ambientales se tratan con mayor detalle en la sección [5.3.7](#).

5.3.6. Evaluación de los riesgos para la salud no cancerosos derivados de exposiciones crónicas

La ATSDR considera que las exposiciones con una duración de más de 364 días son exposiciones crónicas. Para esta evaluación, se calcularon los 95UCL ajustados al tamaño efectivo de la muestra usando mediciones de sulfuro de hidrógeno con intervalos de un minuto, recolectadas entre septiembre del 2024 y mayo del 2025, como estimación de la exposición crónica en cada sitio de monitoreo. En esta sección se describe cómo la ATSDR evaluó cuantitativamente los riesgos para la salud derivados de la exposición crónica al sulfuro de hidrógeno en el aire del valle del río Tijuana, así como los posibles efectos en la salud que dicha exposición podría ocasionar.

5.3.6.1. *Cocientes de peligro: exposiciones crónicas*

La [Tabla 12](#) compara las EPC crónicas con la RfC de la EPA por ubicación y proporciona los HQ calculados. Los HQ superaron el valor de 1 en la estación de bomberos #29 de San Diego (HQ = 2.0), la escuela primaria Berry (HQ = 6.4), la avenida Leon (HQ = 16) y el Centro Cívico de Imperial Beach (HQ = 2.8). Dado que el HQ fue superior a 1 en las cuatro ubicaciones, se justifica evaluación adicional de las exposiciones crónicas al sulfuro de hidrógeno en el aire.

Tabla 12: Cocientes de peligro: exposiciones crónicas al sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación	EPC (ppb)*	RfC de la EPA** (ppb)	HQ crónico ⁺
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	2.8	1.4	2.0
Escuela primaria Berry	9.2	1.4	6.4
Avenida Leon	23.6	1.4	16
Centro Cívico de Imperial Beach	4.0	1.4	2.8

Abreviaturas: EPC = concentración en el punto de exposición; ppb = partes por mil millones; RfC = concentración de referencia de la EPA; HQ = cociente de peligro

Texto en negrita = HQ superior a 1

*EPC calculada usando el tamaño efectivo de la muestra (ESS) del límite superior de confianza del 95 % de la media aritmética (95UCL).

**Fuente de la RfC de la EPA: [Brenneman, et al. 2000, EPA 2003b]

⁺HQ=EPC/EPA RfC

5.3.6.2. Márgenes de exposición: exposiciones crónicas

Al igual que en las evaluaciones de duración aguda e intermedia, la ATSDR complementó el análisis del HQ crónico con una evaluación de MOE. La ATSDR determinó el MOE para las exposiciones crónicas por inhalación, cuyos valores se presentan en la [Tabla 13](#).

El mismo estudio usado como base para determinar el MRL intermedio sirvió de base para la RfC de la EPA, y el procedimiento para calcular un LOAEL equivalente para humanos (LOAEL_{HEC}) a partir de dicho estudio se describe previamente en la Sección [5.3.5.3](#). Las limitaciones de la base de datos sobre toxicidad crónica se discuten en la sección [5.3.6.4](#).

Tabla 13: Márgenes de exposición: exposiciones crónicas al sulfuro de hidrógeno en el aire

Ubicación	LOAEL _{HEC} * (ppb)	EPC (ppb)	MOE**
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	1380	2.8	492.8
Escuela primaria Berry	1380	9.2	150.0
Avenida Leon	1380	23.6	58.5
Centro Cívico de Imperial Beach	1380	4.0	345.0

Abreviaturas: LOAEL_{HEC} = nivel mínimo con efecto adverso observado de concentración equivalente para humanos; ppb = partes por mil millones; EPC = concentración en el punto de exposición; MOE = margen de exposición

*Fuente de LOAEL: [ATSDR 2016, Brenneman, et al. 2000]

**MOE = LOAEL_{HEC}/EPC

Los MOE para las cuatro ubicaciones son muy superiores a 1, lo que indica que estas exposiciones crónicas estimadas, específicas para cada sitio, se encuentran por debajo de las concentraciones que provocaron efectos en la salud en el estudio crítico.

5.3.6.3. *Análisis toxicológico: exposiciones crónicas*

La RfC de la EPA se basó en el mismo estudio usado para derivar el MRL de inhalación de duración intermedia, que describimos en la sección [5.3.5.3](#). En resumen, un estudio realizado por Brenneman et al. (2000) expuso grupos de 12 ratas macho Sprague Dawley a 0, 10, 30 u 80 ppm de sulfuro de hidrógeno durante seis horas al día, siete días a la semana, por 10 semanas. Se llevó a cabo un examen de las cavidades nasales de las ratas expuestas para evaluar la toxicidad de dichas exposiciones. Solo las ratas expuestas a 30 u 80 ppm presentaron lesiones nasales en la mucosa olfativa. Para este estudio, el NOAEL fue de 10 ppm y el LOAEL fue de 30 ppm.

Tras realizar ajustes por exposición continua de 24 horas, diferencias en el área superficial nasal y diferencias en la frecuencia respiratoria entre ratas y seres humanos, las concentraciones equivalentes para humanos correspondientes al NOAEL y al LOAEL fueron de 0.46 ppm y 1.38 ppm, respectivamente. Las EPC crónicas en los cuatro sitios de monitoreo del valle del río Tijuana estuvieron órdenes de magnitud por debajo tanto del NOAEL_{HEC} como del LOAEL_{HEC}.

5.3.6.4. *Limitaciones de la base de datos de exposiciones crónicas*

Conforme al proceso de evaluación de salud pública de la ATSDR, esta evaluación se basa en la literatura toxicológica disponible cuando se elaboró el perfil toxicológico del sulfuro de hidrógeno y del sulfuro de carbonilo de la ATSDR en el 2016. Cabe destacar que dicho perfil toxicológico destacó la falta de una base de datos toxicológicos sólida sobre la exposición crónica al sulfuro de hidrógeno [ATSDR 2016]. Si bien por lo general se considera que la exposición crónica dura un año o más, el estudio crítico para la RfC de la EPA se basó en una duración de exposición de 10 semanas (subcrónica). La EPA tuvo en cuenta la duración del estudio subcrónico aplicando un factor de incertidumbre adicional de 10 al desarrollar la RfC.

En el perfil toxicológico, la ATSDR no identificó estudios que evaluaran la exposición crónica al sulfuro de hidrógeno en animales. Los estudios realizados en trabajadores y residentes de zonas con niveles elevados de sulfuro de hidrógeno a menudo presentan factores de confusión importantes (por ejemplo, la probabilidad de exposición a otras sustancias químicas) o carecen de un componente adecuado para la evaluación de la exposición [ATSDR 2016; Batterman et al. 2023]. Diversos autores han señalado la necesidad de realizar estudios de exposición crónica, que controlen la exposición a otros contaminantes y cuantifiquen adecuadamente las exposiciones, para caracterizar mejor las implicaciones en la salud derivadas de exposiciones crónicas, tanto en animales como en seres humanos. Además, la EPA identificó la necesidad de llevar a cabo estudios de exposición crónica en ratas y ratones usando múltiples grupos de dosis, con el fin de comprender los efectos del sulfuro de hidrógeno en el cerebro en desarrollo [EPA 2003b].

La EPA determinó que su evaluación de la concentración de referencia (RfC) presentaba un nivel de confianza de medio a alto; se asignó la calificación de “medio” debido a que el estudio crítico abarcaba únicamente un periodo de exposición subcrónica. La RfC de la EPA para el sulfuro de hidrógeno, la cual se usó para caracterizar las exposiciones crónicas en esta evaluación, tuvo en cuenta el uso de un estudio subcrónico para derivar un valor orientativo de salud crónica [EPA 2003b]. Para ello, la EPA aplicó un factor de incertidumbre de 10 a la

RfC, reduciendo diez veces la concentración de comparación como medida conservadora. Los factores de incertidumbre ayudan a garantizar que un valor orientativo de salud proteja la salud incluso de las poblaciones más sensibles, pero esto solo se refiere al valor de detección. Estudios adicionales sobre la exposición crónica al sulfuro de hidrógeno en animales y seres humanos aumentarían la confianza en los niveles de efecto usados para evaluar los riesgos de la exposición crónica.

5.3.6.5. Resumen: exposiciones crónicas

El nivel con efectos en la salud observado en el estudio crítico (1.380 ppb) fue muy superior a la EPC más alta para exposiciones de duración crónica (23.6 ppb) en el valle del río Tijuana. En consecuencia, no se prevé que las exposiciones de duración crónica (es decir, superiores a 364 días) al sulfuro de hidrógeno presente en el aire del valle del río Tijuana —en los cuatro sitios de monitoreo— causen efectos adversos para la salud. La realización de estudios adicionales sobre exposiciones crónicas reforzaría más la confianza en la evaluación de los efectos a largo plazo para la salud. Las personas expuestas al sulfuro de hidrógeno podrían presentar efectos en la salud relacionados con la percepción de olores desagradables, como dolores de cabeza, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar [ATSDR 2014]. Los olores ambientales se tratan con mayor detalle en la sección [5.3.7](#).

5.3.7. Olores ambientales²

5.3.7.1. Antecedentes sobre los olores ambientales

Las sustancias químicas con olores desagradables pueden afectar la salud a través de más de un mecanismo [Schiffman y Williams 2005]. Los olores se detectan cuando la sustancia química olorosa estimula el nervio olfativo en el conducto nasal. Si los olores se perciben como desagradables, este mecanismo podría asociarse con dolor de cabeza, náuseas o vómitos [Schiffman et al. 1995]. Si hay sustancias químicas malolientes presentes en concentraciones más altas (es decir, generalmente de 10 a 100 veces superiores al umbral de olor), la estimulación de otros nervios craneales puede provocar irritación, incluida una sensación de ardor, escozor o picor en los ojos, la nariz o la garganta. La irritación de las vías respiratorias podría ir acompañada de cambios en la respiración, como cambios en el ritmo de respiración o un aumento de la resistencia al flujo de aire en las vías respiratorias superiores o inferiores [Schiffman et al. 2000; Schiffman y Williams 2005]. Las combinaciones de bajas concentraciones de sustancias químicas malolientes también podrían causar irritación. Los efectos en la salud de la inhalación de mezclas de sustancias químicas malolientes no se comprenden del todo.

Con la exposición repetida a una sustancia química maloliente, las personas pueden presentar respuestas aprendidas a ese olor [Schiffman y Williams 2005]. Por ejemplo, si la inhalación de compuestos malolientes a base de azufre en niveles de exposición suficientes provocó previamente un ataque de asma, la percepción del olor de esos compuestos podría desencadenar un ataque posteriormente. La exposición repetida a sustancias químicas irritantes y malolientes (y otros contaminantes ambientales del aire, incluida materia particulada, óxidos

² La información de esta sección proviene de la investigación de la ATSDR sobre la exposición al aire exterior relacionada con la Port Townsend Paper Corporation, la cual puede consultarse aquí: <https://www.atsdr.cdc.gov/HAC/pha/PortTownsendPaperCorp/Port-Townsend-HC-508.pdf>

de nitrógeno y ozono) podría inducir enfermedades respiratorias crónicas, como el asma, especialmente en niños y adultos mayores, aunque las mezclas de contaminantes y exposiciones relevantes no se comprenden bien [Clark, et al. 2010, Schiffman y Williams 2005, Tétreault et al. 2016]. La exposición reiterada a olores desagradables percibidos como impredecibles o incontrolables también podría aumentar considerablemente los niveles de estrés de las personas y afectar a su calidad de vida [Schiffman y Williams 2005]. El estrés crónico puede dañar la salud de diversas maneras, lo que abordaremos en la siguiente sección.

Por lo general, los síntomas relacionados con los olores desaparecen una vez que estos se disipan y no requieren atención médica. No obstante, los síntomas pueden prolongarse si los olores persisten o si las sustancias químicas malolientes alcanzan niveles que causan irritación. Entre los síntomas respiratorios que podrían persistir están dificultad para respirar, opresión en el pecho o molestias al respirar, especialmente en personas con enfermedades cardiopulmonares o respiratorias crónicas, como el asma [ATSDR 2014]. La ATSDR recomienda que las personas consulten a un médico ante cualquier síntoma persistente que no desaparezca cuando se disipan los olores.

La percepción de los olores y las reacciones pueden variar de una persona a otra. La genética, el sexo y la edad pueden influir en el sentido del olfato y en la percepción de los olores [Greenberg et al., 2013]. Las mujeres tienden a ser más sensibles a los olores que los hombres, y las personas más jóvenes tienden a ser más sensibles que las de mayor edad. Es más probable que las mujeres embarazadas tengan náuseas ante olores desagradables. El estado de salud de una persona también puede influir en su sensibilidad a los olores. Es más probable que las personas con enfermedades como el asma sientan opresión en el pecho o dificultad para respirar ante olores desagradables [ATSDR 2014].

Numerosos estudios comunitarios han encontrado que la exposición crónica a emisiones de azufre malolientes podría provocar efectos adversos para la salud, emociones negativas y una disminución de la calidad de vida [Campagna, et al. 2004, Haahtela, et al. 1992, Jaakkola, et al. 1999, Kilburn y Warshaw 1995, Legator, et al. 2001, Marttila, et al. 1994, Partti-Pellinen, et al. 1996].

5.3.7.2. Estrés debido a olores ambientales

Las personas que viven cerca de sitios contaminados corren un mayor riesgo de presentar estrés y los efectos negativos para la salud asociados al estrés crónico. Los olores desagradables que se perciben como impredecibles o incontrolables aumentan los niveles de estrés de las personas. Otras causas de estrés pueden incluir la frustración ante los largos tiempos de limpieza en los sitios y la percepción de que los riesgos para la salud no disminuyen con el paso del tiempo. Las personas pueden presentar estrés debido a la incertidumbre sobre su salud actual o futura, la de sus hijos y el impacto de las exposiciones ambientales en su salud.

