

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN FÍSICA COMPUTACIONAL

Tema:

“ANÁLISIS DEL RUIDO NATURAL Y
ANTROPOGÉNICO DEL PARQUE NACIONAL YASUNÍ
USANDO TÉCNICAS AVANZADAS DE MACHINE
LEARNING”

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Grado Académico
de Magister en Física Aplicada, mención Física Computacional

Autora: Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

Director: Físico Christian Leonardo Vásquez Vega, PhD

Ambato-Ecuador

2022

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia Magister, e integrado por los señores: Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez, PhD, Ing. Víctor Santiago Manzano Villafuerte, Mg, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “ANÁLISIS DEL RUIDO NATURAL Y ANTROPOGÉNICO DEL PARQUE NACIONAL YASUNÍ USANDO TÉCNICAS AVANZADAS DE MACHINE LEARNING” elaborado y presentado por la señora, Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo, para optar por el Grado Académico de Magister en Física Aplicada, mención Física Computacional; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg
Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez, PhD
Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. Víctor Santiago Manzano Villafuerte, Mg
Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La Responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “ANÁLISIS DEL RUIDO NATURAL Y ANTROPOGÉNICO DEL PARQUE NACIONAL YASUNÍ USANDO TÉCNICAS AVANZADAS DE MACHINE LEARNING”, le corresponde exclusivamente a: Ing, Geoconda Marisela Velasco Castelo, Autor bajo la Dirección del Físico, Christian Leonardo Vásquez Vega, PhD, Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

AUTORA

Fís. Christian Leonardo Vásquez Vega, PhD.

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

C.C. 0603339599

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
AGRADECIMIENTO	xi
DEDICATORIA	xii
RESUMEN EJECUTIVO	xiii
EXECUTIVE SUMMARY	xv
1 El problema de investigación	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos específico	4
2 Antecedentes investigativos	5
3 Marco Metodológico	17
3.1 Ubicación	17
3.2 Equipos y materiales	18
3.3 Tipo de investigación	18
3.4 Prueba de hipótesis - pregunta científica - idea a defender	18
3.5 Población o muestra	19
3.6 Recolección de información	19
3.7 Procesamiento de la información	20
3.8 Modelo de propagación sin obstáculos	38
3.9 Modelo de propagación con inclusión de obstáculos	42
3.10 Modelo de propagación sobre el suelo	47

3.11	Variables respuesta o resultados alcanzados	54
4	Resultados y Discusión	56
4.1	Salida de campo: Reserva Biológica de Limoncocha	56
4.2	Salida de campo: Parque Nacional Yasuní	59
4.3	Parámetros considerados en el modelo teórico	61
4.4	Propagación sonora	62
5	Conclusiones, Recomendaciones, Bibliografía	72
5.1	Conclusiones y recomendaciones	72
5.2	Bibliografía	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Factores de Direccionalidad [Hansen, 2001]	39
Tabla 3.2	Dispersión de la zona de atenuación ΔL en función de la altura normalizada H' . El coeficiente de absorción de los obstáculos dispersos Υ y el valor efectivo normalizado de la distancia a través de la zona R' [Plovsing and Kragh, 2000].	45
Tabla 3.3	Fracción de sonido coherente, k_f , y el producto k_a entre la longitud de onda k y el radio medio del tronco $a = d/2$ [Fernandez, 2002].	47
Tabla 3.4	Tipos de impedancia de suelo en función de la clase y la resistividad de flujo [Plovsing and Kragh, 2000].	53
Tabla 4.1	34 puntos de medición de las variables atmosféricas: nivel de presión sonora (dB), frecuencia (Hz), elevación (msnm), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y velocidad del viento (km/h). Puntos ubicados desde el ingreso a la estación NPF en la Estación Científica Yasuní a lo largo del trayecto de 950m con una separación entre puntos de 30m.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Gráfico que representa la geometría entre la fuente y el receptor. Con un rayo directo y un rayo reflejado. La impedancia del aire es Z_1 y la impedancia del suelo es Z_2	14
Figura 3.1 Ubicación del Parque Nacional Yasuní en el mapa de la región amazónica del Ecuador.	17
Figura 3.2 Propagación de una onda acústica esférica. El nivel de presión disminuye mientras la onda se propaga lejos de la fuente de manera uniforme omnidireccional.	36
Figura 3.3 Una fuente S ubicada a una altura z_s y un receptor R ubicado a una altura z_r , la distancia de recorrido del sonido R_{sc} en el bosque cuando el obstáculo de altura H sobrepasa la altura de la fuente.	44
Figura 3.4 Una fuente S ubicada a una altura z_s y un receptor R ubicado a una altura z_r , la distancia de recorrido del sonido R_{sc} en el bosque cuando la fuente sobrepasa el obstáculo de altura H. Una distancia horizontal al receptor d_a , forma parte de una relación de proporcionalidad entre distancias.	46
Figura 3.5 Geometría de las ondas directas y las ondas reflejadas en el suelo en la atmósfera en presencia del suelo [Ostashev et al., 2018].	48
Figura 4.1 Panel izquierdo: Ubicación geográfica de la Reserva Biológica de Limoncocha. Panel derecho: Ubicación más aproximada de la Estación Científica Limoncocha.	56
Figura 4.2 Fotografías tomadas en la ruta “sendero escuela”, que atraviesa áreas degradadas y tierras en proceso de regeneración (panel izquierdo). La vegetación varía entre herbácea y arbustiva, y alcanza una altura de $\sim 25\text{m}$ (panel derecho).	57
Figura 4.3 Panel izquierdo: Ubicación de la Refinería Shushufindi EP Petroecuador. Panel derecho: Fotografía de pozo de extracción de petróleo en el Complejo Petroecuador Shushufindi. Se identifica vegetación alrededor del pozo de extracción.	58

Figura 4.4 Panel izquierdo: Ubicación de Petroamazonas EP Bloque 15-CPF. Panel derecho: Fotografía tomada en una carretera principal ubicada en el perímetro del complejo, donde se observa una franja de bosque maduro.	59
Figura 4.5 Mapa referencial de los puntos de grabación de ultrasonidos del complejo petrolero Shushufindi- sendero El Caimán. El camino de color azul representa los puntos medidos utilizando el micrófono ultrasónico SMM-U2 de manera perpendicular a la fuente de ruido. . .	59
Figura 4.6 Panel izquierdo: Ubicación de la Estación Tivacuno C. Panel derecho Ubicación de los puntos de medición de sonido en la entrada a la estación en el sendero 1 “Mirador” de la ECY, la distancia entre puntos fue 25m aproximadamente.	60
Figura 4.7 Panel izquierdo: Ubicación de la Estación NPF - Repsol. Panel derecho: Ubicación de los puntos de medición de sonido en el camino de entrada a la estación de NPF.	61
Figura 4.8 Panel izquierdo: Ubicación del sendero El Chorongó. Panel derecho: Ubicación de la ruta de medición en el sendero Chorongó, donde se realizaron mediciones de absorción de sonido con 5m entre cada punto	61
Figura 4.9 Panel (a): Ubicación de puntos interpolados en plano xy de un medio homogéneo. Panel (b): Nivel de presión sonora en el eje vertical calculado con el modelo inicial sin obstáculos que disminuye a medida que se aleja de la fuente en sus ejes horizontal y vertical.	66
Figura 4.10 Representación polar de la propagación del sonido sin obstáculos sobre el plano xy , alrededor de la fuente. La barra de colores muestra la intensidad de L_p	67
Figura 4.11 Espectro de potencias calculado del archivo de audio “SR001MS.wav”, tomado como ejemplo. En el eje horizontal la frecuencia en Hz, y en el eje vertical la amplitud de la potencia.	67
Figura 4.12 Espectro de potencia con pocas fluctuaciones. Se grafica la potencia en función de la frecuencia.	68

Figura 4.13 Comparación de la intensidad de L_p , en función de la frecuencia, entre los modelos de propagación de sonido sin obstáculos (línea azul) y con obstáculos (línea roja).	69
Figura 4.14 Representación polar de la propagación del sonido con obstáculos sobre el plano xy , alrededor de la fuente. La barra de colores muestra la intensidad de L_p	70
Figura 4.15 Error relativo entre las medidas estimadas y las medidas reales, a 3m (punto izquierdo), 20m (punto central) y 60m (punto derecho) desde la fuente sonora estudiada.	70

AGRADECIMIENTO

Quiero empezar agradeciendo a Dios por darme la vida y permitirme culminar mis estudios académicos por medio de la Universidad Técnica de Ambato, a mi familia quienes han sido mi fortaleza y soporte en todo momento, al Doctor Christian Vásquez quien desde el primer día y de manera constante me ha guiado en el desarrollo y culminación de mi trabajo enseñándome que todo se logra con esfuerzo y dedicación, a cada miembro del grupo de investigadores del Proyecto PIM19-01 de la Escuela Politécnica Nacional quienes contribuyeron en las diferentes fases de mi trabajo.

Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi abuelito Onofre que desde el cielo me ha guiado en todo el desarrollo de mi trabajo. A mi madre Nelly por todo su amor, su ejemplo, y sus palabras de aliento de todos los días, a mi hermano Xavier por estar siempre conmigo, a mis suegros Paquito y Carmita quienes siempre me han ayudado, a mi esposo Francisco por todo su amor, apoyo incondicional y fortaleza brindada todo este tiempo y a mis hijos Francisco y Abby quienes son la inspiración para seguir superándome cada día.

Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS,
ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN
FÍSICA COMPUTACIONAL

THEME: ANÁLISIS DEL RUIDO NATURAL Y ANTROPOGÉNICO DEL PARQUE NACIONAL YASUNÍ USANDO TÉCNICAS AVANZADAS DE MACHINE LEARNING

AUTOR: Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

DIRECTOR: Fís. Christian Leonardo Vásquez Vega, PhD

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Energías Renovables y Desarrollo Sostenible.

FECHA: Junio 17, 2022

RESUMEN EJECUTIVO:

En este trabajo se abordan los aspectos del ruido industrial producido por las instalaciones de extracción petrolífera en el Parque Nacional Yasuní, localizado en la amazonía ecuatoriana. Las fuentes acústicas dentro de este tipo de instalaciones podrían influir en el comportamiento de la vida silvestre, lo que produciría un impacto negativo en las especies. El modelo de propagación radial de onda acústica en un campo abierto, se plantea a través de una atenuación por divergencia geométrica, efecto por absorción atmosférica y efectos de dispersión por obstáculos y por suelo. El modelo inicial sin obstáculos realiza predicciones basadas en un algoritmo tomando un conjunto de datos de entrada y obteniendo datos de salida mediante el desarrollo de una técnica de Machine Learning como la interpolación lineal. Y por medio de una expansión del modelo se aprecia la influencia de los obstáculos. Las mediciones realizadas en campo por el equipo de investigadores dan información de presión atmosférica, temperatura, humedad relativa y frecuencia sonora media, a diferentes distancias desde las fuentes. Datos que han permitido usar la Norma ISO 9613-1 para el cálculo del coeficiente de absorción por efecto de la absorción atmosférica, así como, el modelo Nord2000

para tomar en consideración la flora local que introduce fenómenos de reflexión y dispersión. Además, el efecto del suelo incluirá la presencia de vegetación de baja altura. Los resultados obtenidos tendrán un impacto científico, ambiental y social, debido a los efectos del ruido causados por la industria petrolera. Entonces, los resultados podrían servir como base para la toma de decisiones en el ámbito de regulación ambiental, así como social, haciendo referencia a las comunidades indígenas que habitan cerca de instalaciones petroleras.

Palabras claves: Acústica, ondas, propagación, dispersión, atenuación, reflexión.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD
DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E
INDUSTRIAL**

**MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN
FÍSICA COMPUTACIONAL**

TEMA: ANALYSIS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC NOISE IN PARQUE NACIONAL YASUNÍ USING ADVANCED MACHINE LEARNING TECHNIQUES.

AUTHOR: Ing. Geoconda Marisela Velasco Castelo

DIRECTED BY: Fís. Christian Leonardo Vásquez Vega, PhD

RESEARCH LINE: Energies Renewable Energies and Sustainable Development.