El aumento del estrés puede ir acompañado de diversas emociones negativas, como ansiedad, depresión, ira y confusión [Schiffman et al. 1995; Schiffman y Williams 2005]. Debido a la interacción entre los sistemas nervioso central, inmunitario y endocrino, el estrés y las emociones negativas pueden afectar la salud de las personas de diversas maneras a lo largo del tiempo [Glaser y Kiecolt-Glaser 2005]. Los problemas de salud inducidos por estrés crónico, que pueden incluir una mayor susceptibilidad a las infecciones, una mayor gravedad de las

enfermedades infecciosas o un aumento en las respuestas inflamatorias, pueden asociarse con muchas enfermedades comunes, como arteriopatía coronaria y el síndrome del colon irritable [Glaser y Kiecolt-Glaser 2005]. Los efectos indirectos del estrés (por ejemplo, mala calidad del sueño, malos hábitos alimenticios, falta de ejercicio y un mayor consumo de tabaco y alcohol) exponen a las personas a un riesgo aún mayor de presentar problemas de salud.

5.3.7.3. *Olores a sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana*

Las personas pueden empezar a percibir el olor a sulfuro de hidrógeno en el aire cuando este se encuentra en concentraciones tan bajas como 0.5 ppb. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno cerca del río Tijuana superaron el umbral de olor en los cuatro sitios de monitoreo (Apéndice B: [Figura 6](#)). Específicamente, las lecturas de sulfuro de hidrógeno de un minuto superaron el umbral de olor en los sitios de monitoreo de la estación de bomberos de San Diego en San Ysidro, la avenida Leon, el Centro Cívico de Imperial Beach y la escuela primaria Berry durante el 70 %, 82 %, 89 % y 96 % del tiempo, respectivamente.

Cuando las concentraciones de sulfuro de hidrógeno superan el umbral de olor, las personas podrían presentar síntomas de salud relacionados con el olor, como dolor de cabeza, náuseas, estrés o molestias, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar [ATSDR 2014, ATSDR 2016]. Cabe destacar que muchos de los participantes en las encuestas ACE y CASPER del 2024 informaron haber presentado muchos de estos síntomas [HHSA 2024b, HHSA 2024c]. Las encuestas de salud también identificaron a un gran número de participantes que presentaron estrés y otros síntomas de salud mental atribuidos a la contaminación por aguas residuales [HHSA 2024b, HHSA 2024c, Shi 2025].

5.4. Respuesta a las preocupaciones de la comunidad

Los miembros de la comunidad han expresado su preocupación por los olores y la mala calidad del aire en el valle del río Tijuana durante muchos años. La [Tabla 14](#) describe la respuesta de la ATSDR a las principales preocupaciones de la comunidad.

Tabla 14: Respuesta de la ATSDR a las preocupaciones de la comunidad

Preocupación de la comunidad	Respuesta de la ATSDR
Olores desagradables y mala calidad del aire debido al sulfuro de hidrógeno en los vecindarios durante más de un año.	El análisis de la ATSDR encontró que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno superaban el umbral de olor la mayor parte del tiempo. La ATSDR halló que la exposición a corto plazo al sulfuro de hidrógeno cerca de la avenida Leon puede representar un riesgo para la salud pública, pero no se prevé que la exposición a largo plazo cause efectos adicionales en la salud. Las recomendaciones de la ATSDR para abordar las exposiciones agudas y los olores se encuentran en la Sección 7: Recomendaciones y plan de acción

Preocupación de la comunidad	Respuesta de la ATSDR
	de salud pública
Presencia de síntomas físicos como irritación de los ojos, dolor de cabeza, náuseas, alergias y asma	El análisis de la ATSDR determinó que, en ocasiones, se prevé que las exposiciones de corta duración al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana, cerca del sitio de monitoreo en la avenida Leon, causen dolores de cabeza, sequedad en la nariz y la garganta, y posible dificultad para respirar. Las personas expuestas a olores de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana también podrían presentar dolores de cabeza, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar en personas sensibles. Las personas también podrían presentar náuseas, vómitos, estrés y los efectos negativos para la salud derivados del estrés crónico. Las exposiciones repetidas a olores pueden causar enfermedades respiratorias crónicas, como el asma.
Las exposiciones propias de los niños y las decisiones sobre la cancelación de actividades al aire libre como el recreo, los entrenamientos deportivos organizados y los eventos deportivos juveniles	Esto se aborda en la Sección 5.5.1 : Susceptibilidad de los niños
Menor disfrute o uso del hogar, el patio o las áreas de recreación en el área	La ATSDR ofrece recomendaciones para las personas del valle del río Tijuana en la Sección 7: Recomendaciones y plan de acción de salud pública
Modificación de los comportamientos de mantenimiento del hogar relacionados con la ventilación: mantener las ventanas cerradas, y adquirir y mantener equipos de purificación de aire para reducir los olores	La ATSDR hace recomendaciones, entre ellas, obtener purificadores de aire del SDAPCD, en la Sección 7: Recomendaciones y plan de acción de salud pública. El mantenimiento de los filtros de aire conforme a las recomendaciones del fabricante es importante para garantizar su eficacia.
La salud de los animales, como los caballos alojados cerca del río y los perros	Aunque el enfoque de esta consulta sobre salud es la salud humana, la ATSDR no identificó estudios sobre el sulfuro de hidrógeno que indicaran que los caballos o los perros sean particularmente susceptibles a las exposiciones a esta sustancia. Es probable que

Preocupación de la comunidad	Respuesta de la ATSDR
	las medidas para reducir la exposición humana al sulfuro de hidrógeno también contribuyan a proteger a los caballos y a los perros.
Impactos negativos de los olores en los negocios locales y el turismo	El análisis de la ATSDR encontró que las concentraciones de sulfuro de hidrógeno superaban el umbral de olor la mayor parte del tiempo. En la Sección 7 se ofrecen recomendaciones para abordar los olores: Recomendaciones y plan de acción de salud pública
Frustración por el lento progreso en abordar los problemas de olores y sus causas de origen	Los miembros de la comunidad que perciben fuertes olores ambientales, tanto en espacios privados como comunitarios, podrían sentirse frustrados. Por lo general, los gases de alcantarillado son difíciles de manejar y controlar, ya que se desplazan por el aire y tienen olores intensos que pueden percibirse incluso en concentraciones bajas. En el valle del río Tijuana, la situación se complica debido a la geografía, los patrones meteorológicos, la proximidad de distintos usos del suelo y la presencia de la frontera internacional. La participación comunitaria y la notificación de inquietudes sobre la salud han contribuido a que los funcionarios locales, estatales y federales pongan mayor atención en abordar la infraestructura cada vez más vieja, monitorear y comunicarse sobre la calidad del aire, y facilitar equipos de purificación de aire a las personas más afectadas.

5.5. Resumen de las limitaciones e incertidumbres

En esta sección se analizan las limitaciones e incertidumbres de esta evaluación.

5.5.1. Susceptibilidad de los niños

Los niños representan una población de exposición única. Es importante considerar sus posibles exposiciones al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana dada la cercanía del río a la escuela primaria Berry, guarderías, viviendas, la zona para acampar del valle del río Tijuana, campos de béisbol y otros lugares que los niños podrían visitar. Sin embargo, existe muy poca información disponible sobre los posibles efectos en la salud a causa de la exposición al sulfuro de hidrógeno en los niños, y se desconoce si son más sensibles a esta

sustancia que los adultos [ATSDR 2016]. No obstante, las personas que pasan más tiempo al aire libre tendrán una mayor exposición.

5.5.2. Limitaciones de los muestreos

En esta evaluación se usan datos de cuatro ubicaciones de monitoreo. Estas cuatro ubicaciones no representan necesariamente los lugares donde hay más personas expuestas, ni tampoco representan necesariamente las ubicaciones con los niveles de exposición más altos. De las cuatro ubicaciones, es probable que la avenida Leon tenga las concentraciones más elevadas de sulfuro de hidrógeno en el aire exterior debido a la caída vertical de agua bajo el bulevar Saturn. Sin embargo, podría haber otros sitios de interés que actualmente se desconocen y no se están monitoreando. Por ejemplo, es probable que el monitoreo en el punto de caída del bulevar Saturn produzca concentraciones de sulfuro de hidrógeno superiores a las aquí reportadas si ese lugar fuera el punto crítico de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana. Esto se ve respaldado, además, por la elevada lectura de sulfuro de hidrógeno (15 500 ppb) registrada en una ocasión por el Departamento de Salud y Calidad Ambiental de San Diego.

El muestreo en la escuela primaria Berry no comenzó sino hasta octubre del 2024. Las concentraciones en el aire exterior en el sitio de monitoreo de la avenida Leon, situada frente a la escuela, fueron las más altas en septiembre del 2024. Es probable que las concentraciones también fueran elevadas en la escuela durante ese mismo mes debido a la gran cercanía entre ambos sitios de monitoreo, pero no se dispone de datos para confirmarlo. Aunque la ATSDR no puede cuantificar las exposiciones en la escuela antes de octubre del 2024, analizó si existía una correlación entre estos dos sitios (Sección [4.1.4](#) y Apéndice C). Los resultados indicaron una correlación significativa.

5.5.3. Supuestos de exposición

Este informe se basa en datos de monitoreo provenientes de cuatro ubicaciones. Se considera que los sitios de monitoreo en la avenida Leon y de la escuela primaria Berry representan algunos de los niveles más altos de sulfuro de hidrógeno a los que la comunidad podría estar expuesta, pero sería necesario realizar un esfuerzo de muestreo más amplio en todo el valle del río Tijuana para confirmarlo.

Las concentraciones en el punto de exposición (EPC) para la evaluación de la exposición aguda, las cuales se usaron para determinar las conclusiones, provinieron en gran medida de las horas nocturnas. Durante la noche, las personas suelen permanecer en sus hogares, lo que podría reducir su exposición al aire exterior dependiendo de sus comportamientos (por ejemplo, abrir ventanas, utilizar purificadores de aire, etc.). Por consiguiente, las estimaciones de exposición de este informe podrían sobrestimar la exposición real de las personas en el valle del río Tijuana. Para evaluar más a fondo las exposiciones agudas, la ATSDR calculó las EPC agudas correspondientes únicamente a las horas diurnas y las comparó con las EPC agudas de los niveles de sulfuro de hidrógeno de las horas nocturnas (Apéndice B, [Tabla 15](#)). A excepción de la estación de bomberos de San Diego en San Ysidro, la ATSDR observó que las EPC agudas eran más altas de manera constante durante la noche. Aunque la EPC aguda en la avenida Leon era menor durante el día, aún así superó el nivel con efectos en la salud de 2 ppm identificado en el estudio crítico [Jäppinen et al., 1990]. Por lo tanto, la conclusión de la ATSDR sigue siendo que las exposiciones a corto plazo al sulfuro de hidrógeno en el valle del río

Tijuana pueden alcanzar niveles que representan un riesgo para la salud pública.

5.5.4. Base de datos de literatura científica sobre exposiciones crónicas

La base de datos toxicológica del sulfuro de hidrógeno no tiene estudios sólidos de duración crónica. Cabe destacar que el nivel con efectos en la salud usado para el análisis de los efectos crónicos en este informe se basa en un estudio subcrónico de 10 semanas, en lugar de un estudio de exposición crónica (generalmente de un año o más). Para un análisis más detallado de estas limitaciones, consulte la Sección [5.3.6.4.](#)

6. Conclusiones

6.1. Conclusión 1: Olores ambientales

Los olores ambientales en el valle del río Tijuana pueden afectar negativamente la salud y el bienestar de las personas.

No todos los olores ambientales en el valle de Tijuana provienen del sulfuro de hidrógeno, pero es muy probable que muchos de ellos sí. En muestras de 30 minutos, se registraron niveles de sulfuro de hidrógeno en el aire exterior por encima del nivel en el que las personas pueden olerlo en los cuatro sitios de monitoreo del aire del valle del río Tijuana, hasta en un 93 % del tiempo. Como resultado, las personas en el valle del río Tijuana podrían presentar síntomas de salud relacionados con olores ambientales, como dolores de cabeza, náuseas, estrés o molestia, congestión nasal, irritación de ojos, nariz y garganta, ronquera y dolor de garganta, tos, opresión en el pecho y dificultad para respirar [ATSDR 2014, ATSDR 2016].

Algunos de los síntomas que las personas presentan debido a los olores ambientales son similares a los observados en estudios toxicológicos sobre el sulfuro de hidrógeno en concentraciones más elevadas (por ejemplo, 2000 ppb, el nivel más bajo en el que se han observado efectos en la salud en dichos estudios). Sin embargo, el sulfuro de hidrógeno puede percibirse por el olfato a niveles mucho más bajos (tan bajos como aproximadamente 0.5 ppb). Esto significa que pueden aparecer síntomas en respuesta al olor mismo, incluso a niveles muy inferiores a los que se usan en estudios toxicológicos. Así, los olores ambientales pueden influir en cómo se sienten las personas, incluso cuando los niveles químicos medidos son bajos.

6.2. Conclusión 2: Exposiciones a corto plazo (agudas)

El sulfuro de hidrógeno en el aire exterior en el sitio de monitoreo en la avenida Leon, y probablemente también en el sitio de monitoreo en la escuela primaria Berry, ha alcanzado durante cortos periodos un nivel que podría dañar la salud de las personas. La exposición al sulfuro de hidrógeno a este nivel representa un riesgo para la salud pública.

Se tomaron lecturas de sulfuro de hidrógeno de un minuto en cuatro sitios de monitoreo en el valle del río Tijuana. La ATSDR calculó promedios móviles de 30 minutos a partir de estos datos para comparar los resultados con las concentraciones en el aire citadas en la literatura toxicológica que examina los efectos del sulfuro de hidrógeno en la salud derivados de la exposición a corto plazo.

La EPC más alta (un promedio móvil máximo de 30 minutos) se registró en el sitio de monitoreo de la avenida Leon en septiembre del 2024; el promedio móvil de 30 minutos fue de 3021.5 partes por mil millones (ppb). Esta EPC supera el LOAEL de 2000 ppb identificado en el estudio de Jäppinen et al. (1990) usado para establecer el MRL agudo de la ATSDR. Esto significa que las personas que respiraron sulfuro de hidrógeno en esta ubicación tuvieron exposiciones, en ocasiones, a concentraciones superiores a aquellas que, según se ha demostrado, causan efectos en la salud de los seres humanos. Estos efectos en la salud incluyen dolores de cabeza, sequedad en la nariz y garganta, y resistencia de las vías respiratorias o posibles signos de obstrucción bronquial (p. ej., dificultad para respirar) en personas sensibles. En la avenida Leon, las concentraciones móviles de sulfuro de hidrógeno calculadas en intervalos de 30 minutos superaron el LOAEL de 2000 ppb durante el 0.04 % del tiempo.

Los valores de EPC para las ubicaciones restantes fueron inferiores a 2000 ppb. Sin embargo, el monitoreo en la escuela primaria Berry, situada frente a la estación de monitoreo en la avenida Leon, no comenzó sino hasta octubre del 2024 (después de que se registraran las concentraciones más altas de sulfuro de hidrógeno en la avenida Leon). Es probable que los niveles de sulfuro de hidrógeno también fueran elevados en la escuela primaria Berry, dado que ambas ubicaciones están muy cerca entre sí; sin embargo, la ATSDR no dispone de datos sobre el aire en dicha escuela previos al inicio del monitoreo allí. Sin embargo, la ATSDR demostró que existe una correlación significativa entre los niveles de sulfuro de hidrógeno en ambas ubicaciones.

6.3. Conclusión 3: Exposiciones a más largo plazo (intermedias y crónicas)

No se prevé que las exposiciones al sulfuro de hidrógeno a más largo plazo (14 días o más) en los cuatro sitios de monitoreo representen un riesgo para la salud pública ni que provoquen efectos adicionales en la salud más allá de los vinculados a exposiciones elevadas de corta duración. Sin embargo, aún podrían estar relacionadas con síntomas causados por los olores.

Duración intermedia (de más de 14 días a 364 días): La ATSDR calculó promedios móviles de 14 días como la EPC para cada sitio de monitoreo a modo de estimación conservadora de las exposiciones de duración intermedia. La EPC más alta correspondió al sitio de monitoreo en la avenida Leon (151.9 ppb). La siguiente EPC más alta correspondió a la escuela primaria Berry (31.6 ppb). Las EPC en ambos sitios superaron el MRL intermedio de la ATSDR (20 ppb). Sin embargo, estos niveles fueron nueve y 44 veces más bajos respectivamente que el nivel que, según la literatura toxicológica, provoca efectos en la salud (1380 ppb). Por lo tanto, la ATSDR no prevé que la exposición intermedia al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana dañe la salud de las personas.

Duración crónica (un año o más): La ATSDR promedió entre cuatro y siete meses de datos de monitoreo de cada ubicación de muestreo para determinar las EPC para exposiciones crónicas. El monitoreo del aire comenzó en diferentes momentos en cada sitio, razón por la cual varía el período durante el cual hay datos disponibles para cada uno de ellos. La EPC más alta

correspondió al sitio de monitoreo en la avenida Leon (23.6 ppb). La siguiente EPC más alta correspondió a la ubicación en la escuela primaria Berry (9.2 ppb). Estos niveles fueron 58 y 150 veces más bajos a los niveles que, según la literatura toxicológica, provoca efectos en la salud (1380 ppb). Por lo tanto, la ATSDR no prevé que la exposición crónica al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana dañe la salud de las personas.

6.4. Conclusión 4: Exposiciones anteriores a septiembre del 2024

La ATSDR no puede concluir si respirar sulfuro de hidrógeno en el aire exterior en el valle del río Tijuana antes de septiembre del 2024 pudo haber causado daños la salud de las personas. No se recolectaron datos suficientes antes de ese periodo.

El monitoreo del aire en el valle del río Tijuana con instrumentos adecuados para la evaluación de la salud pública comenzó en septiembre del 2024. No se dispone de datos anteriores a esa fecha para evaluar los riesgos para la salud. Aunque la ATSDR entiende que el problema de las aguas residuales del río Tijuana ha persistido durante muchos años y que, casi con toda seguridad, se han producido exposiciones al sulfuro de hidrógeno en el aire exterior como consecuencia de ello, la ATSDR no puede cuantificar ni caracterizar dichas exposiciones pasadas sin contar con datos.

7. Recomendaciones y plan de acción de salud pública

7.1. Recomendaciones

La ATSDR tiene las siguientes recomendaciones de salud pública basadas en nuestra evaluación del sulfuro de hidrógeno en el aire exterior en cuatro sitios de monitoreo alrededor del valle del río Tijuana:

Recomendaciones para las agencias federales y estatales:

- Prevengan el flujo transfronterizo de aguas residuales hacia el valle del río Tijuana para mantener los niveles de sulfuro de hidrógeno lo más bajos posible, idealmente por debajo del umbral de olor de 0.5 ppb.
- Mejoren y mantengan la infraestructura de tratamiento de aguas residuales para manejar los flujos en el valle del río Tijuana.
- Continúen colaborando con las agencias locales para implementar medidas que reduzcan las emisiones de sulfuro de hidrógeno en el punto donde el río Tijuana pasa por debajo del bulevar Saturn.

Recomendaciones para las agencias locales:

- Continúen monitoreando el sulfuro de hidrógeno en el aire y notificando a los miembros de la comunidad, empresas, guarderías y escuelas cuando los niveles superen los umbrales establecidos por las agencias estatales o locales para proteger la salud. Usen diversos métodos para comunicarse con los miembros de la

comunidad (por ejemplo, mensajes de texto y correos electrónicos).

- Mantengan la señalización en todo el valle del río Tijuana para alertar a los visitantes sobre la posible presencia de sulfuro de hidrógeno.
- Sigan ofreciendo purificadores de aire y filtros a través del Programa de alivio para la mejora del aire.
- Continúen documentando y monitoreando las quejas relacionadas con los olores. Consideren formas de identificar con precisión la ubicación de las quejas por olores para centrar el monitoreo del aire en las zonas críticas y comprender mejor la distribución geográfica de los olores.
- Realicen monitoreos del aire para determinar los niveles de sulfuro de hidrógeno más allá de las ubicaciones con monitores fijos. Consideren ampliar el monitoreo del aire a otros contaminantes que puedan liberarse del río Tijuana, incluidos los compuestos orgánicos volátiles.
- Continuar colaborando con agencias federales y estatales para reducir las emisiones de sulfuro de hidrógeno en el punto donde el río Tijuana pasa por debajo del bulevar Saturn.
- Asegúrense de que se lleve a cabo un monitoreo del aire para verificar que las intervenciones implementadas para abordar el problema del sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana no den lugar a exposiciones dañinas continuas o adicionales.
- Mantengan la Guía comunitaria sobre el sulfuro de hidrógeno:
<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>. Consideren colaborar con las agencias estatales y federales pertinentes para elaborar e incorporar recomendaciones dirigidas a los trabajadores que no puedan salir del área o estar en un espacio interior durante su turno.

Recomendaciones para las escuelas:

- Monitoreen los niveles de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana a través del sitio web de monitoreo de la calidad del aire del SDAPCD:
<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>. Sigan las directrices del SDAPCD y del Condado de San Diego sobre el sulfuro de hidrógeno para la comunidad.
- Consulten los materiales que se incluyen en la página web de recursos para escuelas del Condado de San Diego para tomar decisiones informadas sobre las actividades diarias:
https://www.sandiegocounty.gov/content/sdc/hhsa/programs/phs/community_epidemiology/south-region-health-concerns/schools.html

Recomendaciones para los miembros de la comunidad:

- Monitoreen los niveles de sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana a través del sitio

web de monitoreo de la calidad del aire del SDAPCD:

<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>. Sigán las directrices del SDAPCD y del Condado de San Diego sobre el sulfuro de hidrógeno para la comunidad.

- Las personas sensibles a los olores ambientales pueden reducir su exposición usando purificadores de aire, limitando las actividades al aire libre cuando los olores sean molestos, manteniendo cerradas las puertas y ventanas cuando los olores del exterior sean desagradables, o abandonando el área según sea necesario cuando el monitoreo indique niveles elevados de sulfuro de hidrógeno. Eviten usar velas e incienso en el hogar para enmascarar los olores a sulfuro de hidrógeno. Las velas y el incienso en sí mismos pueden ser irritantes.
- Se anima a los residentes elegibles a obtener un purificador de aire gratuito a través del Programa de alivio para la mejora del aire del SDAPCD. Pueden encontrar información sobre el programa aquí:
<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/aire.html>.
Información sobre el mejor uso de los purificadores de aire:
<https://www.sdapcd.org/content/dam/sdapcd/documents/tjrv/aire/CARB-CleanAirSpace-Infographic.pdf> Los filtros purificadores de aire son más eficaces cuando se les da mantenimiento y se reemplazan según las instrucciones del fabricante.
- Reporten los olores en el valle del río Tijuana al SDAPCD llamando al (858) 586-2650 o enviando un correo electrónico a apcdcomp@sdapcd.org. Fuera del horario de atención, llamen al (858) 586-2650 y seleccionen la opción 2. También se puede descargar una aplicación para reportar olores a través del sitio web del SDAPCD dedicado a las inquietudes sobre la calidad del aire:
<https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/compliance/air-quality-complaints.html>.
- Se recomienda a las personas preocupadas por los efectos en la salud derivados de la exposición al sulfuro de hidrógeno que consulten a su médico. Consideren proporcionar una copia de la hoja informativa que resume este informe.

7.2. Plan de acción de salud pública

La ATSDR dará a conocer estos hallazgos al público. La ATSDR publicará más adelante un segundo informe que abordará otras posibles vías de exposición en el valle del río Tijuana, como la exposición a sustancias químicas presentes en el agua superficial, los sedimentos y el suelo.

Desde el 2024, la HHSA, el SDAPCD y la IBWC han tomado varias medidas para reducir los efectos de la exposición al sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana. Investigadores de la UCSD continúan recolectando datos de monitoreo del aire para informar a las agencias locales, estatales y federales sobre la presencia de contaminantes en el valle del río Tijuana. En el 2024, el SDAPCD lanzó un panel de información en línea que permite a las personas consultar los niveles de sulfuro de hidrógeno registrados en sus tres estaciones de monitoreo. Además, el SDAPCD notifica a los suscriptores mediante un sistema de alertas cuando los niveles de

sulfuro de hidrógeno superan los límites establecidos. El SDAPCD y la HHSA publicaron la "Guía comunitaria sobre el sulfuro de hidrógeno" para ofrecer orientación sobre los resultados de su monitoreo. El SDAPCD continúa monitoreando las quejas por olores y proporcionando purificadores de aire y filtros gratuitos a través del Programa de alivio para la mejora del aire, financiado con un millón de dólares adicionales para adquirir 3500 nuevos purificadores de aire [City News Service 2026].

La HHSA emitió una advertencia de salud y colaboró con los CDC y la ATSDR para realizar dos encuestas de salud comunitaria en el 2024 (ACE y CASPER). La HHSA se encuentra en las etapas iniciales de un estudio de caracterización de la exposición para comprender mejor el alcance de las exposiciones al sulfuro de hidrógeno, así como a otros contaminantes, en el valle del río Tijuana. El análisis y los resultados podrían servir de base para futuros estudios. La HHSA continúa brindando orientación a los miembros de la comunidad y convocando a expertos en la materia cuando el monitoreo indica niveles elevados de sulfuro de hidrógeno. El Condado de San Diego colaboró con la Ciudad de San Diego para colocar letreros en todo el valle del río Tijuana para informar a la población sobre la posible presencia de sulfuro de hidrógeno.

La IBWC continúa su labor binacional para ampliar la capacidad de la planta internacional de tratamiento de aguas residuales, implementar medidas de ingeniería para abordar los sedimentos y los flujos excesivos, y explorar opciones para eliminar el gas de sulfuro de hidrógeno de los caudales del río Tijuana [IBWC 2025a]. Múltiples agencias trabajan para identificar la mejor manera de reducir las emisiones de sulfuro de hidrógeno en el "punto crítico" del bulevar Saturn [SDPR 2026].

Los miembros de la comunidad pueden comunicarse con la oficina de la Región 9 de la ATSDR para obtener más información sobre los niveles y riesgos para la salud del sulfuro de hidrógeno en el valle del río Tijuana. En esta página web puede encontrar la información de contacto del personal: <https://www.atsdr.cdc.gov/regional-offices/index.html> o puede llamar al 800-CDC-INFO (800-232-4636).