DATE: June 17, 2022

EXECUTIVE SUMMARY:

This paper addresses aspects of industrial noise produced by oil extraction facilities in the Yasuní National Park, located in the Ecuadorian Amazon. The acoustic sources within this type of installation influence the behaviour of wildlife, which has a negative impact on the species. The radial propagation model of acoustic wave propagation in an open field is posed through attenuation by geometric divergence, atmospheric absorption effect and scattering effects due to and ground scattering effects. The initial model without obstacles performs predictions based on an algorithm by taking an input data set and obtaining output data by developing a Machine Learning technique such as linear interpolation. And by means of an expansion of the model allows the influence of obstacles to be appreciated. The field measurements made by the research team give us information on atmospheric pressure provide us with information on atmospheric pressure, temperature, relative humidity and average sound frequency, at different distances from the sources. These data have allowed us to use the ISO 9613-1 Standard for the calculation of the absorption coefficient due to the effect of atmospheric absorption, as well as, the Nord2000 model to take

into account the local flora that introduces reflection and scattering phenomena. In addition, the ground effect will include the presence of low vegetation. The results obtained will have a scientific, environmental and scientific, environmental and social impact, due to the effects of noise caused by the oil industry. Then, the results could serve as a basis for decision making in the field of environmental regulation, as well as social, with reference to indigenous communities living near oil installations.

Palabras claves: Acoustics, waves, propagation, dispersion, attenuation, reflection.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

Con los descubrimientos de nuevos yacimientos de petróleo en los últimos años, América Latina cuenta con el 20 % de crudo en su subsuelo a nivel mundial [García and Garcés, 2013]. Por su parte, Ecuador, con el 2,51 % que corresponde a 8,27 billones de barriles alcanza la tercera posición de reservas de crudo. Las fases de operación de las actividades petroleras impactan al medio ambiente y a la biodiversidad de la región amazónica. Las dos principales causas de afectación ambiental son: la contaminación y la deforestación. La construcción de carreteras ha sido un factor determinante para la deforestación y la pérdida de biodiversidad en las áreas petroleras de la Amazonía ecuatoriana. [Larrea Maldonado, 2017].

Para extraer petróleo del subsuelo existen prácticas operacionales que alteran el equilibrio ecológico y afectan a las comunidades biológicas. Esto provoca serios impactos en el desenvolvimiento de los animales de la selva en especial de aves que huyen del lugar. Cada familia posee patrones generales de llamada que está relacionada con la ecología de sus especies [Rivera Parra, 2011]. El parque tiene la mayor densidad de anfibios, mamíferos, aves y especies de plantas en la región amazónica lo que hace que la región sea estratégicamente importante para la futura conservación de las especies [Larrea and Warnars, 2009].

La industria petrolera es considerada como uno de los pilares fundamentales de la producción ecuatoriana. Posee una infraestructura que comúnmente se asocia con problemas de contaminación que son perjudiciales para la flora y fauna local. Sus efectos medioambientales han sido ampliamente estudiados en relación a derrames de hidrocarburos, apertura de carreteras que permiten la colonización de zonas remotas, efectos sociales y efectos en el movimiento de animales por la presencia de oleoductos y carreteras [Maurice et al., 2019].

Esta investigación se enfoca en la contaminación sonora causada por el funcionamiento de la maquinaria petrolera que se encuentra ubicada en las cercanías del Parque Nacional Yasuní. Este estudio permitirá obtener un modelo empírico de dispersión acústica alrededor de pozos petrolíferos de la Amazonía

ecuatoriana. Lo que permitirá describir la variación de atenuación del ruido, en relación a la distancia con la central o fuente sonora. En este contexto, el trabajo trata sobre la propagación del sonido en exteriores sobre un terreno con abundante presencia de árboles y vegetación. Los datos medidos se compararán con las predicciones de modelos de propagación del sonido en exteriores, e.g., el modelo Nord2000 escandinavo. Bajo consideraciones de una atmósfera homogénea e isotrópica se calcula el nivel de presión por divergencia geométrica y absorción atmosférica, el modelo se extiende con el cálculo de la atenuación por obstáculos y por una reflexión en el suelo.

1.2 Justificación

La Amazonía ecuatoriana ha sufrido una gran cantidad de impactos sociales y ambientales vinculados al crecimiento de las actividades petroleras. Las centrales de procesamiento tienen una diversidad de equipos como separadores, generadores de vapor, sistemas de tratamiento de agua, entre otros. Cada una de estas operaciones conlleva el uso de maquinaria especializada y la generación de su ruido característico, que se propaga al interior de la flora circundante [Mena et al., 2017].

La exploración petrolera y la construcción de carreteras han estado intrínsecamente asociadas: las compañías petroleras abren carreteras en un bosque cerrado para el transporte de personas, materiales y otra infraestructura que permite la exploración y explotación de petróleo. Existen actividades que mientras se van desarrollando emiten grandes niveles de ruido en ciertos puntos catalogados como fuentes. Estas fuentes acústicas podrían influir en el comportamiento de la vida silvestre, lo que produciría un impacto negativo en las especies.

Otro posible efecto que no ha sido estudiado hasta el momento, es el ruido industrial producido en las distintas fases de explotación hidrocarburífera. Los niveles de ruido son detectados por las actividades de explotación de hidrocarburos y se presentan en una amplia gama de magnitud y frecuencia, que junto a los estímulos visuales pueden afectar el comportamiento y distribución de la diversidad de especies locales [Abdel-Aal et al., 2003].

La comunicación acústica es fundamental para varios grupos de animales,

e.g., [Goodale and Beauchamp, 2010]. Facilita los comportamientos vitales, como búsqueda de alimento y orientación (ecolocalización) [Sridhar et al., 2009]. Una perturbación ambiental, ya sea una construcción o una fuente de ruido, puede tener efectos en la intensidad y duración de las llamadas de ecolocalización, así como en el uso del espacio aéreo ya que ciertas especies poseen un umbral de perturbación, en algunos casos puede llegar hasta los 88 dB [Furumo and Mitchell Aide, 2019]. Los efectos perturbativos en estas llamadas son poco conocidos y no se han realizado estudios específicos sobre los efectos del ruido industrial de la explotación petrolera, aún cuando en las inmediaciones del Parque Nacional Yasuní existen varios pozos de perforación.

En esta reserva ecológica habitan una gran cantidad de especies, que al recibir las señales acústicas antropogénicas podrían reforzar las diferencias entre especies, alterar el flujo genético, así como cambiar ciertos procesos implicados directamente en la evolución y patrones de distribución de las especies [Kleist et al., 2018]. El acercamiento a este problema ambiental se basa en una metodología física de propagación de ondas con un modelo de propagación acústica. Este permitirá utilizar información para comparar niveles de presión, considerando obstáculos topográficos y una flora considerable.

Los resultados del estudio podrán ser utilizados por organizaciones que se dedican al cuidado del medio ambiente, y contribuirá a un análisis del estado actual de ciertas especies importantes del oriente ecuatoriano. Además permitirá mitigar la contaminación de las zonas aledañas a los campos petroleros, y minimizará un futuro impacto en las especies vitales para la salud del ecosistema.

1.3 Objetivos

1.3 Objetivo General

Analizar las diferentes contribuciones al ruido de fondo en las series temporales de llamadas de aerofauna, mediante técnicas estadísticas avanzadas, que predecirán la estructura temporal y espectral de paisajes sonoros del Parque Nacional Yasuní.

1.3 Objetivos específico

1. Caracterizar el ruido de fondo en grabaciones de aerofauna urbana y/o del Parque Nacional Yasuní.
2. Desarrollar técnicas para la identificación de tipos de ruido, mediante software de reconocimiento de patrones.
3. Catalogar las señales acústicas emitidas por los tipos de ruido en la base de datos.
4. Generar un modelo matemático de la dispersión acústica alrededor de pozos petroleros, o asentamientos antropogénicos.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

La degradación del medio ambiente es uno de los mayores problemas que se plantea la humanidad en la actualidad. El desarrollo incontrolado de las actividades industriales originan, por ejemplo, la contaminación del aire y del agua, la desaparición de zonas verdes, el aumento de la radioactividad ambiental y el incremento incesante del ruido. El ruido es uno de los factores más negativos que afectan la calidad de vida de las especies, e.g. [García, 1988]. La extracción de combustibles fósiles impacta la biodiversidad en zonas naturales de forma indirecta a través del cambio climático, la pérdida de hábitat y la contaminación [Richardson et al., 2017, Harfoot]. Estos factores son un componente sustancial del cambio global, causando impactos significativos sobre la biodiversidad y los ecosistemas. La extracción de combustibles fósiles se ha considerado tradicionalmente como una perturbación temporal y espacialmente limitada de los ecosistemas [Butt et al., 2013].

En general, la aerofauna es particularmente sensible a la contaminación acústica. La reproducción de ciertas especies como las aves es un proceso comportamental, susceptible al ruido porque la mayoría dependen de señales acústicas para defender sus territorios y atraer a individuos, e.g. [Dorado-Correa et al., 2016]. Las señales acústicas emitidas por ciertos grupos taxonómicos como insectos, aves, peces y mamíferos refuerzan las diferencias entre las especies, ya que por sus características permite el proceso de reconocimiento entre los individuos. Las vocalizaciones que existen en la fauna son procesos eficientes para reafirmar la presencia de las especies en lugares con poca visibilidad, por ejemplo en los bosques tropicales, e.g. [Caycedo-Rosales et al., 2013].

El ruido antropogénico es un factor que forma parte del riesgo ambiental de las especies y del ambiente. Este ruido es un contaminante que disminuye la calidad ambiental e interrumpe un conjunto de comportamientos vitales para la percepción y comunicación de la aerofauna [Kleist et al., 2018]. El ruido antropogénico influye considerablemente en los ambientes sonoros y estas condiciones acústicas alteradas pueden ocasionar graves consecuencias para las poblaciones naturales. Estos sonidos pueden incluir sonidos biológicos, sonidos

procedentes de abióticos en movimiento, entre otras fuentes [Francis et al., 2011]. Las actividades antropogénicas crean cambios radicales en la conservación como la segmentación del hábitat, alteración en el microclima, limitación de recursos, cambio de flujo de recursos, modificación en las interacciones de las especies y la contaminación [Dorado-Correa et al., 2016].

Para comprender los impactos del componente antropogénico de los paisajes sonoros un paso es caracterizar la magnitud de las perturbaciones acústicas a nivel de paisaje. Mediante esa caracterización se podrá apreciar los impactos generales del ruido en la ecología y determinar la mejor gestión para mitigar los efectos negativos del ruido antropogénico [Francis et al., 2011].

El ruido se define generalmente como los sonidos desagradables que perturban al ser humano física y fisiológicamente, y causan contaminación ambiental al destruir las propiedades del medio ambiente [Atmaca et al., 2005]. Al ruido se lo puede definir físicamente de la misma manera como se define el sonido; entonces, se acostumbra llamar al ruido a aquel sonido que no es agradable [Jaramillo, 2007]. En la propagación del ruido intervienen tres agentes: fuente, medio de propagación y receptor. De esta forma, para reducir el ruido se puede incidir sobre alguno o sobre todos estos agentes, interfiriendo en su propagación [Tarrero et al., 2008].

La perturbación acústica se propaga a través de un medio elástico con cierta velocidad que es característica del medio. Las alteraciones de presión producidas por la oscilación de partículas se transmiten longitudinalmente y se presentan como una pequeñas fluctuaciones periódicas [Jaramillo, 2007]. La propagación de la onda sonora, desde la fuente hacia el receptor, viaja a través del medio produciendo compresiones oscilantes y rarefacciones con cierta dirección [Villalba Garcia, 2021, Wilson et al., 2012].

La propagación se desarrolla en una sola dimensión radial, considerando el medio homogéneo e isotrópico. Homogéneo ya que sus propiedades físicas son iguales en todos los puntos y direcciones, permitiendo establecer uniformidad. Isotrópico porque permite la transmisión en todas las direcciones [Villalba Garcia, 2021]. La propagación da lugar a ondas cuasi esféricas, donde todos los puntos que equidistan del centro de perturbación se encuentran siempre en fase y constituyen

una superficie de onda con un idéntico estado de vibración. Los frentes de onda son esferas concéntricas que nacen desde la fuente puntual y se expanden como ondas de presión. Esta propagación es caracterizada por una sucesión periódica en el tiempo y en el espacio de manera uniforme en todas las direcciones [García, 1988]. A gran distancia desde la fuente, los frentes de onda esféricos tienden a ser amortiguados, en consecuencia la intensidad sonora disminuye.