8. Autores, equipo en el sitio y colaboradores

Jona Johnson, PhD, MPH, REHS, CPH, líder del equipo
Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
(ATSDR) Oficina de Evaluación de Peligros para la Salud de la
Comunidad (OCHHA)

Ben Gerhardstein, MPH, científico de salud ambiental (ATSDR/OCHHA)

Colaboradores: James Pyon, MS, becario de servicio asociado (ATSDR/OCHHA); Jamie Rayman, MPH, directora de la Región 9 (ATSDR/OCHHA); Venus Malloy, MS, NCC, LCMHC, LCAS, CCMHC, científica conductual (ATSDR/Oficina de Desarrollo de la Capacidad y Ciencia de la Prevención Aplicada [OCDAPS]); Terrell Perry, especialista en participación comunitaria (ATSDR/OCDAPS); Jessica Tomov, PhD, CPH, epidemióloga (ATSDR/OCHHA)

9. Referencias

- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2014. Environmental Odors. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 4, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/odors/about/index.html>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2016. Toxicological Profile for Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. February 3, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp114.pdf>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2022. Public Health Assessment Guidance Manual. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 24, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/resources/Full-PHA-Process-Explanation-508.pdf>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2023. ATSDR Division of Community Health Investigations Exposure Point Concentration Guidance for Discrete Sampling. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. December 8, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/resources/EPC-Guidance-for-Discrete-Sampling-508.pdf>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2024a. ATSDR Petition Program. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 12, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/programs/atsdr-petition-program.html>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2024b. ATSDR Background and Congressional Mandates. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 12, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/about/atsdr-background-and-congressional-mandates.html>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2024c. About Minimal Risk Levels. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 2, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/minimal-risk-levels/php/about/index.html>.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2025a. Overview of the Exposure Pathway Evaluation. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 2, 2025. https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/conducting_scientific_evaluations/exposure_pathways/overview_of_the_exposure_pathway_evaluation.html.
- [ATSDR] Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2025b. Evaluate the Evidence to Examine Non-Cancer Effects. Atlanta, GA. U.S. Department of Health and Human Services. September 4, 2025. https://www.atsdr.cdc.gov/pha-guidance/conducting_scientific_evaluations/indepth_toxicological_analysis/EvaluateEvidenceNon-CancerEffects.html.
- Batterman S, Grant-Alfieri A, Seo SH. Low level exposure to hydrogen sulfide: a review of emissions, community exposure, health effects, and exposure guidelines. Crit Rev Toxicol. Apr 2023;53(4):244-295. doi:10.1080/10408444.2023.2229925
- Brenneman KA, James RA, Gross EA, Dorman DC. Olfactory neuron loss in adult male CD rats following subchronic inhalation exposure to hydrogen sulfide. Toxicol Pathol. Mar-Apr 2000;28(2):326-33. doi:10.1177/019262330002800213
- [Bureau USC] U.S. Department of Commerce Economics and Statistics Administration n.d. San

- Diego County, Community Profile. Washington, DC. December 8, 2025.
https://data.census.gov/profile/San_Diego_County_California?g=050XX00US06073.
- Campagna D, Kathman SJ, Pierson R, Inerra SG, Phifer BL, Middleton DC, et al. Ambient hydrogen sulfide, total reduced sulfur, and hospital visits for respiratory diseases in northeast Nebraska, 1998-2000. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. Mar 2004;14(2):180-7. doi:10.1038/sj.jea.7500313
- [CDC/ATSDR] Centers for Disease Control and Prevention/Agency for Toxic Substances and Disease Registry 2025. Letter to the Honorable Alex Padilla. Office of U.S. Senator Alex Padilla December 8, 2025. <https://www.padilla.senate.gov/wp-content/uploads/Signed-Update-from-Dr.-Cohen-to-CA-members.pdf>.
- City News Service. 10K air purifiers delivered to South Bay residents impacted by Tijuana River pollution. <https://www.nbcsandiego.com/news/local/10k-air-purifiers-south-bay-residents/3967285/>
- City of San Diego. Tijuana River Valley Community Plan. Electronic. City of San Diego City Planning Department. Accessed December 8, 2025.
<https://www.sandiego.gov/planning/community-plans/tijuana-river-valley>
- Clark NA, Demers PA, Karr CJ, Koehoorn M, Lencar C, Tamburic L, et al. Effect of early life exposure to air pollution on development of childhood asthma. *Environ Health Perspect*. Feb 2010;118(2):284-90. doi:10.1289/ehp.0900916
- [CRWQCB] California Regional Water Quality Control Board 2024. Lower Tijuana River Indicator Bacteria and Trash Advanced Restoration Plan. San Diego, California. December 8, 2025.
https://www.waterboards.ca.gov/rwqcb9/water_issues/programs/tmdls/docs/tijuanariver_valley/2024_11_08_lower_tijuanariver_arp.pdf.
- [CSLC] California State Lands Commission 2025. Tijuana River Valley Transboundary Pollution Crisis. State of California. December 8, 2025. <https://www.slc.ca.gov/environmental-justice/trv-transboundary-pollution-crisis/>.
- [DPW] County of San Diego Department of Public Works n.d. DPW by the Numbers. San Diego, California. County of San Diego. September 12, 2025.
<https://www.sandiegocounty.gov/content/sdc/dpw/aboutdpw/numbers.html>
- [EPA] U.S. Environmental Protection Agency 2003a. Integrated Risk Information System – Hydrogen Sulfide; CASRN 7783-06-04. Washington, DC. December 9, 2025.
https://cfpub.epa.gov/ncea/iris2/chemicalLanding.cfm?substance_nmbr=61.
- [EPA] U.S. Environmental Protection Agency 2003b. Integrated Risk Information System (IRIS), Chemical Assessment Summary for Hydrogen Sulfide; 7783-06-4. Washington, DC. September 2, 2025. https://iris.epa.gov/static/pdfs/0061_summary.pdf.
- [EPA] U.S. Environmental Protection Agency 2021a. USMCA Tijuana River Watershed and Adjacent Coastal Transboundary Wastewater Flows. Washington, DC. November 24, 2025. <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/usmca-tijuana-river-watershed>.
- [EPA] U.S. Environmental Protection Agency 2021b. Metals: CADDIS Volume 2 - Metals in aquatic systems. Washington, DC. December 8, 2025.
<https://www.epa.gov/caddis/metals>.
- [EPA] U.S. Environmental Protection Agency 2024. Basic Information about the Integrated Risk Information System. Washington, DC. September 4, 2025.

- <https://www.epa.gov/iris/basic-information-about-integrated-risk-information-system>.
- [EPA] U.S. Environmental Protection Agency 2025. Memorandum of Understanding between the United Mexican States and the United States of America on Addressing the Sanitation and Environmental Crisis in the Tijuana–San Diego Region. Mexico City, Mexico. United States of America and United Mexican States. September 4, 2025. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2025-07/proy-mde-semarnat-epa-23jul25-ing-rev2-us-rev-24jul25rev-clcsc.pdf>.
- Glaser R, Kiecolt-Glaser JK. Stress-induced immune dysfunction: implications for health. *Nat Rev Immunol*. Mar 2005;5(3):243-51. doi:10.1038/nri1571
- [GRASP] Geospatial Research Analysis and Services Program 2022. SVI Interactive Map. Atlanta, GA. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. May 28, 2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/place-health/php/svi/svi-interactive-map.html>.
- Greenberg MI, Curtis JA, Vearrier D. The perception of odor is not a surrogate marker for chemical exposure: a review of factors influencing human odor perception. *Clin Toxicol (Phila)*. Feb 2013;51(2):70-6. doi:10.3109/15563650.2013.767908
- Haahtela T, Marttila O, Vilkkä V, Jäppinen P, Jaakkola JJ. The South Karelia Air Pollution Study: acute health effects of malodorous sulfur air pollutants released by a pulp mill. *Am J Public Health*. Apr 1992;82(4):603-5. doi:10.2105/ajph.82.4.603
- [HHSa] County of San Diego Health and Human Services Agency 2024a. Health Advisory: Cross-border pollution in the Tijuana River Valley and potential health effects San Diego, CA. September 13, 2025. https://www.sandiegocounty.gov/content/dam/sdc/hhsa/programs/phs/cahan/communications_documents/9-13-2024.pdf.
- [HHSa] County of San Diego Health and Human Services Agency 2024b. ATSDR Exposures Survey (ACE). San Diego, CA. September 1, 2025. https://www.sandiegocounty.gov/content/sdc/hhsa/programs/phs/community_epidemiology/south-region-health-concerns/ACE.html.
- [HHSa] County of San Diego Health and Human Services Agency 2024c. Tijuana River Valley Community Assessment for Public Health Emergency Response (CASPER). San Diego, CA. September 1, 2025. https://www.sandiegocounty.gov/content/sdc/hhsa/programs/phs/community_epidemiology/south-region-health-concerns/casper-study.html.
- [HHSa] County of San Diego Health and Human Services Agency n.d. Geography. San Diego, CA. September 13, 2025. https://www.sandiegocounty.gov/content/sdc/hhsa/statistics_geography.html.
- [IBWC] International Boundary and Water Commission 2023. Wastewater Treatment Plants. El Paso, TX. September 12, 2025. <https://www.ibwc.gov/wastewater-treatment-plants/>.
- [IBWC] International Boundary and Water Commission 2025a. United States and Mexico Sign Agreement to Address Border Sanitation Problem at San Diego California - Tijuana, Baja California Tijuana, Mexico. December 15, 2025.
- [IBWC] International Boundary and Water Commission 2025b. 'Ozone Nanobubble Technology' Pilot Project Update. El Paso, TX. December 8, 2025. <https://www.ibwc.gov/wp-content/uploads/2025/09/Ozone-Project-Statment.pdf>.
- Jaakkola JJ, Partti-Pellinen K, Marttila O, Miettinen P, Vilkkä V, Haahtela T. The South Karelia

- Air Pollution Study: changes in respiratory health in relation to emission reduction of malodorous sulfur compounds from pulp mills. *Arch Environ Health*. Jul-Aug 1999;54(4):254-63. doi:10.1080/00039899909602483
- Jäppinen P, Vilkkä V, Marttila O, Haahtela T. Exposure to hydrogen sulphide and respiratory function. *Br J Ind Med*. Dec 1990;47(12):824-8. doi:10.1136/oem.47.12.824
- Kilburn KH, Warshaw RH. Hydrogen sulfide and reduced-sulfur gases adversely affect neurophysiological functions. *Toxicol Ind Health*. Mar-Apr 1995;11(2):185-97. doi:10.1177/074823379501100206
- Legator MS, Singleton CR, Morris DL, Philips DL. Health effects from chronic low-level exposure to hydrogen sulfide. *Arch Environ Health*. Mar-Apr 2001;56(2):123-31. doi:10.1080/00039890109604063
- Lightfoot A. Warning Signs Installed in Parts of Tijuana River Valley. Electronic. County of San Diego. Updated August 20, 2025. Accessed November 24, 2025. <https://www.countynewscenter.com/warning-signs-installed-in-parts-of-tijuana-river-valley/>
- Marttila O, Jaakkola JJ, Vilkkä V, Jäppinen P, Haahtela T. The South Karelia Air Pollution Study: the effects of malodorous sulfur compounds from pulp mills on respiratory and other symptoms in children. *Environ Res*. Aug 1994;66(2):152-9. doi:10.1006/enrs.1994.1051
- NBC 7 San Diego. Toxic Tide: Fighting the sewage crisis at the U.S.-Mexico border. January 2, 2025. Accessed September 12, 2025. <https://www.youtube.com/watch?v=C42QTeUY4yg>
- [OEHHHA] State of California Office of Environmental Health Hazard Assessment 2021. CalEnviroScreen 4.0 California Environmental Protection Agency. September 13, 2025. <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/report/calenviroscreen-40>.
- [OSHA] Occupational Health and Safety Administration 2005. Hydrogen Sulfide OSHA Fact Sheet. Washington, DC. U.S. Department of Labor. December 8, 2025. https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/hydrogen_sulfide_fact.pdf.
- Partti-Pellinen K, Marttila O, Vilkkä V, Jaakkola JJ, Jäppinen P, Haahtela T. The South Karelia Air Pollution Study: effects of low-level exposure to malodorous sulfur compounds on symptoms. *Arch Environ Health*. Jul-Aug 1996;51(4):315-20. doi:10.1080/00039896.1996.9936031
- Pendergraft MA, Belda-Ferre P, Petras D, Morris CK, Mitts BA, Aron AT, et al. Bacterial and Chemical Evidence of Coastal Water Pollution from the Tijuana River in Sea Spray Aerosol. *Environ Sci Technol*. Mar 14 2023;57(10):4071-4081. doi:10.1021/acs.est.2c02312
- [R] R Foundation for Statistical Computing 2025. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria. February 3, 2025. <https://www.R-project.org/>.
- Rico B, Barsanti KC, Porter WC, Cysneiros de Carvalho K, Stigler-Granados P, Prather KA. Heavily polluted Tijuana River drives regional air quality crisis. *Science*. Aug 28 2025;389(6763):eadv1343. doi:10.1126/science.adv1343
- Schiffman SS, Miller EA, Suggs MS, Graham BG. The effect of environmental odors emanating from commercial swine operations on the mood of nearby residents. *Brain Res Bull*. 1995;37(4):369-75. doi:10.1016/0361-9230(95)00015-1
- Schiffman SS, Walker JM, Dalton P, Lorig TS, Raymer JH, Shusterman D, et al. Potential health

- effects of odor from animal operations, wastewater treatment, and recycling of byproducts. *J Agromedicine*. 2000;7(1):7-81.
- Schiffman SS, Williams CM. Science of odor as a potential health issue. *J Environ Qual*. Jan-Feb 2005;34(1):129-38.
- [SDAPCD] San Diego County Air Pollution Control District 2024. Air Quality Monitoring. San Diego, CA. San Diego County. September 12, 2025. <https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/tjrv-air-quality-monitoring.html>.
- [SDAPCD] District SDAPC 2025a. Air Purifier Program Feedback Survey Report. San Diego, CA. December 16, 2025. <https://www.sdapcd.org/content/dam/sdapcd/documents/tjrv/aire/Air%20Purifier%20Program%20Survey%20Report.pdf>.
- [SDAPCD] San Diego County Air Pollution Control District 2025b. Air Improvement Relief Effort Program. San Diego, CA. San Diego County. November 24, 2025. <https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/about/tj-river-valley/aire.html>.
- [SDAPCD] San Diego County Air Pollution Control District 2025c. Air Quality Complaints. San Diego, CA. San Diego County. September 12, 2025. <https://www.sdapcd.org/content/sdapcd/compliance/air-quality-complaints.html>.
- [SDPR] Recreation CoSDDoPa 2026. Saturn Boulevard Feasibility Study. San Diego, California. February 26, 2026. https://www.sdparks.org/content/dam/sdparks/en/pdf/BrochuresMiscellaneous/SB_Feasibility_Study_Final_public%20version.pdf.
- [SDREDC] San Diego Regional Economic Development Corporation 2024. About the Region. San Diego, CA. November 24, 2025. <https://www.sandiegobusiness.org/about-the-region/>
- [SDRWQCB] San Diego Regional Water Quality Control Board n.d. USIBWC Spill Events and Transboundary Flow Events from Mexico into the San Diego Region. San Diego, CA. State of California. September 12, 2025. https://www.waterboards.ca.gov/sandiego/water_issues/programs/tijuana_river_valley_strategy/sewage_issue.html.
- Shi DS. Letter from D.S. Shi, Division of Field Studies and Engineering, National Institute for Occupational Safety and Health, Centers for Disease Control, U.S. Department of Health and Human Services, to E. Cortez, Chief Administrative Officer, City of Imperial Beach, March 25, 2025.
- Soto J. IBWC continues pilot project to clean the Tijuana River. *The Coronado News*. October 6, 2025. Accessed November 24, 2025. <https://thecoronadonews.com/2025/10/ibwc-continues-pilot-project-to-clean-the-tijuana-river/>
- Szczęśna D, Wieczorek K, Jurewicz J. An exposure to endocrine active persistent pollutants and endometriosis - a review of current epidemiological studies. *Environ Sci Pollut Res Int*. Feb 2023;30(6):13974-13993. doi:10.1007/s11356-022-24785-w
- Tétreault LF, Doucet M, Gamache P, Fournier M, Brand A, Kosatsky T, et al. Childhood Exposure to Ambient Air Pollutants and the Onset of Asthma: An Administrative Cohort Study in Québec. *Environ Health Perspect*. Aug 2016;124(8):1276-82. doi:10.1289/ehp.1509838
- [U.S. Census Bureau] U.S. Department of Commerce Economics and Statistics Administration 2012. American Community Survey 5-year estimates: 2008–2012. Washington, DC. 2025.

Apéndice

Apéndice A: Resumen breve del proceso de evaluación de salud pública (PHA) de la ATSDR

La ATSDR sigue el proceso de PHA para determinar:

- Si se está exponiendo a sustancias tóxicas a las personas que viven cerca de un sitio de desechos peligrosos
- Si dicha exposición es dañina
- Qué medidas deben tomarse para detener o reducir la exposición

El proceso de PHA es un enfoque sistemático, paso a paso, mediante el cual la ATSDR:

- Establece mecanismos de comunicación, lo que incluye [involucrar a las comunidades](#) desde el inicio de las actividades en el sitio y mantenerlas participativas durante todo el proceso para responder a sus inquietudes sobre la salud.
- Recolecta muchos tipos diferentes de [información del sitio](#)
- Obtiene, recolecta y evalúa la utilidad y la calidad de los [datos de los muestreos](#) ambientales y biológicos (y, en ocasiones, los datos de modelado) para examinar la contaminación ambiental en un sitio.
- Lleva a cabo cuatro evaluaciones científicas principales y secuenciales
 - Las [evaluaciones de las vías de exposición](#) identifican situaciones de exposición específicas del sitio (pasadas, presentes y futuras), clasificándolas como completadas, potenciales o eliminadas.
 - Los [análisis de detección](#) comparan los datos de los muestreos disponibles con los niveles de detección ambiental específicos para cada medio (valores de comparación [CV] de la ATSDR y niveles de detección ajenos a la ATSDR). Este proceso identifica posibles contaminantes de interés que requieren más evaluación para determinar si existen vías de exposición completas o potenciales.
 - Las [concentraciones en el punto de exposición \(EPC\) y los cálculos de exposición](#) corresponden a los contaminantes señalados como contaminantes que requieren más evaluación en relación con las vías de exposición completas y potenciales. Consiste en calcular las EPC, usar las EPC para realizar cálculos que caractericen la exposición y determinar qué escenarios de exposición específicos del sitio requieren un análisis toxicológico exhaustivo de los efectos.
 - Las [evaluaciones toxicológicas exhaustivas](#), si fueran necesarias, se basan en las tres evaluaciones científicas previas. Este paso examina con mayor detalle la información sobre la toxicidad de cada contaminante específico

en el contexto de las exposiciones en el sitio. Esta evaluación también puede ayudar a determinar si existe la posibilidad de que se produzcan efectos en la salud, tanto cancerígenos como no cancerígenos, y cuáles podrían ser esos efectos.

- Resume los hallazgos y los próximos pasos, reconociendo las incertidumbres y limitaciones. Proporciona recomendaciones a las entidades relacionadas con el sitio, las agencias colaboradoras y las comunidades para prevenir y minimizar las exposiciones dañinas.

La secuencia de pasos puede variar según factores específicos del sitio. Por ejemplo, los evaluadores de salud podrían definir una unidad de exposición antes o después del análisis de detección, o refinar los cálculos de EPC a medida que realizan su análisis específico para el sitio.

Para obtener más detalles sobre el proceso de PHA, consulte la [Explicación de la ATSDR sobre la evaluación del proceso de PHA](#). Los lectores también pueden consultar el [Manual de orientación de la ATSDR sobre evaluaciones de salud pública](#) para obtener toda la información relacionada con el proceso de PHA paso a paso.

Apéndice B: Tablas y figuras adicionales

La [Tabla 15](#) muestra las diferencias entre los promedios móviles de 30 minutos (p. ej., la EPC aguda) de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno durante el día en comparación con las de la noche. Las horas diurnas y nocturnas se determinaron usando el paquete *Openair* R, que usa los métodos de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) [R 2025].

Tabla 15: Comparación de las EPC agudas diurnas y nocturnas

Ubicación	Hora del día	EPC (ppb)*
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	Día	48
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	Noche	44
Escuela primaria Berry	Día	318
Escuela primaria Berry	Noche	749
Avenida Leon	Día	2245
Avenida Leon	Noche	3021
Centro Cívico de Imperial Beach	Día	54
Centro Cívico de Imperial Beach	Noche	333

Abreviaturas: EPC = concentración en el punto de exposición; ppb = partes por mil millones

*Promedio móvil máximo de 30 minutos

La [Figura 5](#) muestra los gráficos polares de las cuatro ubicaciones de monitoreo con equipos Teledyne T101.

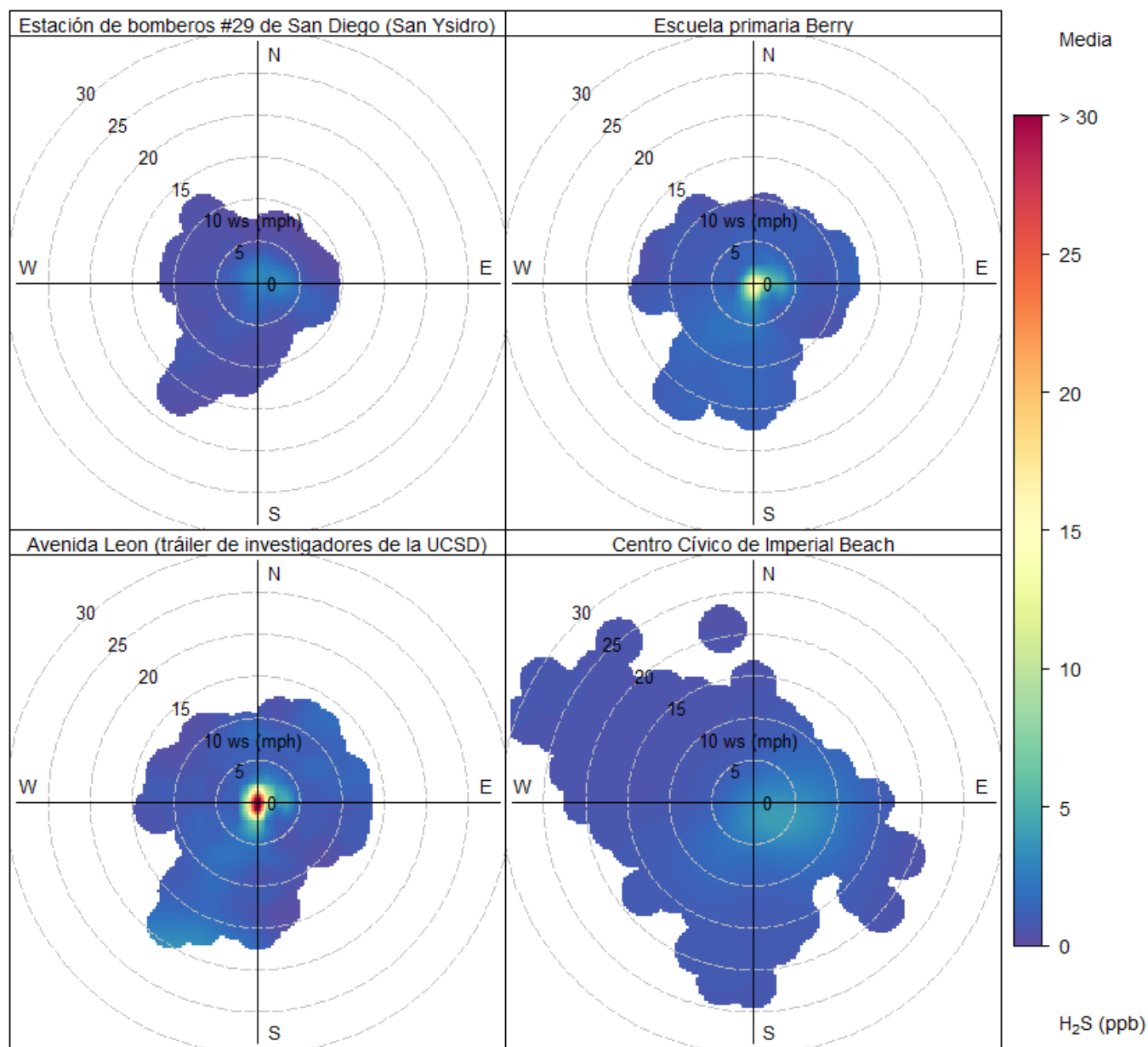


Figura 5: Gráficos polares basados en datos de Teledyne T101 de las ubicaciones de monitoreo

Abreviaturas: W = oeste; N = norte; S = sur; E = este; ws = velocidad del viento (millas por hora); H₂S = sulfuro de hidrógeno (ppb)

La [Figura 6](#) muestra las concentraciones diarias promedio de sulfuro de hidrógeno (calculadas sobre un periodo de 24 horas) para cada una de las cuatro ubicaciones de monitoreo. Las líneas horizontales de la figura indican el umbral de olor del sulfuro de hidrógeno y los niveles de detección que la ATSDR usó para evaluar las exposiciones agudas (70 ppb), intermedias (20 ppb) y crónicas (1.4 ppb). En las cuatro ubicaciones, la mayoría de las concentraciones diarias promedio de sulfuro de hidrógeno superaron el umbral de olor de esta sustancia y la RfC de la EPA (es decir, el nivel de detección para exposiciones

crónicas). En ocasiones, las concentraciones diarias promedio excedieron el valor de detección para exposiciones intermedias (es decir, el MRL intermedio). En raras ocasiones, la concentración de sulfuro de hidrógeno excedió el valor de detección de la ATSDR para exposiciones agudas (es decir, el MRL agudo). Estos hallazgos no indican necesariamente un riesgo para la salud, pero muestran cómo se situaron las concentraciones diarias de sulfuro de hidrógeno entre septiembre del 2024 y mayo del 2025 en relación con los valores que, según la ATSDR, requieren mayor atención. Para comparar las EPC con los valores orientativos de salud se usaron EPC más adecuadas, pero los promedios diarios ofrecen una forma más sencilla de visualizar dicha comparación.

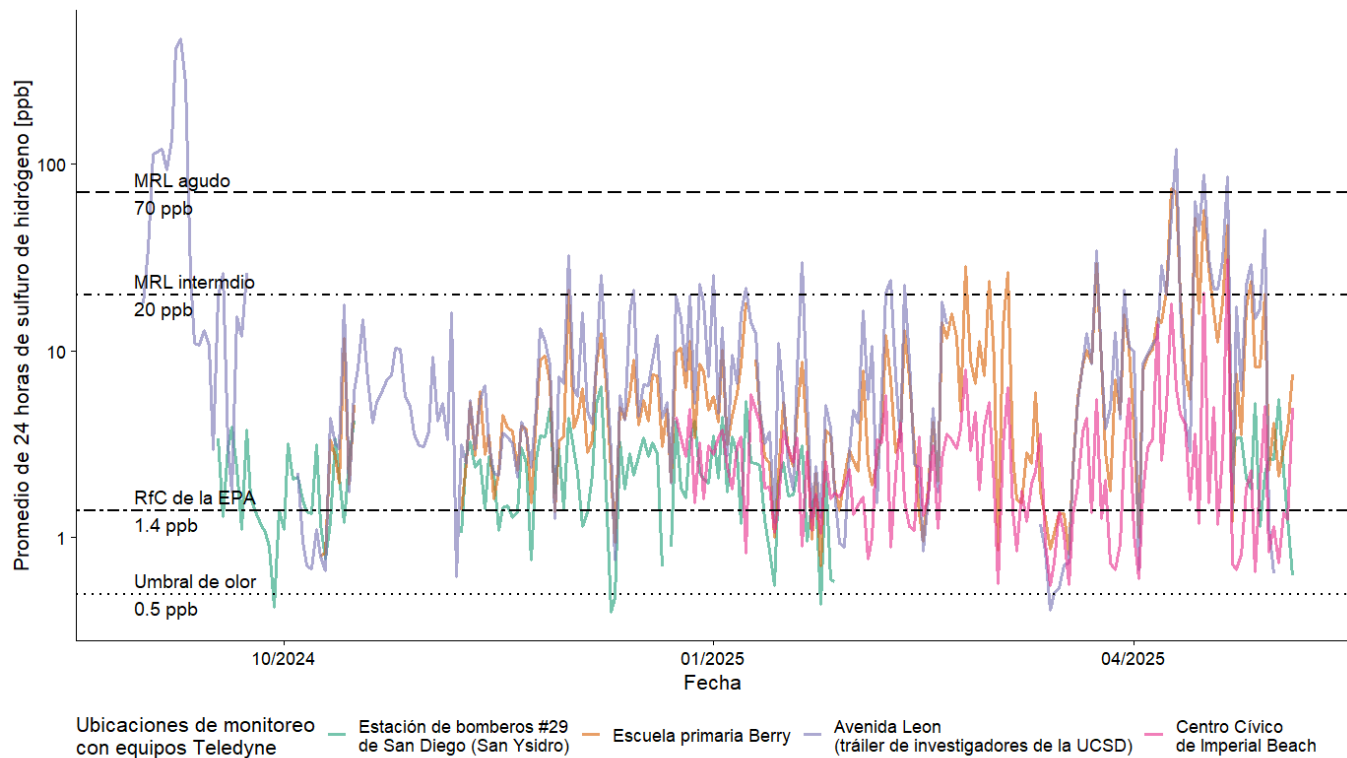


Figura 6: Concentraciones diarias promedio de sulfuro de hidrógeno en comparación con los valores orientativos de salud