La propagación de las ondas sonoras poseen cierta complejidad y se debe considerar ciertos parámetros relacionados con las características físicas del medio como es, el aire y las condiciones de contorno como por ejemplo terrenos naturales o artificiales, barreras, etc. De esta manera ciertos estudios de modelización consideran diferentes factores como: la propagación geométrica, la absorción molecular, los procesos de reflexión en las superficies limitantes, los diversos efectos de difracción, la influencia de la temperatura, los perfiles de velocidad del viento y, la influencia de la turbulencia atmosférica [Bérenghier et al., 2003].

Si se considera una onda sonora armónica, que viaja en la dirección x , la presión sonora p es una función de la posición radial r , para un sistema de coordenadas rectangulares $r(x, y, z)$ y tiempo t . En este caso $p(t) = A \cos(kx - \omega t)$, donde A es la amplitud y $(kx - \omega t)$ es la fase, que depende de la frecuencia angular ω y del número de onda k [Salomons, 2001]. Esta misma función, reescrita en notación compleja se expresaría como $p(t) = A \cos(\phi - \omega t)$, donde los componentes armónicos tiene diferentes valores de amplitud, de ángulo de fase ϕ y frecuencia angular ω [Salomons, 2001].

En el caso que la onda se propague en un medio elástico, las partículas de aire alcanzadas por la perturbación poseen cierta energía. Una energía cinética, asociada a la velocidad de propagación, y una energía potencial, por efecto de la fuerza elástica. Además, la fuente sonora radia cierta potencia que atraviesa las superficies ideales que la rodean. Para las ondas sonoras armónicas esféricas (o planas), la intensidad I es la relación entre la presión media cuadrática (rms), P_{rms} , promediada sobre un número entero de periodos armónicos. Se presenta como la tasa media de flujo de energía por unidad de superficie normal a la dirección de propagación [Salomons, 2001]. Esta expresión es una buena aproximación a distancias alejadas de una fuente, donde los frentes de onda

pueden ser casi planos [Wilson et al., 2012].

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho_0 C_s}, \quad (2.1)$$

donde ρ_0 es la densidad del aire ambiente y C_s es la velocidad del sonido en dicho ambiente.

La fuente emisora puntual se considera omnidireccional, i.e., de manera uniforme el sonido se emite en todas direcciones. La intensidad sonora varía por la presencia de objetos acústicamente reflectantes ya que la onda sonora actúa como una alta presión sobre el obstáculo. Las fuentes de sonido generalmente se caracterizan por la presión o la intensidad del sonido que producirían si estuvieran irradiando hacia un espacio abierto. A distancias suficientemente importantes, muchas fuentes se pueden considerar una fuente puntual o lineal. La fuente puntual se identifica por la presión –o la intensidad sonora– emitida en un campo libre. La condición de espacio abierto es importante ya que permite considerar un volumen del sonido e intensidad que se ven afectados por la presencia de objetos acústicamente reflectantes. En el suelo se originará reflexiones significativas al aire libre, incluso lejos de árboles u otros elementos [Wilson et al., 2012].

La calidad del sonido depende del medio de propagación, ya que es diferente percibir ruidos en un ambiente abierto que en un ambiente cerrado. Las ondas sonoras mientras se aleja de la fuente atenúan con la distancia y pueden ser absorbidas o reflejadas por los obstáculos que encuentran a su paso o por la variación de factores microclimáticos como por ejemplo, la turbulencia del aire, viento y gradientes de temperatura. Estos factores afectan el nivel de atenuación y degradación. Si un receptor se mueve a través de su hábitat, con una posición que cambia en función con las fuentes de sonido circundantes y por lo tanto afectará a las características de las señales percibidas incluyendo el ruido.

Experimentalmente, se puede comprobar que el sonido se atenúa aproximadamente a 6 dB por duplicación de la transmisión y distancia, lo que afecta tanto a la señal como al ruido. La transmisión del sonido depende de un parámetro como la frecuencia. Las bajas frecuencias transmiten mejor que altas frecuencias, especialmente a través de una densa vegetación [Brumm and Slabbekoorn, 2005]. La cantidad de perturbaciones por segundo se denomina

frecuencia del sonido y se mide en hercios (Hz). Cuando hablamos de sonidos graves las frecuencias son más bajas y para los sonidos agudos las frecuencias son más altas. La potencia sonora que una fuente sonora genera abarca cierta cantidad de energía que fluye de la fuente al exterior por unidad de tiempo, variando el nivel de presión sonora a su paso. La presión sonora y la intensidad se establece en una escala de decibelios (dB). Esta escala es logarítmica y comprime convenientemente las amplitudes de ondas sonoras que se encuentran en su paso. Esta compresión es muy similar a la percepción humana del sonido, que es casi logarítmica. El nivel de presión sonora (SPL) se define como:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right),$$

donde P_{ref} , es la presión sonora de referencia de 2×10^{-5} Pa, que representa a la menor presión acústica audible por el oído humano [Merino de la Fuente et al., 2013].

Se enfatiza que la propagación del sonido en exteriores se verá afectada por muchos factores, por ejemplo, la geometría y el tipo de fuente, las condiciones meteorológicas (variaciones de viento y temperatura, turbulencias atmosféricas), la absorción atmosférica del sonido, tipo y contorno del terreno (absorción del sonido por el suelo, reflexiones), obstrucciones (edificios, barreras, vegetación, etc.). Los datos medidos en la zona se compararán con las predicciones de un modelo de propagación del sonido en exteriores por absorción y atenuación. Este entorno acústico dinámico con el modelamiento de la propagación del sonido desde la fuente hacia el paisaje sonoro, los niveles de sonido y otros aspectos podrán servir de base para los estudios ecológicos y los efectos de la contaminación acústica sobre un ecosistema [Keyel et al., 2017]. La mayoría de las predicciones describirán fluctuaciones de presión relacionadas con la velocidad de las partículas o la intensidad de la onda [Wilson et al., 2012].

Entonces, es claro que la propagación del sonido tendrá un análisis complejo debido a los mecanismos dominantes como: la divergencia geométrica, la atmósfera como medio de propagación, el suelo y la presencia de obstáculos [Fernandez, 2002]. En la norma ISO 9613 se especifica un método de ingeniería para calcular la atenuación del sonido durante su propagación en el exterior. Este

modelo considera la atenuación del sonido desde una fuente de ruido industrial en un ambiente completamente libre. Su finalidad es predecir los niveles de ruido ambiental a ciertas distancias. Las propiedades de dispersión y reflexión se deben a la geometría, la forma y el material reflectante, para obtener la atenuación de sonido que se origina a partir de una fuente puntual [9613-1, 1993].

En el caso de la propagación de sonido en campo libre se debe considerar adecuadamente la fuente sonora. En este caso de estudio, los pozos petroleros son puntos estáticos que se ubican en una zona relativamente restringida del territorio y su potencia de emisión sonora está concentrada en un área bien delimitada. En el caso ideal, cuando al paso del sonido no existen obstáculos proveniente de una fuente puntual, éste se propagará en el aire en forma de ondas esféricas. Esto nos permite esbozar un primer modelo de propagación sonora.

La ecuación que determinaría el nivel de presión sonora de una fuente puntual bajo ciertas frecuencias nominales, de banda media (entre 63 Hz y 8 kHz), toma en cuenta el nivel de potencia acústica emitido y la corrección de “directividad”, que es la medida en que el nivel de presión sonora se desvía en una dirección determinada respecto del nivel de presión de la fuente omnidireccional si tuviese la misma potencia sonora [9613-1, 1993]. En un campo libre para la divergencia geométrica se considera una propagación esférica. Mientras aumenta la distancia desde la fuente, la energía sonora se distribuye en la superficie de la esfera. A medida que la superficie aumenta el sonido diverge y la intensidad sonora se reduce. En este contexto, la esfera se hace cuatro veces más grande cuando la distancia se duplica provocando una reducción del nivel de presión sonora [Johansson, 2010].

$$L_p(r) = L_W - 10 \log 4\pi(r^2).$$

Adicionalmente, la absorción atmosférica contempla una nueva metodología propuesta para su cálculo. Por ejemplo, el Método Volpe [Rickleby et al., 2007], utiliza algoritmos de absorción acústica de tonos puros de dos normas publicadas: la Norma Internacional “Acoustics-Attenuation of Sound During Propagation Outdoor-Part 1: Cálculo de la absorción del sonido por la atmósfera” ISO 9613-11 y American National Standard, “Method for Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere” ANSI S1.26-1995. Esta atenuación depende

principalmente de la temperatura, la humedad relativa y la frecuencia [Johansson, 2010]. Se origina por dos efectos: el primer efecto es la conducción térmica y la viscosidad del aire, y el segundo son las pérdidas por relajación de las moléculas de oxígeno y nitrógeno en el aire. La atenuación debida al primer efecto se denomina atenuación clásica. Los gradientes de temperatura presentes en una onda sonora se reducen en parte por el flujo de calor que depende de la conductividad térmica del aire. En ambos procesos la onda sonora pierde energía que se convierte en calor.

La atenuación debida a las pérdidas de relajación molecular se presenta cuando una onda sonora provoca una compresión y una expansión periódica del aire. Durante la etapa de compresión las moléculas diatómicas de oxígeno y nitrógeno del aire pasan a estados de vibración y rotación. Durante la etapa de expansión, las moléculas se relajan a sus estados originales. Las moléculas de agua desempeñan un papel importante como catalizador en estos procesos moleculares internos de excitación y relajación [Salomons, 2001].

En este trabajo de investigación primero se estudiará la propagación de la onda sonora en un campo acústico de superficie totalmente plana, sin ningún tipo de obstáculos entre la fuente sonora y el receptor. En una segunda fase, se considerará la existencia de obstáculos, e.g., objetos o deformaciones en la topografía del suelo entre la fuente y el receptor, lo que incorporará nuevos términos semiempíricos en los modelos matemáticos. La presencia de obstáculos permite que aparezcan fenómenos físicos como la reflexión, la dispersión o absorción de la energía transportada por la onda, así como la difracción de ésta. La combinación de estos fenómenos dificulta en gran medida la predicción del nivel sonoro, debido a sus intrínsecas características complejas [Fernandez, 2002].

En la literatura encontramos que se han desarrollado diferentes estudios sobre la dispersión acústica, que incorporan factores atenuantes. Por ejemplo, que toman en cuenta la descripción del medio, distribución espacial, correlación, densidad, etc. En el modelo de dispersión de Leschnik [Fernandez, 2002] se estudia la dispersión producida por edificios, árboles, paredes, y se plantea una solución aproximada por técnicas de interpolación. Estudios complementarios proponen algoritmos simples para calcular la dispersión del sonido específicamente en

bosques [Tarrero et al., 2008]. Este es el caso del modelo Nord2000, que describe una metodología para predecir la propagación sonora en presencia de árboles, desde una fuente puntual hacia un receptor, ambos situados sobre una superficie considerada plana, lisa y de impedancia acústica conocida [Johansson, 2010]. De estos trabajos se sugiere que los bosques heterogéneos atenúan mejor el sonido que las plantaciones de vegetación, las mismas que no son muy efectivas como barreras sonoras.

El estudio de Posada-Posada et al. [2013], sobre el uso de árboles y arbustos para la reducción del ruido, planteando que los cinturones de árboles heterogéneos permiten reducir los niveles de ruido, de entre 5 y 10 dB, y la mitigación considerable del ruido por parte de la vegetación se logra con el uso de barreras de árboles heterogéneos, de por lo menos 20 y 30 m de anchura y 14 m de altura, tupidas, de árboles con hojas anchas, densas y perennes, con troncos gruesos y que se ubiquen cerca de la fuente de emisión del ruido.