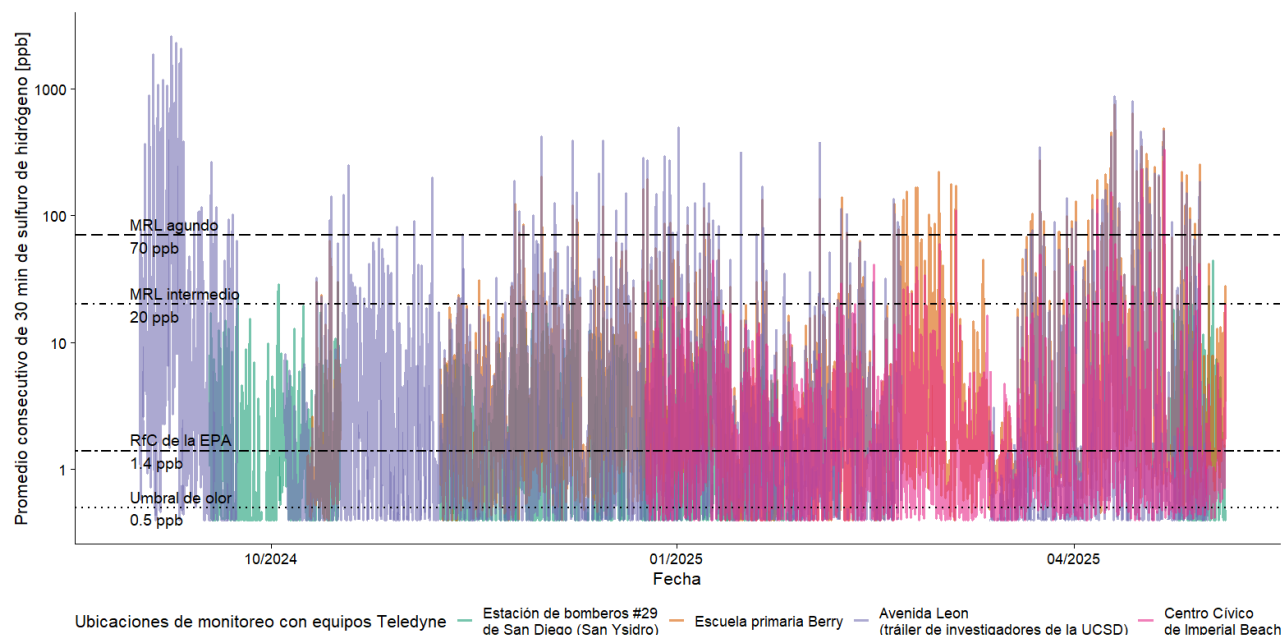


Figura 7: Promedios consecutivos de 30 minutos comparados con los valores orientativos de salud para el sulfuro de hidrógeno

El SDAPCD documenta las quejas de los residentes sobre olores en el área de South Bay [SDAPCD 2025c] a través de una aplicación, por teléfono y por correo electrónico. Para analizar las quejas por olores, la ATSDR calculó promedios móviles de dos días de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno para cada ubicación de monitoreo. La ATSDR seleccionó un periodo de dos días para tener en cuenta que algunas personas podrían no reportar un olor fuerte percibido durante la noche hasta la mañana siguiente. La ATSDR comparó los promedios móviles de dos días con la cantidad de quejas por olores, convertidas también a promedios móviles de dos días y observó que las quejas parecen seguir una tendencia similar a la de las concentraciones de sulfuro de hidrógeno. Los resultados para cada una de las cuatro ubicaciones de monitoreo se presentan en la [Figura 8](#) (escuela primaria Berry), la [Figura 9](#) (avenida Leon), la [Figura 10](#) (Centro Cívico de Imperial Beach) y la [Figura 11](#) (estación de bomberos #29 de San Diego, en San Ysidro).

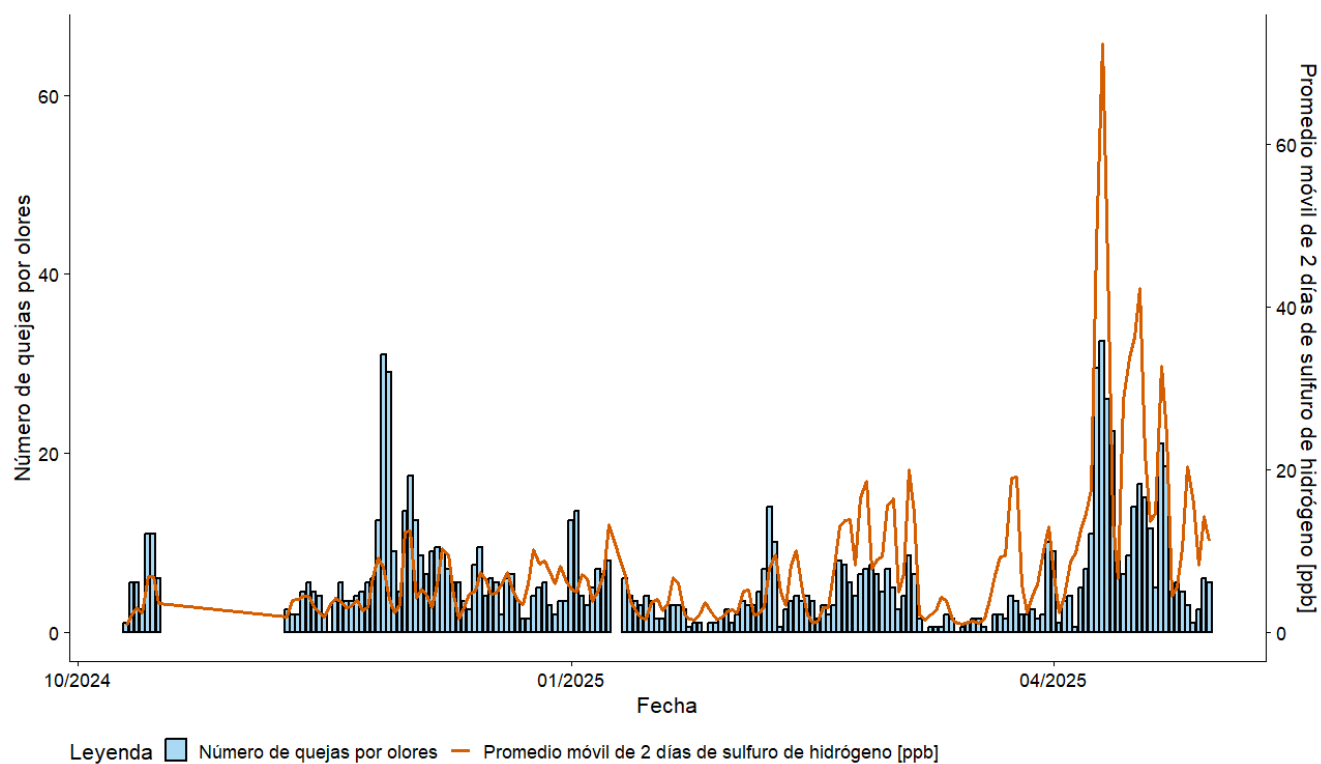


Figura 8: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en la escuela primaria Berry

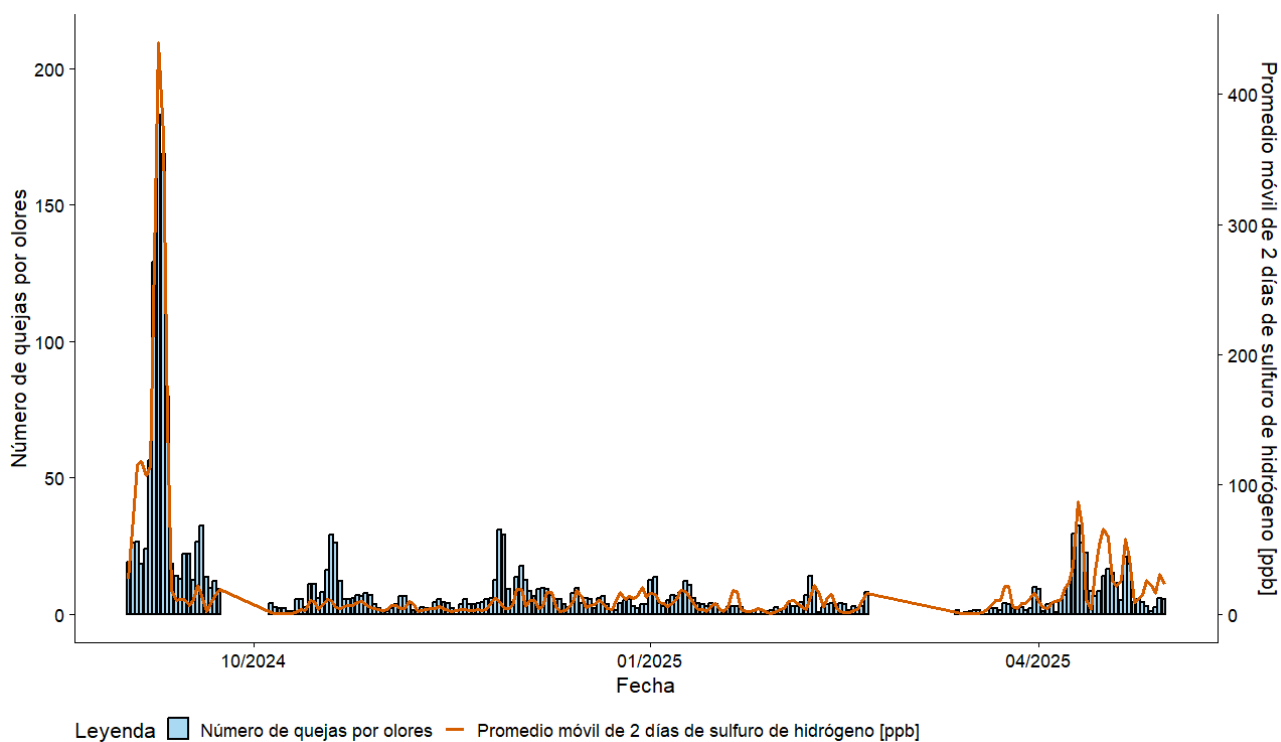


Figura 9: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en la avenida Leon

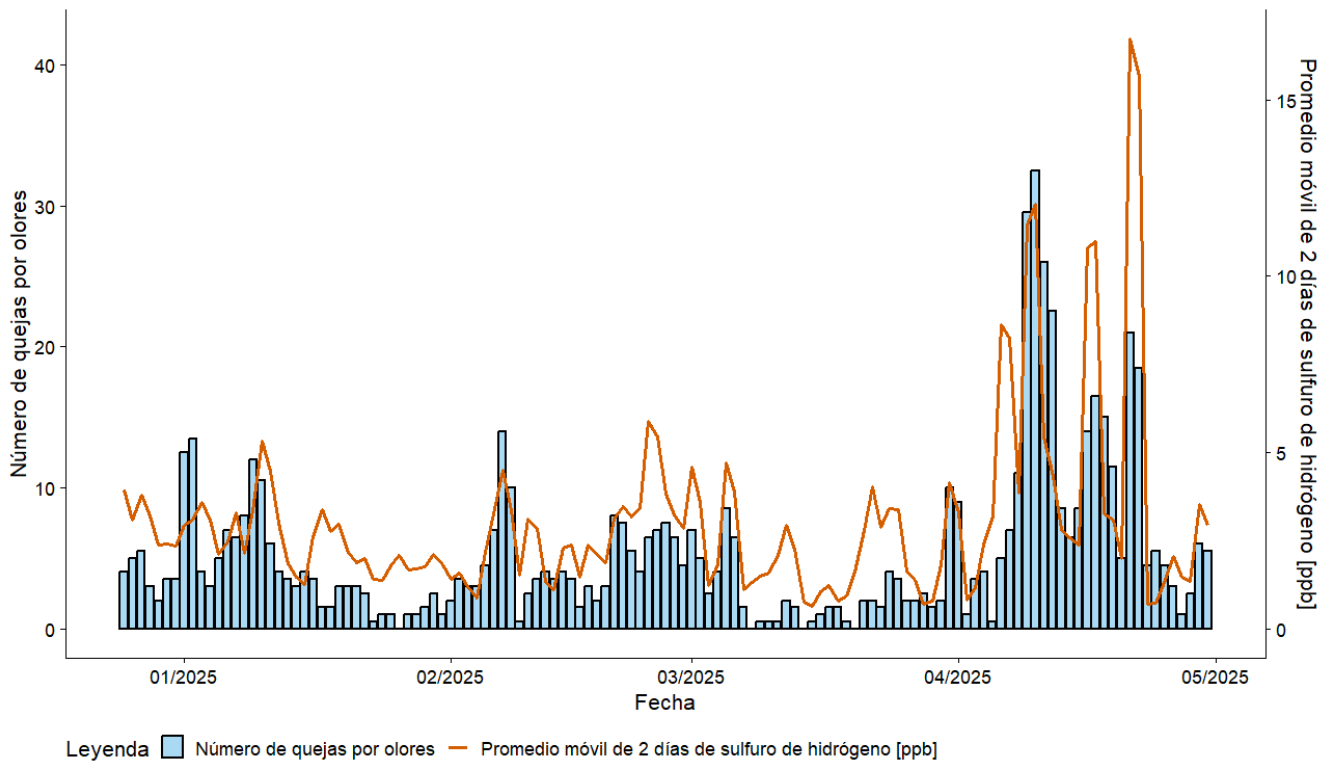


Figura 10: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en el Centro Cívico de Imperial Beach