Cabe notar que este estudio sugiere que la transmisión del sonido a través de la vegetación, debido a la dispersión en los troncos, de frecuencias medias y altas, produce principalmente atenuación. Mientras que en el caso de bajas frecuencias, el suelo es el factor principal de atenuación. El follaje atenúa el sonido principalmente por la dispersión y la reflexión, incluso las hojas anchas atenúan el sonido mejor que las hojas estrechas.

Se elabora más sobre el modelo Nord2000. El modelo utiliza un algoritmo sencillo que predice los efectos de la dispersión cuando el sonido se propaga en espacios exteriores con la presencia de obstáculos o barreras acústicas. Los resultados experimentales indican que los árboles tienen un efecto notable en la propagación del sonido a frecuencias medias y largas distancias [Tarrero et al., 2008]. Este modelo fue desarrollado y tomado como punto de partida del modelo de dispersión de Leschnik. Los resultados obtenidos presentan una buena concordancia al comparar los valores medidos en el laboratorio con los predichos por el modelo de dispersión para una área urbana y un bosque [Fernandez, 2002]. Nord2000 es un modelo que predice el nivel de ruido de fuentes diferentes en banda de 1/3 de octava con frecuencias centrales de 25 - 10000 Hz, incluyendo perfiles de terreno, propiedades del terreno y condiciones meteorológicas [Johansson, 2010].

El modelo estima que la corrección del nivel de presión sonora por efecto de la dispersión está en función de cierta distancia para el caso de una fuente puntual. Dependiendo de los obstáculos presentes, el campo sonoro es más o menos difuso y se produce una pérdida en la coherencia entre el sonido directo y el reflejado [Fernandez, 2002]. Este planteamiento puede verse afectado por la cantidad de árboles, troncos, tipo de bosque, clase de suelo y vegetación. Los dos factores principales que contribuyen al nivel de presión sonora son los efectos de dispersión y el efecto de suelo. La dispersión es el fenómeno atenuante más importante en las frecuencias medias, mientras que la absorción se vuelve más dominante en las frecuencias altas.

En particular, la propagación del sonido cerca del suelo es sensible a las propiedades acústicas de la superficie del mismo, así como a las condiciones meteorológicas. La mayoría de superficies naturales del suelo son porosas. La porosidad de la superficie permite que el sonido penetre y, por tanto, sea absorbido y retrasado a través de la fricción y los intercambios térmicos. Por otra parte, existe una interferencia entre el sonido que viaja directamente entre la fuente y el receptor y el sonido reflejado por él del suelo [Attenborough, 2014].

El efecto de suelo debido a la presencia de árboles maduros con capas porosas produce un pico característico en el espectro de exceso de atenuación por debajo de 500 Hz y un descenso a media frecuencia (-1 kHz). El exceso de atenuación por encima de 1 kHz se ha atribuido tanto a la dispersión por troncos y ramas, como a la dispersión y absorción por el follaje. La capa de humus¹ tiende a tener una alta porosidad y una baja resistividad de flujo [Price et al., 1988].

La propagación del sonido sobre un suelo homogéneo se basa en la teoría del trazado de rayos. En este enfoque, el campo sonoro se divide en dos términos: una onda directa entre la fuente y el receptor y una onda reflejada en el suelo. Una aproximación para el campo de presión sonora debido a una fuente puntual por encima de una reacción local se basa en la formulación de Weyl van der Pol para la reflexión de las ondas electromagnéticas [Price et al., 1988]. En el caso de una fuente puntual omnidireccional sobre un plano absorbente, caracterizado por su impedancia superficial normalizada $Z(f) = \xi(f)/\rho_o C_s$, donde $\xi(f)$ es una función

¹Materia en descomposición que se forma debajo de las masas forestales maduras de los árboles.

de la frecuencia f , $\rho_o C_s$ representa la impedancia característica del aire en dicho ambiente. Considerando la Figura 2.1, la geometría del sistema fuente-receptor con presencia de una onda esférica incidente tiene un Z_2 y Z_1 representando la impedancia característica del suelo y la impedancia del aire respectivamente. La presión sonora p_c puede aproximarse razonablemente utilizando el campo libre y sumando el campo reflejado

$$p_c = \frac{P_i}{R_1} \exp\{i(kR_1)\} + Q \frac{P_i}{R_2} \exp\{i(kR_2)\}, \quad (2.2)$$

donde el número de onda k , R_1 y R_2 son las longitudes de las trayectorias del rayo directo y del rayo reflejado, P_i es la amplitud de la fuente es decir la magnitud de la onda directa y reflejada, Q representa el coeficiente de reflexión de la onda esférica.

Claramente, la propagación de exteriores se considera el suelo como un elemento fundamental de análisis. Su presencia se suele estimar mediante un parámetro denominado impedancia acústica. Los métodos de medición de la impedancia acústica del suelo pueden dividirse en dos categorías: métodos directos y métodos indirectos. El método de medición directo no necesita de un modelo de propagación. Los métodos directos se utilizan en entornos de laboratorio requiriendo muestras del material investigado. Son métodos sencillos y eficaces pero demasiado imprecisos para las mediciones de impedancia acústica. Mientras que los métodos indirectos utilizan un modelo de propagación acústica simple

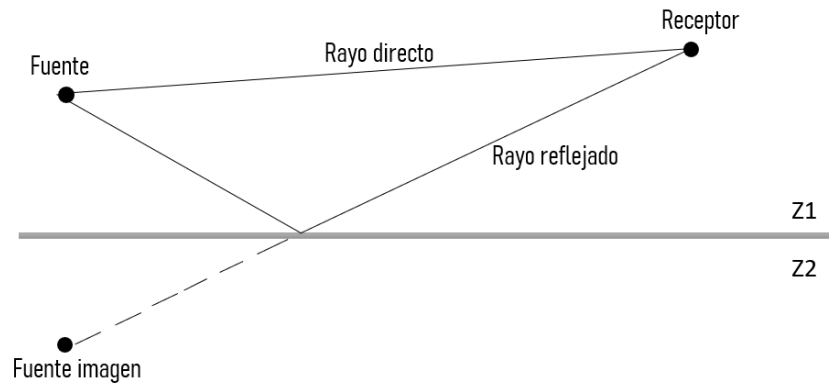


Figura 2.1: Gráfico que representa la geometría entre la fuente y el receptor. Con un rayo directo y un rayo reflejado. La impedancia del aire es Z_1 y la impedancia del suelo es Z_2

sobre una superficie de impedancia determinada, con un parámetro como es la resistividad del flujo permitiendo dar un mejor ajuste a las cantidades medidas [Fernández, 2002].

Experimentalmente, también se ha estudiado el ruido industrial dentro de ciudades, en vías navegables basados en la metodología de Scandinavian Nord2000. [Dai et al., 2020] ha sugerido una alta correlación entre los valores de ruido predichos y los valores medidos. Estudios de tráfico fluvial urbano han evaluado el nivel de emisión de ruido en el campo marítimo. Se han realizado estudios de ruido en las fábricas de hormigón, cemento, hierro, acero y textil en donde los niveles de ruido están por encima del nivel de ruido especificado en el Reglamento de Control de Ruido [Atmaca et al., 2005]. Complementariamente, se han realizado estudios doctorales de propagación de sonido en bosques regulares e irregulares basados en un análisis comparativo in situ, en laboratorio y con valores predichos, por ejemplo, del modelo Nord2000 [Tarrero et al., 2008].

Existen muchos modelos de propagación del sonido en exteriores, que van desde simulaciones basadas en la Física de análisis complejo hasta simples cálculos de ingeniería. Existen técnicas como: soluciones numéricas de la onda y ecuaciones relacionadas, modelos heurísticos y modelos de aprendizaje estadístico. Los modelos heurísticos incluyen el método ISO 9613-2 [9613-1, 1993], Harmonoise [Hart et al., 2016] y el modelo de propagación Nord2000 [Plovsing and Kragh, 2000].

En particular, el modelo Harmonoise está diseñado para predecir el ruido ambiental en Europa. Este modelo considera el nivel de sonido en el receptor como la suma de un nivel de la fuente y la atenuación por propagación geométrica, atenuación atmosférica y un exceso de atenuación. Entre los efectos por excesos de atenuación considera la refracción atmosférica, la dispersión y la reflexión en el suelo y el apantallamiento por obstáculos [Salomons et al., 2011].

Basado en estos argumentos, se elige el modelo Nord2000 ya que este modelo considera características geométricas de los obstáculos. Lo que en el caso se aproxima a las condiciones reales de la zona geográfica de estudio. La zona de estudio es el Parque Nacional Yasuní. El Parque Nacional Yasuní creado en 1979 y la actividad petrolera con alto impacto se inició en 1986 ha sido considerado en

estudios científicos como el lugar con mayor biodiversidad del planeta. Declarado como zona protegida enfrenta con fragilidad una multiplicidad de amenazas, entre las que se destacan la explotación petrolera, la tala ilegal de madera y la caza comercial [Larrea Maldonado, 2017].

La zona ha sido protagonista de muchas investigaciones pero en su mayoría se enfocan en analizar otras causas ajenas al estudio del ruido industrial, por ejemplo, estudios de modelación en la construcción de carreteras que facilitan la extracción de petróleo de las cercanías del Parque Nacional Yasuní, que sugieren que su construcción generan efectos ecológicos que alteran el suelo como la contaminación química y de nutrientes [Mena et al., 2017].

A parte de los problemas estudiados sobre la construcción de carreteras, se han investigado los efectos de la explotación petrolera [Hurtig and San Sebastián, 2002], deforestación [van Der Hoek, 2017] y emisiones de carbono Mena et al. [2017]. Pero, hasta donde se conoce, no existe una investigación que aborde el ruido industrial originado por todas las actividades diarias de extracción petrolera y que, de manera constante, mantiene este sector.

Los estudios realizados servirán de referencia para la investigación pero se los alinearé a las condiciones reales. En particular se ha tenido el acceso a los parques nacionales de la Amazonía. Estos lugares están rodeados de una importante industria petrolera y están sometidos a un tipo de ruido que no ha sido estudiado. Entonces la investigación se basa en el estudio de la propagación de sonido provocado por el ruido industrial existente.

Mediante el modelamiento de dispersión acústica alrededor de pozos petrolíferos en bosques de la Amazonía. Una vez obtenidas las medidas tridimensionales de ruido en los alrededores de los pozos se modelará el alcance espacial de la contaminación acústica, por medio de un modelo empírico. Esto permitirá describir cómo varía cada tipo de ruido (en intensidad y frecuencia) con la distancia a la central, con lo que se construirá gráficas en dos y tres dimensiones de la atenuación del ruido con la distancia a la central.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Ubicación

Este estudio se desarrolla en los alrededores del Parque Nacional Yasuní, y cuyas coordenadas son ($0^{\circ} 46' 12''\text{S}$; $76^{\circ} 6' 0''\text{W}$) (ver Figura 3.1). Los datos que han permitido construir los modelos de este trabajo de investigación se toman in situ en el Parque Nacional Yasuní, que es el área protegida más grande del Ecuador continental con aproximadamente 1 millón de ha. Se ubica en las provincias de Orellana y Pastaza. En las tierras bajas de la Amazonía ecuatoriana (0-500 m de altitud) se han encontrado 3.996 especies de plantas [Macía, 2011]. El clima es cálido y húmedo, influenciado por una serie de factores como el viento, la humedad, la altitud y la precipitación. La temperatura oscila entre los 18°C y 36°C , con una media entre 24°C y 26°C y precipitaciones anuales que varían entre 2000 y 3000 mm.

En el marco del proyecto PIM-19-01, de la Escuela Politécnica Nacional, el equipo de investigación ha podido visitar dos Parques Nacionales: los Parques Nacionales de Limoncocha y Yasuní, con altitudes que oscilan entre 300 a 600 msnm. Estos parques poseen un ecosistema de bosque húmedo, tropical y a sus alrededores habitan comunidades Quichuas y Huaoranis. Lugares cercanos a actividades de extracción petrolífera y donde se realizarán las mediciones que servirán para estimar los modelos.



Figura 3.1: Ubicación del Parque Nacional Yasuní en el mapa de la región amazónica del Ecuador.

3.2 Equipos y materiales

Los equipos a disposición del proyecto de investigación PIM-19-01 fue transportado tanto a la Estación Científica de Limoncocha, como a la Estación Científica de Yasuní. Las medidas de sonido se realizaron mediante un sonómetro HY1361. Las variables atmosféricas fueron tomadas mediante el anemómetro HoldPeak HP-866B. Las grabaciones de rango ultrasónico fueron registradas con el equipo Anabat. Las grabaciones tienen una duración de entre 10 minutos hasta más de una hora.

También, la información se obtuvo mediante la grabadora digital Zoom H3 y el micrófono unidireccional Sennheiser (Sennheiser electronic GmbH & Co. KG, Wedemark, Alemania). Además se utilizó aplicaciones como Noise Generator y Frequency Generator.

3.3 Tipo de investigación

El presente trabajo utiliza una investigación de tipo descriptiva dado que en el estudio se hicieron observaciones para recolectar información de las características ambientales que formaron parte de los parámetros los cuales ayudaron a caracterizar el ambiente en el cual se contempló la propagación de sonido.

3.4 Prueba de hipótesis - pregunta científica - idea a defender

Pregunta científica

¿Es posible desarrollar un modelo matemático empírico que permita estimar los niveles de presión sonora en los alrededores del Parque Nacional Yasuní?

Hipótesis:

El modelo de dispersión acústica por divergencia geométrica, absorción atmosférica, dispersión por obstáculos y efecto del suelo permitirá calcular el nivel de presión sonora en el Parque Nacional Yasuní.

3.5 Población o muestra

En este trabajo de investigación se utilizó las mediciones iniciales que se lograron obtener en la primera visita al Parque Nacional Yasuní como se puede visualizar en la Tabla 4.1.

3.6 Recolección de información

Los dos parques nacionales, Limoncocha y Yasuní están afectados por la proximidad de pozos de extracción de petróleo. Mediante las visitas se pudo observar las condiciones ambientales y topográficas del sector. Las mediciones se efectúan en tiempo y en espacio considerando diferentes fases de la vida de los pozos. El ruido se mide alrededor de ellos mediante grabaciones de diferente duración. El proceso de recolección de la información se ha facilitado gracias a la apertura que mantienen los investigadores. Las visitas a las dos estaciones duraron varios días con jornadas de trabajo por la mañana, tarde y noche. Los periodos de visita se llevaron a cabo en los meses de junio, julio y diciembre del 2021.

La primera visita en junio se inició con un reconocimiento de los lugares con mayor ruido en las instalaciones de extracción petrolífera. El sector se conforma de una densa vegetación y una considerable presencia de árboles con una altura aproximada de 40 metros. En la Reserva Limoncocha por el Sendero Escuela se recorrió una distancia de alrededor de 483 m en línea recta. Se tomaron mediciones de grabación de sonidos ultrasónicos artificiales producidos por las aplicaciones de smartphone Noise generator y Frequency generator, los cuales emitían sonidos en frecuencias de 1000Hz hasta 22000Hz.

En la segunda visita en julio en la Estación Científica Yasuní se realizó una caminata de reconocimiento a la torre de observación de la estación científica. Se tomaron mediciones captándose mediante fotografías la composición vegetal del ambiente. El ingreso a la estación NPF se efectuó en un horario de 07h00 hasta las 10h00 y se tomaron 34 mediciones a lo largo de un trayecto de 950 m, con una distancia aproximada de 30 m entre puntos consecutivos. Se registraron mediciones de presión sonora en dB, frecuencia en Hz, elevación en msnm,

temperatura en °C y posición en m.

En la Estación Científica Limoncocha se llegó a lugares como: Pozo Jivino, CPF Bloque 15 y la Envasadora GLP Shushufindi. Las posteriores salidas de campo se realizaron en la Estación Científica Yasuní, donde se llegó a lugares como: la Estación Tivacuno C, la estación de NPF, el sendero 2 “Chorongo”.

Se pudo determinar, a través técnicas de grabación una parte de la composición del ruido existente. Se pudo realizar réplicas de los experimentos de medición de absorción acústica dentro de varios hábitats y diferentes topografías que conforman los senderos de la Estación Científica Yasuní. La información recopilada servirá para calcular el nivel de presión en diferentes posiciones dentro de ciertas áreas exteriores sin obstáculos. El nivel de presión dependerá de la distancia entre la fuente y el receptor.

Se utilizará la metodología de la divergencia geométrica y la absorción atmosférica. Posterior a ello se considera los efectos por la presencia de obstáculos y del suelo. Para comprender el desarrollo de la investigación es importante tener en cuenta definiciones básicas de la Física del sonido.

3.7 Procesamiento de la información

El sonido es una perturbación mecánica, considerada como una onda de presión u oscilación. Es el resultado de las variaciones de presión generadas por una superficie que vibra o por un flujo turbulento que se propaga en un medio elástico. En este caso de estudio, el aire es el medio más usual para la propagación del sonido. Este medio está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias. Cuando el sonido se propaga en la atmósfera transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas. El sonido se propaga como onda esférica a medida que la onda se expande. Cuando la energía se reparte en los frentes cada vez más amplios se aprecia una disminución en la intensidad, a esto se lo conoce como atenuación.

La atenuación acústica es la disipación de la energía acústica en el tiempo o en el espacio. La Norma ISO-9613 establece un método para calcular la atenuación del sonido durante la propagación en aire libre con el fin de predecir el nivel de ruido a una distancia determinada desde la fuente. Esta atenuación se considera

debido a la dispersión geométrica, la absorción del aire, el efecto de suelo, la vegetación, entre otros. Otro factor que influye en el sonido en exteriores es la absorción. La pérdida de energía provoca una disminución en la intensidad de la onda. Mientras se propaga se absorbe una porción de energía que se caracteriza matemáticamente por un coeficiente de absorción. Este parámetro mide el ritmo al cual la onda pierde su energía por procesos disipativos en la atmósfera [Salomons, 2001].

Si se considera un volumen de control infinitesimal, no deformado, que contiene un fluido en movimiento entonces, existe un cambio de masa entre la entrada y la salida del volumen, dado que este está fijo en el espacio y no cambia en el tiempo. El flujo másico que ingresa al cubo menos el flujo másico que sale del cubo es igual a la tasa a la cual la masa dentro del cubo cambia con respecto al tiempo. Los cambios temporales se dan en la densidad del flujo de masa $\rho(\vec{r}, t)$ en su forma diferencial, donde podemos aplicar el teorema de la divergencia,

$$-\oint_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{s} = \frac{d}{dt} \iiint_V \rho \cdot dV, \quad (3.1)$$

donde \vec{v} es el vector velocidad, $d\vec{s}$ es el diferencial de una superficie cerrada, d/dt es la derivada temporal y dV es el volumen delimitado por la misma superficie. La tasa de cambio de masa en el volumen de control, más el flujo neto de masa a través de la superficie de control es igual a cero,

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \cdot dV + \oint_S \rho \vec{v} \cdot d\vec{s} = 0. \quad (3.2)$$

Si se usa el teorema de la divergencia la ecuación anterior se reescribe como:

$$\begin{aligned} 0 &= \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV + \iiint_V \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \cdot dV, \\ 0 &= \iiint_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right) dV. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Considerando que la ecuación 3.3 es válida para cualquier volumen de control,

podemos integrar esta expresión y, consecuentemente,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (3.4)$$

A esta expresión se le denomina ecuación de continuidad.

Otra ecuación necesaria para deducir la ecuación de onda acústica es la ecuación de Euler. Como se nota a continuación, esta ecuación es ligeramente inestable en presencia de pequeñas perturbaciones. Si las oscilaciones son pequeñas, la velocidad \vec{v} también es pequeña. Entonces el término $(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v}$ en la ecuación de Euler tiende a despreciarse. Por esta razón el cambio relativo que se da en la densidad del fluido y en la presión es pequeño [Landau and Lifshitz, 1987]. Incorporando perturbaciones a la presión P y densidad ρ se tiene

$$P = P_o + P'; \quad \rho = \rho_o + \rho', \quad (3.5)$$

donde P_o y ρ_o son sus correspondientes valores de equilibrio, mientras que P' y ρ' son las perturbaciones. Estas consideraciones permiten linealizar las ecuaciones que conducen a la ecuación de la onda acústica. La ecuación de estado relaciona las fuerzas internas con las correspondientes deformaciones.

Para ello, en la ecuación 3.4 se sustituye la expresión 3.5,

$$\frac{\partial (\rho_o + \rho')}{\partial t} + (\rho_o + \rho') \nabla \cdot \vec{v} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho_o}{\partial t} + \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_o \nabla \cdot \vec{v} + \rho' \nabla \cdot \vec{v} = 0.$$

Las cantidades de segundo orden se pueden despreciar y la última expresión se reduce a la ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_o \nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (3.6)$$

A continuación, se reemplaza las relaciones 3.5 en la ecuación de Euler:

$$(\rho_o + \rho') \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} \right) = -\nabla(P_o + P'),$$

donde se considera la velocidad media nula, $\vec{v}_o = 0$, por lo que la velocidad neta (media más perturbación) es muy pequeña. Entonces,

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\nabla P_o}{\rho_o} + \frac{\nabla P'}{\rho_o} = 0,$$

y se obtiene la forma linealizada de la ecuación de Euler

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_o} \nabla P'. \quad (3.7)$$

La combinación de las ecuaciones de conservación de la masa y la ecuación de Euler dan como resultado la ecuación de la onda. La ecuación de la onda es una ecuación diferencial parcial lineal de segundo orden que sirve para describirla.

La ecuación de continuidad describe el comportamiento del fluido cuando está en movimiento. Este principio es una consecuencia de la ley de conservación de la masa.

En una onda sonora que se mueve a través del aire el cambio de presión es adiabático, i.e., no existe un intercambio de calor. Esto equivale a la ecuación de estado

$$PV = nRT, \quad (3.8)$$

donde P es la presión absoluta, V es el volumen de gas, n densidad numérica del gas, T es la temperatura termodinámica, y $R = \dots$ es la constante de gas específica de masa. Un proceso adiabático es aquel en el que la transferencia de calor del sistema es nulo. Entonces, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica,

$$dU = dW + dQ, \quad (3.9)$$

donde dU es el cambio en la energía interna del sistema, W es el trabajo realizado por el sistema y Q es la cantidad de calor. Cualquier trabajo realizado debe hacerse a expensas de la energía interna, ya que no se suministra calor desde los alrededores $dQ = 0$. En este caso, el trabajo del sistema presión-volumen se

reduce a

$$dW = -PdV. \quad (3.10)$$

Además, en el caso de una expansión libre, la energía interna de un gas perfecto es independiente del volumen, o la presión, solo función de la temperatura. Entonces, para un gas ideal

$$dU = nC_v dT. \quad (3.11)$$

Si, a continuación, se iguala las ecuaciones 3.10 y 3.11,

$$nC_v dT = -PdV,$$

de donde

$$dT = -\frac{PdV}{nC_v}. \quad (3.12)$$

Ahora, se puede diferenciar la ecuación 3.8,

$$d(PV) = d(nRT);$$

$$PdV + VdP = nRdT;$$

$$dT = \frac{PdV + VdP}{nR}. \quad (3.13)$$

Entonces, si se trabaja con las ecuaciones 3.12 y 3.13,

$$-\frac{PdV}{nC_v} = \frac{PdV + VdP}{nR};$$

$$-nRPdV = nC_v(PdV + VdP);$$

$$-nRPdV = nC_vPdV + C_vnVdP;$$

$$nRPdV + nC_vPdV + C_vnVdP = 0;$$

$$nPdV(R + C_v) + nC_vVdP = 0.$$

A continuación, se divide esta última expresión para $n dV$ y se sustituye $C_p = C_v + R$, que es una relación entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante para un gas ideal, conocida como la Ley de Mayer.

$$P(C_p - C_v + C_v) + C_v \frac{VdP}{dV} = 0;$$

$$PC_p + C_v \frac{VdP}{dV} = 0;$$

$$PC_p dV + C_v V dP = 0.$$

Una vez más, a cada término de la expresión anterior se lo divide para PV

$$C_p \frac{dV}{V} + C_v \frac{dP}{P} = 0. \quad (3.14)$$

Entonces, tomando en consideración la relación de capacidad calorífica que cumple un gas ideal adiabático,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (3.15)$$