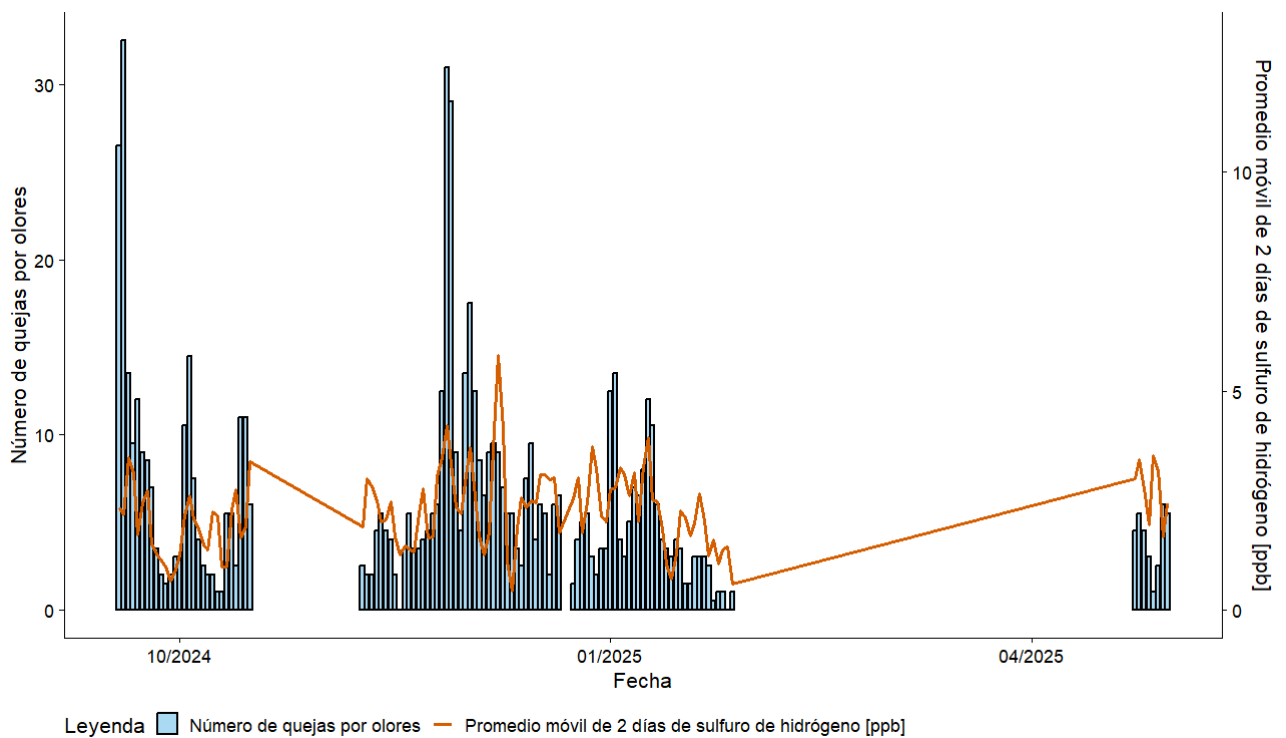


Figura 11: Concentraciones promedio de sulfuro de hidrógeno de dos días comparadas con las quejas por olores en la estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)

La ATSDR analizó los datos del flujo del río registrados cada hora junto con los datos de sulfuro de hidrógeno (promediados por hora) obtenidos en la avenida Leon. La [Figura 12](#) muestra la comparación entre el flujo del río y las concentraciones de H₂S durante el monitoreo inicial de sulfuro de hidrógeno realizado por la UCSD en el sitio de la avenida Leon, entre el 1 y el 22 de septiembre del 2024. Visualmente, los picos de sulfuro de hidrógeno coincidieron estrechamente con los picos del flujo del río. En la estación de bomberos de San Ysidro se observó una correlación significativa entre el flujo del río y las concentraciones de sulfuro de hidrógeno, aunque el coeficiente de correlación es bajo (coeficiente de correlación de rangos tau de Kendall = 0.053; $p < 0.001$). En las otras ubicaciones de monitoreo con equipos Teledyne T101 no hubo correlaciones significativas.

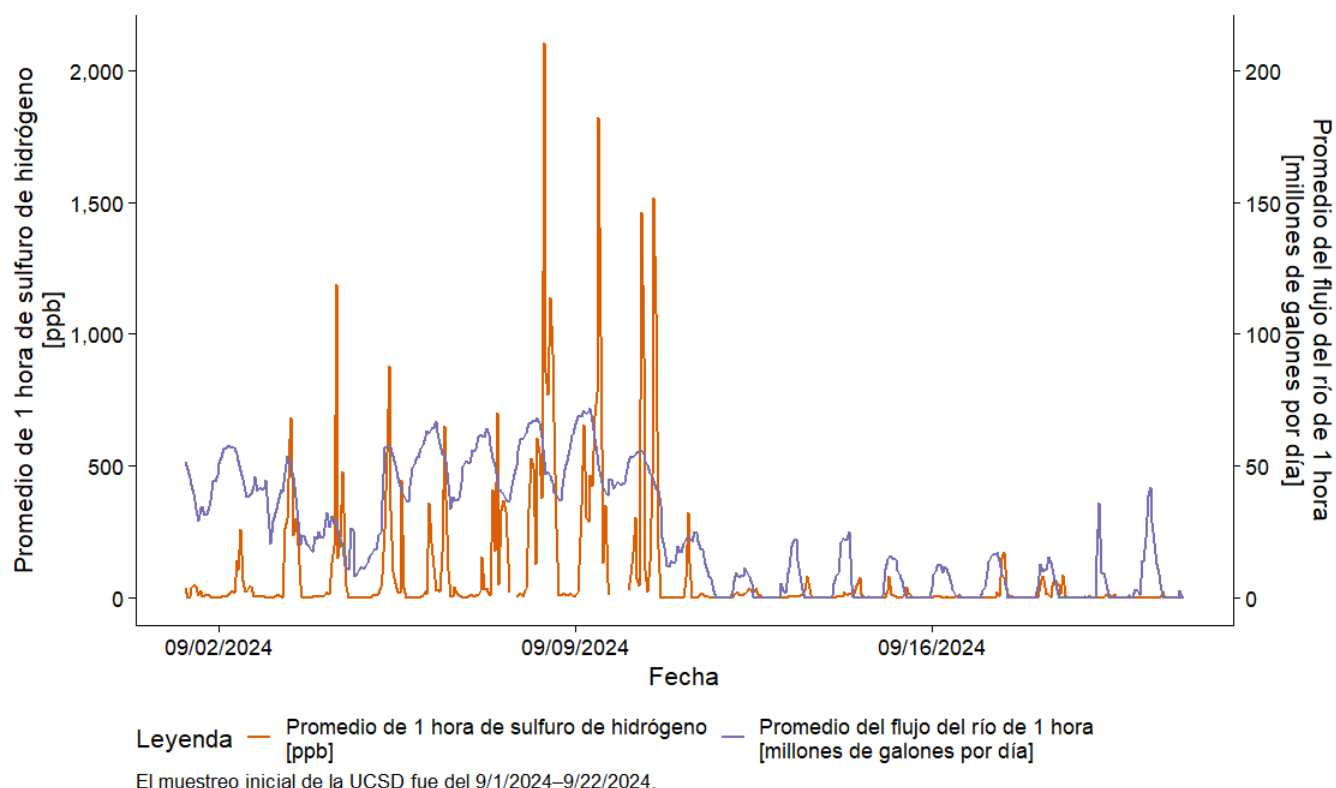


Figura 12: Estimaciones del caudal del río Tijuana registradas por hora en comparación con las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el sitio de monitoreo en la avenida Leon del 1 al 22 de septiembre del 2024

La [Figura 13](#) muestra las EPC agudas (promedio móvil de 30 minutos) durante el día y la noche. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno se mantuvieron por debajo del MRL agudo la mayor parte del tiempo, pero llegaron a exceder ese límite en la escuela primaria Berry, en la avenida Leon y en el Centro Cívico de Imperial Beach. En el Centro Cívico de Imperial Beach, la excedencia del límite ocurrió únicamente durante la noche. También se produjeron excedencias en la escuela primaria Berry y en la avenida Leon durante la noche.

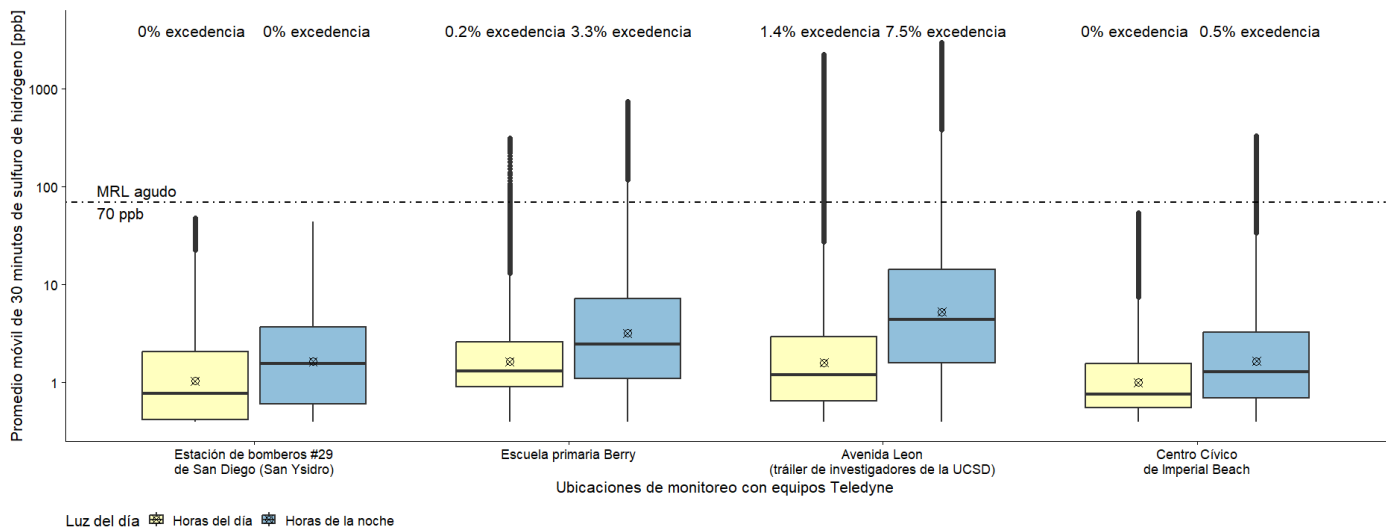


Figura 13: EPC agudas durante el día y la noche por ubicación comparadas con el MRL agudo de sulfuro de hidrógeno

La [Figura 14](#) muestra las EPC intermedias (promedio móvil de 14 días) por ubicación. Las concentraciones de sulfuro de hidrógeno se mantuvieron por debajo del MRL intermedio la mayor parte del tiempo, pero excedieron el MRL intermedio en la escuela primaria Berry y en la avenida Leon. La ATSDR no analizó los datos según el horario diurno o nocturno, ya que el promedio móvil de 14 días incluía ambos momentos del día.

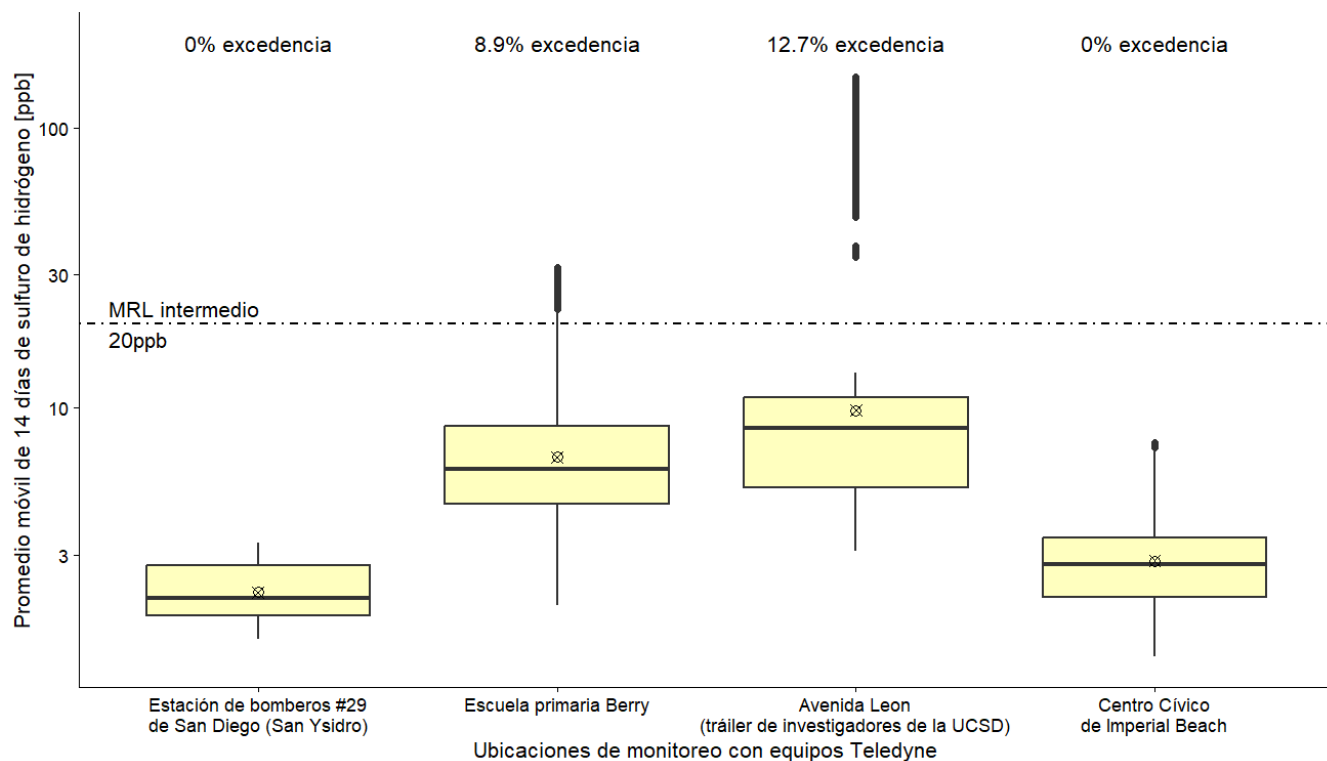


Figura 14: EPC intermedias durante el día y la noche por ubicación comparadas con el MRL intermedio de sulfuro de hidrógeno

Apéndice C: Correlación entre los sitios de monitoreo de la avenida Leon y la escuela primaria Berry

La ATSDR evaluó el grado de correlación entre las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en la escuela primaria Berry y en la avenida Leon cuando se disponía de datos de ambos sitios a la vez. Se aplicó la prueba de correlación de rangos tau de Kendall a los datos sin procesar (de un minuto) entre cada sitio de monitoreo con equipos Teledyne para determinar qué ubicaciones presentaban una mayor correlación entre sí ([Figura 15](#)). Los resultados indicaron que los sitios de monitoreo de la avenida Leon y de la escuela primaria Berry mostraban la correlación más alta, por lo que requerían un análisis más detallado.

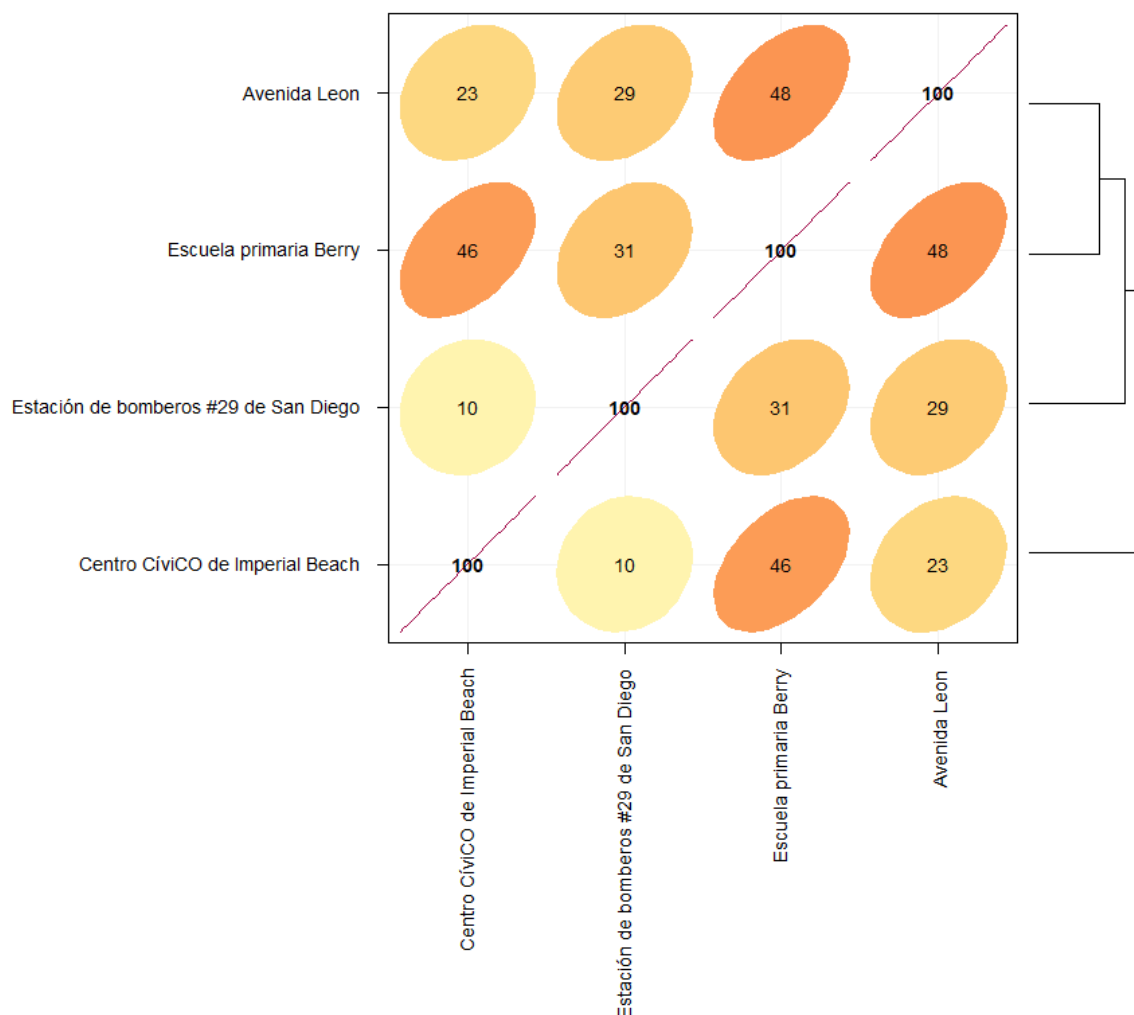


Figura 15: Gráfico de correlación de rangos tau de Kendall para todos los sitios de monitoreo

La ATSDR también analizó la correlación cruzada entre cada sitio. Primero, usó la prueba de Dickey-Fuller aumentada (ADF) para determinar si los datos de la serie temporal de cada sitio eran estacionarios (es decir, si no presentaban una tendencia al alza o a la baja). La [Tabla 16](#) muestra los resultados de la prueba ADF. Los valores negativos de ADF de mayor magnitud favorecen con mayor fuerza la estacionariedad. Si el valor de p es menor que 0.05,

rechazamos la hipótesis nula de que la serie temporal tiene una raíz unitaria y aceptamos la hipótesis alternativa de que la serie temporal es estacionaria, lo que significa que la serie temporal tiene una media y una varianza constantes a lo largo del tiempo.

Tabla 16: Resultados de la prueba de Dickey-Fuller aumentada (ADF)

Sitio	ADF	Valor de p
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	-24.2	<0.01
Escuela primaria Berry	-34.7	<0.01
Avenida Leon	-30.6	<0.01
Centro Cívico de Imperial Beach	-26.8	<0.01

Abreviatura: ADF Prueba de Dickey-Fuller aumentada

Dado que todos los sitios presentan series temporales estacionarias, se calculó la correlación cruzada entre cada una. La [Tabla 17](#) muestra la correlación cruzada máxima en cada sitio y su respectivo desfase. El monitoreo del aire en la avenida Leon y la escuela primaria Berry presentó la correlación más alta, de 0.69.

Tabla 17: Correlación cruzada entre sitios de monitoreo

Sitio	Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	Escuela primaria Berry	Avenida Leon	Centro Cívico de Imperial Beach
Estación de bomberos #29 de San Diego (San Ysidro)	--	0.17 (desfase -7)	0.18 (desfase 42)	0.06 (desfase -1)
Escuela primaria Berry	--	--	0.69 (desfase -7)	0.35 (desfase -62)
Avenida Leon	--	--	--	0.28 (desfase -78)
Centro Cívico de Imperial Beach	--	--	--	--

Los monitores Teledyne T101 de la escuela primaria Berry y la avenida Leon estaban ubicados cerca el uno del otro, por lo que se analizó más a fondo la correlación entre ambos. En el gráfico de correlación cruzada de la [Figura 16](#), que compara las mediciones de la escuela Berry Elementary y de la avenida Leon emparejadas por fecha y hora, se observa un desfase máximo de 120 (es decir, dos horas). Para todos los valores de desfase, la correlación cruzada entre los monitores Teledyne de la escuela primaria Berry y la avenida Leon es mayor que cero. La correlación cruzada entre los monitores alcanza su valor más alto con un desfase de aproximadamente cinco minutos.

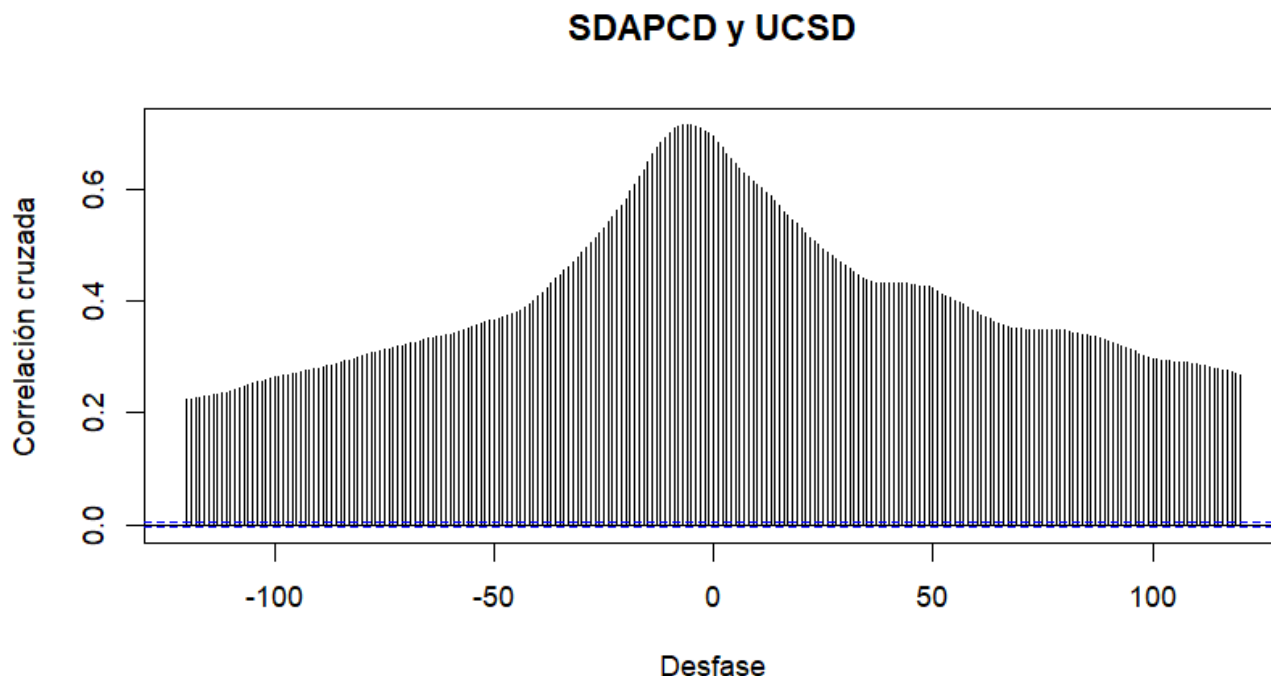


Figura 16: Gráfico de correlación cruzada entre la escuela primaria Berry y la avenida Leon

La ATSDR también analizó las correlaciones y las diferencias de las medianas entre ambos sitios. Mediante la prueba de coeficiente de correlación tau de Kendall, la ATSDR determinó que la correlación entre los dos monitores era significativa, con un valor de $r = 0.49$. En una prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras emparejadas, la ATSDR halló que las diferencias eran significativas ($p < 0.001$), con una diferencia de 0.69 ppb; no obstante, dicha diferencia resultó pequeña (tamaño del efecto de 0.27).

Al examinar los pares correspondientes únicamente de los datos de monitoreo de la escuela primaria Berry y la avenida Leon (monitores Teledyne T101), la ATSDR encontró que hay tres periodos de tiempo distintivos creados por datos faltantes. Estos periodos corresponden a los momentos en que se disponía de datos de ambos monitores Teledyne T101. La ATSDR analizó las correlaciones y diferencias entre los monitores Teledyne para cada uno de estos periodos ([Figura 17](#)).

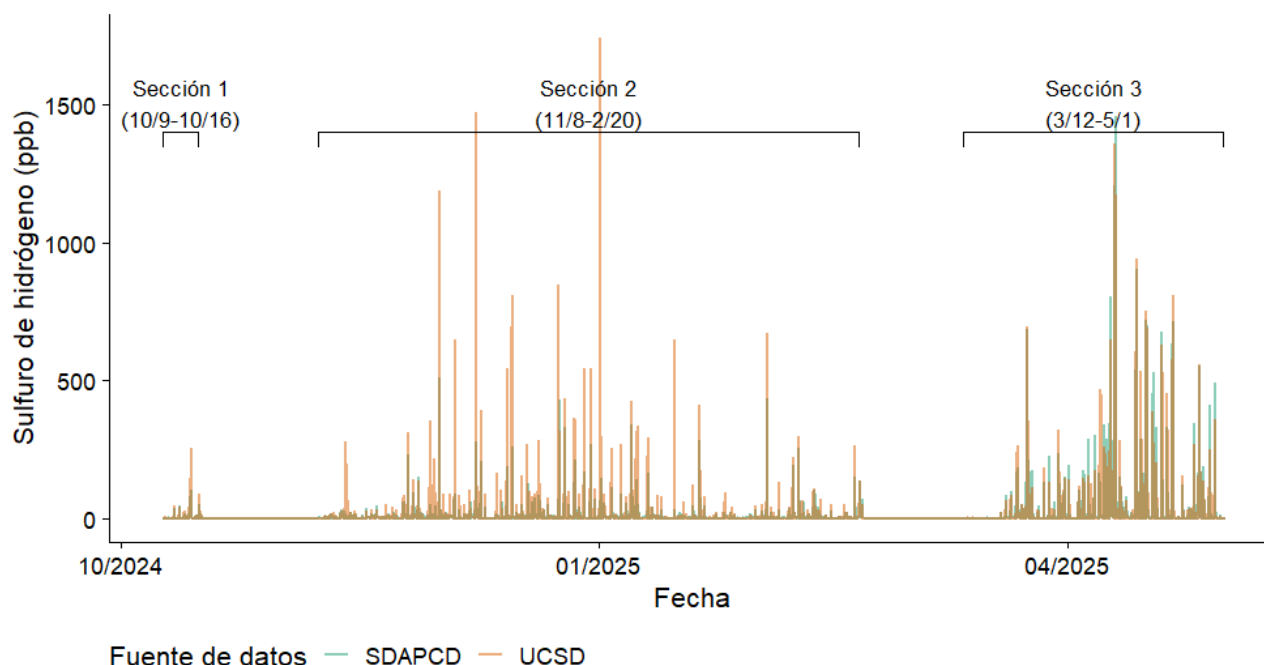


Figura 17: Concentraciones equiparadas de sulfuro de hidrógeno para la avenida Leon y la escuela primaria Berry

La [Tabla 18](#) muestra el coeficiente de correlación tau de Kendall y la prueba de rangos con signo de Wilcoxon emparejada con el tamaño del efecto para cada periodo y para todos los periodos de tiempo en conjunto. Se halló una correlación significativa y diferencias significativas entre los dos monitores Teledyne de la escuela primaria Berry y la avenida Leon, con un tamaño del efecto que osciló entre pequeño y moderado.

Tabla 18: Coeficiente de correlación tau de Kendall, prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras emparejadas y tamaño del efecto para cada periodo (avenida Leon y escuela primaria Berry)

Periodo	Correlación tau de Kendall (significancia de la prueba)	Prueba de rango con signo de Wilcoxon para muestras emparejadas: diferencia de medianas (significancia de la prueba)	Prueba de rango con signo de Wilcoxon para muestras emparejadas (tamaño del efecto)
Periodo 1	0.40 (***)	0.12 ppb (***)	0.19 (pequeño)
Periodo 2	0.41 (***)	0.50 ppb (***)	0.20 (pequeño)
Periodo 3	0.64 (***)	1.65 ppb (***)	0.43 (moderado)
Periodo de tiempo completo	0.49 (***)	0.69 ppb (***)	0.27 (pequeño)

***El valor de p de la prueba estadística es menor que 0.001.

MLS-366817
Professionally Verified Translation (PVTr)