Relación que se puede reemplazar en la ecuación 3.14 que tras su integración se obtiene

$$\gamma \ln(V) + \ln(P) = \text{constante}, \quad (3.16)$$

$$PV^\gamma = \text{constante}. \quad (3.17)$$

Si se hace uso de las definiciones de la densidad en función del número de moles n y la masa molar M ,

$$\rho = \frac{nM}{V};$$

$$V = \frac{nM}{\rho}.$$

Así mismo, se considere que el número de moles y la masa molar son constantes

y, consecuentemente, se pueden reescribir a través de la forma

$$P \left(\frac{1}{\rho} \right)^\gamma = \text{constante}, \quad (3.18)$$

que, tras un poco de álgebra, permite escribir una ecuación diferencial para la presión,

$$\begin{aligned} \ln(P) - \gamma \ln(\rho) &= \ln(K), \\ \ln(P) - \gamma \ln(\rho) &= K, \\ \frac{d}{d\rho} (\ln(P)) - \frac{d}{d\rho} (\gamma \ln(\rho)) &= 0, \\ \frac{1}{P} \frac{dP}{d\rho} - \gamma \left(\frac{1}{\rho} \right) &= 0, \\ \frac{dP}{d\rho} &= \gamma \frac{P}{\rho}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

A partir de esta ecuación diferencial, se puede considerar una onda de sonido que propaga el campo de velocidad del flujo másico $\rho v = \text{constante}$. En este caso, la fuerza del gradiente de presión y la segunda ley de Newton se combinan para obtener la aceleración resultante del gradiente de presión:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}, \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}, \\ \frac{dP}{dx} &= -\rho \frac{dv}{dt}, \\ dP &= -\rho dv \frac{dx}{dt}, \\ dP &= -\rho v dv. \end{aligned} \quad (3.21)$$

En estado estacionario, el caudal másico, $\dot{m} = \rho v A$, debe ser el mismo, por lo

tanto el flujo de masa es constante, i.e.,

$$\rho v = \text{constante},$$

y, consecuentemente,

$$v d\rho + \rho dv = 0,$$

$$v d\rho = -\rho dv.$$

Términos que se pueden reemplazar en la ecuación 3.21,

$$dP = v d\rho(v),$$

$$\frac{dP}{d\rho} = v^2. \quad (3.22)$$

Si se nota que en un estado estacionario las variables que definen el comportamiento del sistema, o proceso, no cambian en el tiempo. La velocidad del sonido puede aproximarse a un proceso adiabático, la onda viaja tan rápido como su propagación, entonces:

$$\frac{dP}{d\rho} = v^2 \equiv C_s^2. \quad (3.23)$$

Lo que, en función de variables macroscópicas, se puede escribir como

$$\gamma \frac{P}{\rho} = C_s^2, \quad (3.24)$$

y, en función de las perturbaciones de estas variables,

$$P' = C_s^2 \rho'. \quad (3.25)$$

A continuación, se puede notar que las pequeñas oscilaciones son potenciales, por lo que se puede expresar a través del rotacional del campo de velocidades

$\vec{v} = \nabla\phi$. Con la ayuda de la ecuación de Euler y la última relación obtenida,

$$\begin{aligned}\frac{\partial\nabla\phi}{\partial t} &= -\frac{\nabla P'}{\rho_0}, \\ \frac{\partial\nabla\phi}{\partial t} + \frac{\nabla(C_s^2\rho')}{\rho_0} &= 0, \\ \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + C_s^2\frac{\nabla\rho'}{\rho_0} &= 0, \\ \nabla\rho' &= -\frac{\rho_0}{C_s^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}.\end{aligned}\tag{3.26}$$

Esta relación se puede reemplazar en la ecuación de conservación de masa (que incluya al potencial de la velocidad),

$$\begin{aligned}-\frac{\rho_0}{C_s^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} &= -\rho_0\nabla^2\phi, \\ -\frac{\rho_0}{C_s^2}\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} + \rho_0\nabla^2\phi &= 0, \\ \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} - C_s^2\nabla^2\phi &= 0.\end{aligned}$$

Expresión que también se suele encontrar en la literatura con la nomenclatura del Laplaciano $\nabla^2\phi \equiv \Delta\phi$. En una dimensión, la solución general de la última ecuación puede ser escrita como:

$$\phi(r, t) = f(r - C_s t) + g(r + C_s t),\tag{3.27}$$

donde f y g son funciones dadas por las condiciones iniciales y el argumento $r - C_s t$ representaría una onda plana viajera propagada en la dirección del eje radial positivo. Para una onda plana según la ecuación $\vec{v} = \nabla\phi$ y la $v_r = \partial\phi/\partial r$ es distinta de cero, de modo que las ondas sonoras en los fluidos son longitudinales. Una de las soluciones de la ecuación 3.27 es $\phi = f(r - C_s t)$, que representa la onda plana propagada en la dirección positiva del eje radial. Aplicando su derivada se tiene $\partial\phi/\partial r = f'(r - C_s t)$ entonces $v = \partial\phi/\partial r = f'(r - C_s t)$. Aplicando en

la ecuación 3.7, $\partial/\partial t = c\partial/\partial r$,

$$\frac{\partial P'}{\partial t} = \rho_0 C_s \frac{\partial v}{\partial r}$$

$$P' = \rho_0 C_s f'(r - C_s t)$$

$$P' = \rho_0 C_s v, \quad (3.28)$$

reemplazando la ecuación 3.25 en la ecuación 3.28

$$\rho_0 C_s v = C_s^2 \rho',$$

$$\rho' = \frac{\rho_0 C_s v}{C_s^2},$$

$$\rho' = \frac{\rho_0 v}{C_s}. \quad (3.29)$$

A partir de esta ecuación, se puede deducir la forma de la densidad de energía de las ondas sonoras expandiendo $\rho E + \rho v^2/2$. Si se considera hasta los términos de segundo orden en las perturbaciones de densidad y presión ($\rho_0 + \rho'$) y ($E_0 + E'$). Se despreciará el término de orden cero porque es constante y se toma los términos de hasta segundo orden,

$$E_w = \rho_0 E_0 + \rho' \frac{\partial(\rho E)}{\partial \rho_0} + \frac{1}{2} \rho'^2 \frac{\partial^2(\rho E)}{\partial \rho_0^2} + \frac{1}{2} \rho_0 v^2,$$

$$E_w = \frac{1}{2} \rho'^2 \frac{\partial^2(\rho E)}{\partial \rho_0^2} + \frac{1}{2} \rho_0 v^2, \quad (3.30)$$

donde las derivadas se deben calcular con la entropía constante, puesto que la perturbación se ha considerado de naturaleza adiabática. Para ello, se utiliza la expresión termodinámica de entropía, $dE = Tds - PdV$, la entalpía $H = E + PV$

y $V = 1/\rho$, con lo que

$$dH = \frac{1}{\rho}dP, \quad (3.31)$$

$$H = E + \frac{1}{\rho}P,$$

$$\frac{\partial(E\rho)}{\partial\rho} = E + \frac{1}{\rho}.$$

Su segunda derivada sería:

$$\frac{\partial^2(E\rho)}{\partial^2\rho} = \frac{\partial H}{\partial\rho},$$

que en función de $\partial H/\partial P = 1/\rho$ se escribiría como

$$\frac{\partial^2(E\rho)}{\partial^2\rho} = \frac{\partial H}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial\rho},$$

$$\frac{\partial^2(E\rho)}{\partial^2\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial\rho},$$

Entonces, la variación de entalpía es

$$H' = P' \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right) = \frac{P'}{\rho} \approx \frac{P'}{\rho_0}. \quad (3.32)$$

Se puede reemplazar esta forma en la expresión de la energía 3.30,

$$\frac{1}{2}\rho'^2 \left(\frac{\partial H}{\partial\rho} \right) + \frac{1}{2}\rho_0 v^2,$$

$$\frac{1}{2}\rho'^2 \frac{C_s^2}{\rho_0} + \frac{1}{2}\rho_0 v^2. \quad (3.33)$$

En esta expresión de conservación energética, el primer término corresponde con la energía interna por unidad de volumen del fluido en reposo, y no tiene que ver con la onda acústica. El segundo término es la variación de energía interna debida a la variación de la masa del fluido por unidad de volumen, que ocurre

debido a la perturbación. Si se integra la última expresión en un volumen genérico,

$$\int \left(\frac{1}{2} \rho'^2 \frac{C_s^2}{\rho_0} + \frac{1}{2} \rho_0 v^2 \right) dV. \quad (3.34)$$

La expresión resultante puede considerarse como la densidad de energía sonora de la onda:

$$E_w = \frac{1}{2} \rho'^2 \frac{C_s^2}{\rho_0} + \frac{1}{2} \rho_0 v^2. \quad (3.35)$$

El primer término del lado derecho de la ecuación puede ser reemplazando con la ecuación 3.29, con lo que se reduce a

$$E_w = \rho_0 v^2. \quad (3.36)$$

En un sistema acústico, el campo sonoro varía con la posición por tanto su energía se describe mejor mediante la densidad de energía D . Para abordar este enfoque, se nota que la energía acústica se puede descomponer en energía potencial más energía cinética. Si se considera una pequeña porción de gas de volumen dV con energía cinética dE , el límite $dV \rightarrow 0$ permite encontrar la densidad de energía cinética,

$$D_w = \frac{1}{2} \rho_0 v^2. \quad (3.37)$$

Complementariamente, para calcular la energía potencial E_p se debe tener en cuenta los fenómenos de compresión y expansión. El proceso de compresión/expansión adiabática de un volumen V_o , hasta un volumen final $V_o + V$ a causa de un incremento de la presión total desde P_o , hasta $P_o + P$. La presión externa se mantiene igual a P_o debido que inicialmente la fuerza interna debida a la presión P_o está equilibrada por una fuerza igual y contraria, ejercida desde el exterior por el aire. El agente compresor sólo debe aportar una fuerza igual al incremento de presión multiplicado por el área del pistón. Considerando la compresión adiabática 3.17 $dP = P, P = P_o, dV = V, V = V_o$,

$$\frac{dP}{P} = -\gamma \frac{dV}{V},$$

$$dPA = -\gamma P_0 \frac{dV}{V} A,$$

$$PA = -\gamma P_0 \frac{dV}{V} A,$$

$$\frac{P}{P_0} = \gamma \frac{\Delta V}{V_0},$$

$$\frac{P}{P_0} = \gamma \frac{l}{l_0},$$

$$\frac{Pl_0}{P_0\gamma} = l,$$

La energía potencial del volumen de gas al desplazarse una distancia equivale al trabajo mecánico realizado por esa fuerza.

$$dE_p = -PA dl,$$

$$-PA dl = \gamma P_0 A \frac{l}{l_0} dl,$$

$$E_p = \int_0^l \frac{\gamma P_0 A}{l_0} l dl = \frac{1}{2} l^2 \frac{\gamma P_0 A}{l_0},$$

$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{Pl_0}{P_0\gamma} \right)^2 \frac{\gamma P_0 A}{l_0},$$

reduciendo se llega a la energía potencial acumulada en el volumen Al_0 . La densidad de energía potencial D_p se obtiene dividiendo por dicho volumen. La densidad de energía potencial representa la cantidad de energía acumulada en una región del espacio, por unidad de volumen

$$E_p = \frac{1}{2} \frac{P^2}{P_0\gamma} Al_0,$$

$$D_p = \frac{1}{2} \frac{P^2}{P_0\gamma}, \quad (3.38)$$

como $C_s^2 = \gamma P / \rho$ y $\gamma = C_s^2 \rho_0 / P_0$,

$$D_p = \frac{1}{2} \frac{P^2}{\rho_0 C_s^2}.$$

La densidad de energía acústica total es igual a la suma de la densidad de

energía cinética y la densidad de energía potencial.

$$D = \frac{1}{2}v^2\rho_0 + \frac{1}{2}\frac{P^2}{\rho_0 C_s^2},$$

$$D = \frac{P^2}{\rho_0 C_s^2}. \quad (3.39)$$

Por otra parte, la intensidad acústica $|\vec{I}|$ es la cantidad de energía acústica por unidad de tiempo, que pasa a través de una unidad de área que es normal a la dirección de propagación. La propagación de una onda sonora va acompañada de un flujo de energía sonora. Como la intensidad es la potencia transmitida por unidad de área en la dirección del movimiento y se disminuye mientras se aleja de la fuente (perdiendo cierta porción de energía) y viene dada por

$$\vec{I} = \vec{v}P, \quad (3.40)$$

donde P es la presión sonora y \vec{v} es la velocidad de la partícula. La onda sonora esférica se comporta localmente como una onda plana cuando se encuentra a una gran distancia de la fuente en un campo libre. Esto implica que la presión y la velocidad del fluido están en fase entre sí, de manera que

$$v \sim \frac{P}{\rho C_s}. \quad (3.41)$$

Entonces, la intensidad proyectada en la dirección de propagación es

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho C_s}, \quad (3.42)$$

donde P_{rms}^2 es el valor cuadrático medio de la presión. Dado que la perturbación acústica se propaga con velocidad C_s , se deduce que la densidad de energía acústica también lo hace. En otras palabras, la energía se propaga acompañando a la perturbación de presión. Esta propiedad fundamental se verifica también para otros fenómenos ondulatorios, e.g., los campos electromagnéticos, siempre que la onda sea unidireccional.

Un enfoque diverso, permite tomar una onda sonora unidireccional transporta

energía. Esta energía atraviesa una sección en un tiempo determinado se transforma en potencia sonora. Si un frente de onda en el instante t atraviesa una sección transversal de área A . Más tarde, en un tiempo dt , el frente de onda estará en una distancia $dx = C_s dt$. Si la distancia es pequeña, la presión sonora no cambia significativamente considerando densidad de energía acústica constante durante el intervalo dt . Entonces, se ha llenado un volumen $V = Adx$ con una densidad de energía D y la energía total que ha atravesado esa sección sería:

$$dE = DAdx,$$

$$dE = DAC_s dt,$$

$$\frac{dE}{dt} = DAC_s,$$

$$W = DAC_s, \tag{3.43}$$

donde $W \equiv dE/dt$ es la potencia. Esta magnitud, en función de variables macroscópicas (ecuación 3.39), se reescribiría como

$$W = \frac{P^2}{\rho C_s^2} AC_s, \tag{3.44}$$

$$W = \frac{P^2}{\rho C_s} A. \tag{3.45}$$

La intensidad sonora i se podría como la potencia transmitida por unidad de superficie normal a la dirección de propagación,

$$i = \frac{W}{A}, \tag{3.46}$$

que, en función de la ecuación 3.45 sería:

$$i = \frac{P^2}{\rho C_s}. \tag{3.47}$$

En el caso de la propagación del sonido unidireccional, en un campo

tridimensional, la intensidad sonora es el flujo de energía sonora en unidad de tiempo a la par de la presión que fluye a través de la unidad de sección transversal, por lo que

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (3.48)$$

$$I = \frac{1}{\rho C_s} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (3.49)$$

Aquí, se nota que el valor cuadrático medio de la presión P_{rms}^2 es el valor eficaz de la presión sonora en el intervalo T ,

$$P_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (3.50)$$

De manera que se recupera la forma que se había deducido anteriormente (ecuación 3.47) para la intensidad sonora,

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho C_s}. \quad (3.51)$$

La propagación de sonido en sistema de coordenadas esféricas describe la disminución del nivel cuando la onda se propaga lejos de la fuente de manera uniforme en todas las direcciones. Para este análisis, se puede considerar un cubo con caras definidas por r , θ y ϕ , como se muestra en la Figura 3.2. Entonces, sus componente cartesianas x , y y z se expresarían, respectivamente, como

$$x = r \sin(\theta) \cos(\phi); \quad y = r \sin(\theta) \sin(\phi); \quad z = r \cos(\theta). \quad (3.52)$$

El elemento del ángulo sólido $d\Omega = \sin(\theta)d\theta d\phi$ permite estudiar el comportamiento en una propagación esférica. Se puede partir de la integración directa de este ángulo para determinar el área que cubre la onda

$$S = r^2 \int_0^\pi \sin(\theta)d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 4\pi r^2.$$

En la práctica, el sonido se propaga como una onda tridimensional cuya

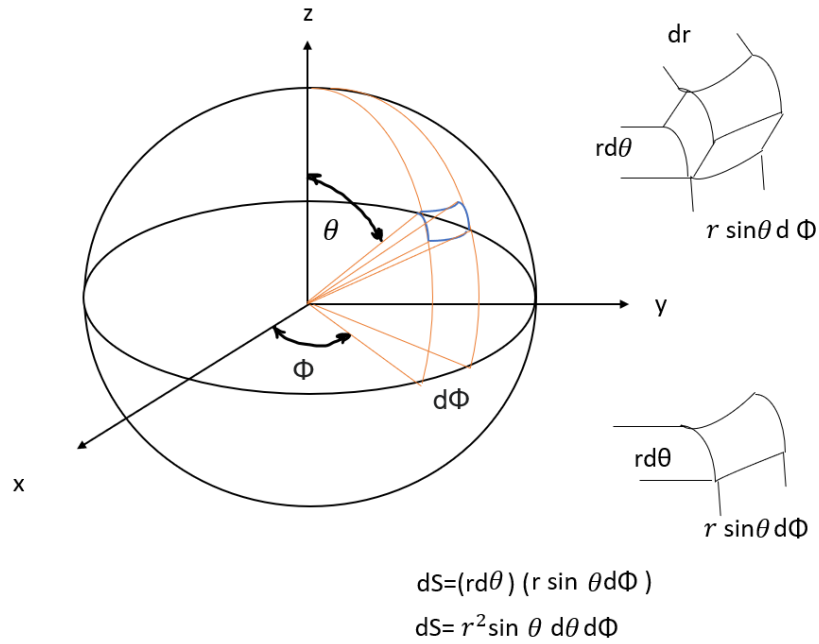


Figura 3.2: Propagación de una onda acústica esférica. El nivel de presión disminuye mientras la onda se propaga lejos de la fuente de manera uniforme omnidireccional.

intensidad no es la misma en todos los puntos del espacio. Por lo tanto, se considera una onda no isotrópica. Cuando una fuente sonora emite energía en un campo abierto se va a considerar que no se produce el fenómeno de reflexión debido a que las ondas no encuentran en su camino superficies sobre las cuales puedan incidir. Tampoco existen reflexiones en el caso de que la onda incida sobre superficies que son totalmente absorbentes. En línea de campo directo, el nivel depende exclusivamente de la ley cuadrática inversa, por lo que el nivel de presión sonora disminuye 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

En el caso ideal, que será la primera aproximación, el sonido proveniente de una fuente puntual, que radia el sonido de manera uniforme en todas las direcciones, se propagará en forma de ondas esféricas. Es decir, si se considera una esfera de radio r , en cuyo interior existe una fuente sonora que emite con una potencia dada, la potencia media radiada por unidad de superficie sería:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}, \quad (3.53)$$

que, en función de la ecuación 3.51, se otorga la potencia a dicho radio,

$$\begin{aligned}\frac{P^2}{\rho C_s} &= \frac{W}{4\pi r^2}, \\ P^2 &= \rho C_s \frac{W}{4\pi r^2}, \\ W &= \frac{4\pi r^2 P^2}{\rho C_s}.\end{aligned}\tag{3.54}$$

Un concepto crucial para este trabajo de investigación es el nivel de presión sonora L_p , medido en decibeles dB, y dado por las siguientes expresiones equivalentes:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} \right); \tag{3.55}$$

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right);$$

$$L_p = 20 \log(P) - 20 \log(P_{ref}), \tag{3.56}$$

donde $P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pa es la presión sonora de referencia. Asimismo, el nivel de potencia sonora, L_w , se define como:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right); \tag{3.57}$$

$$L_w = 10 \log(W) - 10 \log(W_{ref}),$$

donde, W es la potencia sonora de la fuente y $W_{ref} = 1 \times 10^{-12}$ W es la potencia sonora de referencia. Los valores “referenciales”, descritos anteriormente, satisfacen la relación

$$P_{ref}^2 = \rho C_s W_{ref}. \tag{3.58}$$

La potencia sonora y la presión sonora están estrechamente relacionadas. Para

apreciar esto, se reemplaza la ecuación 3.54 en la ecuación 3.57,

$$L_w = 10 \log \left(\frac{P^2 4\pi r^2 / \rho C_s}{W_{ref}} \right),$$

$$L_w = 10 \log \left(\frac{P^2 4\pi r^2}{\rho C_s W_{ref}} \right),$$

y, consecuentemente, con la ayuda de la ecuación 3.55, se obtiene,

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P^2}{\rho C_s W_{ref}} \right).$$

Más aún, si se reemplaza la ecuación 3.54 en la ecuación 3.55,

$$L_p = 10 \log \left(\frac{\rho C_s W / 4\pi r^2}{\rho C_s W_{ref}} \right);$$

$$L_p = 10 \log \left(\frac{W}{4\pi r^2} \right) - 10 \log (W_{ref});$$

$$L_p = 10 \log(W) - 10 \log(4\pi r^2) - 10 \log(W_{ref}).$$

Al agrupar el primer y tercer término del lado derecho de esta ecuación, se reduce a

$$L_p = L_W - 10 \log(4\pi r^2), \quad (3.59)$$

donde el término $10 \log(4\pi r^2)$ representaría la atenuación de una onda de sonido esférica mientras se aleja de la fuente, como consecuencia de la difusión esférica de intensidad acústica [Salomons, 2001].

3.8 Modelo de propagación sin obstáculos

En una sucesiva aproximación, la propagación del sonido en exteriores requiere de un análisis complejo donde los mecanismos dominantes en una atmósfera son: la divergencia geométrica y la atmósfera como medio de propagación. La divergencia geométrica se refiere a que la energía se reparte sobre frentes cada vez mayores. Como se vió anteriormente, cuando se reparte esta energía se distribuye en la superficie de una esfera y la intensidad disminuye a medida que se aleja

de la fuente. Debido a que el área aumenta, el sonido diverge y la intensidad se reduce [Johansson, 2010].

Cuando las mediciones de alguna de las magnitudes de la ecuación 3.59 se realizan a una cierta distancia, se puede definir un factor de dirección, d_Q , que describe el campo de forma única en función de la dirección. La definición se realiza mediante un índice de dirección (dado en dB) y toma el valor correspondiente a la Tabla 3.1. De esta manera, el modelo de propagación del sonido, que considera el índice de dirección sería:

$$L_p(r) = L_W - 10 \log(4\pi r^2) + D_I, \quad (3.60)$$

donde D_I es el índice de dirección definido por la relación entre la intensidad real en una dirección determinada y la intensidad de una fuente omnidireccional de la misma potencia. Específicamente,

$$D_I = 10 \log(d_Q).$$

Específicamente, el factor de dirección suele presentarse cuando la fuente desvía el ruido a una única dirección, esta corrección –por directividad– para una fuente puntual omnidireccional (que corresponde a este caso de estudio) y que está radiando en el centro de una gran superficie plana, tomaría el valor de $d_Q = 2$, equivalente a una irradiación hacia el semiespacio [Hansen, 2001]. La presencia de una superficie reflectante, cerca de una fuente o del receptor, afectaría a las propiedades direccionales aparentes de la fuente.

Por otra parte, el sonido es parcialmente absorbido (atenuado) por el aire,

Tabla 3.1: Factores de Direccionalidad [Hansen, 2001]

Situación	Factor de dirección, d_Q	Índice de dirección, D_I en dB
Espacio libre	1	0
Centrado en una gran superficie plana	2	3
Centrado en el borde formado por la unión de dos grandes superficies planas	4	6
En la esquina formada por la unión de tres grandes superficies planas	8	9

siendo la atmósfera su medio de propagación. La absorción atmosférica depende de la temperatura, la humedad relativa y la frecuencia. En este caso, el nivel de presión acústica debe considerar un término que involucre un coeficiente α de absorción atmosférica (en dB por unidad de longitud),

$$L_p(r) = L_W - 10 \log(4\pi r^2) + D_I - \alpha(r). \quad (3.61)$$

Para estimar la medida de atenuación acústica, en un primer paso, se calcula la atenuación de las ondas sonoras debida a la absorción atmosférica, utilizando r como la distancia entre transmisor y receptor. Se utiliza el método Volpe para el cálculo de la absorción atmosférica mediante algoritmos de dos estándares: 1) the International Standard, “Acoustics- Attenuation of Sound During Propagation Outdoors-Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere,” ISO 9613-1 and, 2) the American National Standard. Explícitamente,

$$\begin{aligned} \alpha = & \quad 8,686 f^2 \left[1,84 \times 10^{-11} \left(\frac{p_r}{p_a} \right) \left(\frac{T}{T_r} \right)^{1/2} \right] \\ & + 1,278 \times 10^{-2} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{-5/2} \left[\exp \left(\frac{-2239,1}{T} \right) \left(f_{r,O} + \frac{f^2}{f_{r,O}} \right)^{-1} \right] \\ & + 1,068 \times 10^{-1} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{-5/2} \left[\exp \left(\frac{-3352}{T} \right) \left(f_{r,N} + \frac{f^2}{f_{r,N}} \right)^{-1} \right], \end{aligned}$$

donde f es la frecuencia de la señal acústica de tono puro (en Hz), p_a es la presión atmosférica ambiental (en kPa) –equivalente a la presión de prueba o presión del día de referencia–, $p_r = 101,325$ kPa es la presión de referencia de una atmósfera estándar, T es la temperatura atmosférica ambiente (en K), $T_r = 293,15$ K es temperatura ambiente de referencia. La frecuencia de relajación del nitrógeno $f_{r,N}$ y la frecuencia de relajación del oxígeno, $f_{r,O}$, presentes en la última relación, se calculan como

$$f_{r,N} = \frac{p_a}{p_r} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{-1/2} \left(9 + 280(h) \times \exp \left(-4,17 \left[\left(\frac{T}{T_r} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right) \right), \quad (3.62)$$

y

$$f_{r,O} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4,04 \times 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right), \quad (3.63)$$

donde, $p_r = 101,325$ kPa y $T_r = 293,15$ K. La variable h representa la concentración molar de vapor de agua. Según la literatura actual, la formulación para calcular $f_{r,N}$ produce valores de atenuación acústica con una precisión $\sim \pm 10\%$, para llamadas con una relación de frecuencia a presión $\sim 4 \times 10^4$ a 10 Hz/Pa, que viajan por el aire en el rango de temperaturas entre -20°C y 50°C , presión atmosférica inferior a 200 kPa, y para concentraciones molares de vapor de agua en el aire $0,05\% < h < 5\%$ (ISO9613-1 1993) [Horton et al., 2015]. h se calcula como

$$h = h_{rel} \left(\frac{p_{sat}}{p_r} \right) \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1}, \quad (3.64)$$

donde h_{rel} es la humedad relativa o humedad relativa del día de prueba, $T_{01} = 273,16$ K es la temperatura de la isoterma del punto triple, $p_{sat} = p_r 10^V$, mientras que [Rickleby et al., 2007].

$$\begin{aligned} V = & 10,79586[1 - (T_{01}/T)] - 5,02808 \log_{10}(T/T_{01}) \\ & + 1,50474 \times 10^{-4}(1 - 10^{-8,2969[(T/T_{01})-1]}) \\ & + 0,42873 \times 10^{-3}(-1 + 10^{4,76955[1-(T_{01}/T)])} \\ & - 2,2195983. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Se nota que todos los valores numéricos de V son ajustes empíricos que permiten calcular la atenuación por absorción atmosférica para tonos puros, utilizando estándares internacionales de Acústica [Rickleby et al., 2007]. El método Volpe es un procedimiento simplificado que calcula la atenuación por absorción atmosférica en sonidos de banda ancha, analizados por filtros de banda de un tercio de octava. Rickley et al. [2007] sugiere que el modelo se emplee en niveles de absorción de banda media de hasta 500 dB, con errores menores a $\pm 0,5$ dB, o $\pm 5\%$ (de los niveles de atenuación de banda media) a 100 dB, y de $\pm 7\%$ a 500 dB.

3.9 Modelo de propagación con inclusión de obstáculos

Los primeros métodos de predicción usados en la propagación del sonido en exteriores estuvieron basados en las teorías de trazado de rayos y en soluciones analíticas de la ecuación de onda de Helmholtz [Tarrero et al., 2008]. La teoría de rayos es un método donde se sustituyen las ondas sonoras por rayos cuya dirección desde la fuente es perpendicular a cada frente de onda. El medio de estudio puede ser considerado homogéneo y la propagación sería en línea recta. En esta teoría no se consideran los fenómenos de tipo ondulatorio, como difracción o interferencia.

Cuando una onda sonora se encuentra con un obstáculo a la onda plana inicial se suma una onda dispersada que se propaga desde el obstáculo y distorsiona la onda plana incidente. Si el obstáculo es más grande que la longitud de onda, éste genera una sombra acústica detrás del objeto. Si el obstáculo es pequeño comparado con la longitud de onda, todas las ondas dispersadas se propagarán en todas las direcciones desde el objeto, y no se produce tal sombra nítida.

La dispersión es un fenómeno importante en la propagación del sonido en el mundo real por la presencia de obstáculos, como árboles. Para analizar este tipo de atenuación se considera una propagación sonora cerca del suelo, a campo libre, lo que incluye parámetros como la propagación geométrica, la absorción del aire y el efecto por la presencia de barreras acústicas. Las barreras son consideradas como obstáculos situados entre una fuente de ruido y un receptor, a varias alturas.

Cuando una onda sonora se acerca a la barrera, una parte de la onda sonora se refleja y otra se transmite. A altas frecuencias, las barreras son efectivas y proyectan una fuerte sombra acústica. A baja frecuencia (cuando la longitud de onda puede ser igual o superior a la altura de la barrera), la barrera es menos eficaz y parte del sonido se difracta en la zona de sombra [Crocker, 2007]. El efecto de la dispersión provocado por un conjunto de objetos, como un bosque, se caracteriza por la impedancia y la rugosidad de las fuentes del ruido. Se puede encontrar en la literatura que al efecto del suelo se le debe añadir la atenuación en los bosques (e.g., [Posada-Posada et al., 2013]). Este último efecto se debe principalmente a la dispersión y absorción de los troncos, ramas y hojas.

El planteamiento del modelo nórdico consiste en determinar la propagación del sonido en presencia de árboles, desde una fuente puntual hacia un receptor,

ambos situados sobre una superficie que se supone plana, lisa y de impedancia acústica conocida. El modelo toma como punto de partida el modelo de dispersión de Leschnik [Fernandez, 2002], y se basa en la teoría geométrica de los rayos y la teoría de la difracción. Incluye el efecto de la reflexión de obstáculos, como áreas de vivienda o bosques, que se pueden incluir en el modelo utilizando un enfoque estadístico. En el modelo, las propiedades de las superficies de tierra se caracterizan por su impedancia y rugosidad, y pueden variar a lo largo de la trayectoria de propagación [Plovsing and Kragh, 2000].

A frecuencias medias y altas, la dispersión en los troncos es el factor principal de la atenuación, mientras que a bajas frecuencias el suelo es el factor principal. El follaje atenúa el sonido principalmente por la dispersión y la reflexión del suelo y este efecto puede ser añadido a la atenuación en los bosques [Posada-Posada et al., 2013]. Las simulaciones numéricas y resultados experimentales han mostrado una buena concordancia con este modelo [Tarrero et al., 2008].

El nivel de presión sonora L_W emitido por una fuente en el punto de observación es corregido con la divergencia geométrica $10 \log(4\pi r^2)$, el índice de direccionalidad D_I , la absorción atmosférica $\alpha(r)$ (calculada según la norma ISO 9613-1), y (ahora) por el efecto de dispersión por obstáculos ΔL_s . De esta manera [Tarrero et al., 2008],

$$L(r) = L_W - 10 \log(4\pi r^2) + D_I - \alpha(r) + \Delta L_s. \quad (3.66)$$

La corrección del nivel de presión sonora, debido a la dispersión, ΔL_s , incluye el término de corrección empírico $A_e(r)$, que tiene en cuenta el efecto de árboles y otros obstáculos en la propagación del sonido. La dispersión tiene dos efectos opuestos: 1) En frecuencias medias, se reduce la coherencia entre el sonido directo y el reflejado y, por tanto, las interferencias aumentan el nivel de presión, lo que tiende a aumentar el nivel de presión sonora, y 2) en altas frecuencias los árboles tienen principalmente un efecto atenuante que reduce el nivel de presión sonora. Explícitamente,

$$\Delta L_s = A_e(r) k_p k_T k_f, \quad (3.67)$$

donde

$$A_e(r) = \Delta L(H', \Upsilon, R') + 20 \log(8R'), \quad (3.68)$$

y donde H' es la altura normalizada, Υ al factor de dispersión para bosques, ζ es el factor del objeto que da lugar a la dispersión (en función de la altura H , que es la altura del obstáculo de dispersión). Los valores de ΔL se encuentran en la Tabla 3.2. Este factor se calcula en función de la densidad de los árboles n'' , en número de árboles / m^2 , y del diámetro medio de sus troncos d . El factor Υ es el coeficiente de absorción del objeto de dispersión normalizado en el rango $[0, 1; 0, 4]$ y R' que es el valor efectivo normalizado de la distancia a través de la zona o área de dispersión [Plovsing and Kragh, 2000]. Las normalizaciones son:

$$H' = H\zeta; \quad (3.69)$$

$$R' = R_{sc}\zeta; \quad (3.70)$$

$$\zeta = n'' d. \quad (3.71)$$

Si se toma en consideración el sistema de la Figura 3.3, la distancia R_{sc} es la longitud total de la trayectoria del sonido de las zonas de dispersión desde la

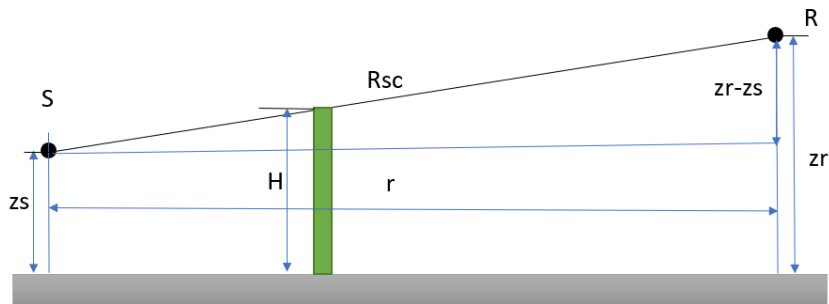


Figura 3.3: Una fuente S ubicada a una altura z_s y un receptor R ubicado a una altura z_r , la distancia de recorrido del sonido R_{sc} en el bosque cuando el obstáculo de altura H sobrepasa la altura de la fuente.

Tabla 3.2: Dispersión de la zona de atenuación ΔL en función de la altura normalizada H' . El coeficiente de absorción de los obstáculos dispersos Υ y el valor efectivo normalizado de la distancia a través de la zona R' [Plovsing and Kragh, 2000].

	$H' = 0,1$
R'	$\Upsilon = 0,4$
0,0625	6
0,125	0
0,25	-7,50
0,5	-14,50
0,75	-19,00
1	-22,80
1,5	-29,00
2	-33,30
3	-42,90
4	-52,50
6	-72,00
10	-112,0

fuente al receptor. Este valor depende de la distancia desde la fuente al receptor r , de la altura a la que se encuentra la fuente z_s y de la altura a la que se encuentra el receptor respecto del suelo z_r . Cuando la altura de la fuente sonora no supera la altura del obstáculo, se considera una dispersión en toda la distancia directa R_{sc} entre la fuente y el receptor, por lo que

$$R_{sc} = \sqrt{r^2 + (z_s - z_r)^2}. \quad (3.72)$$

Mientras que cuando la altura de la fuente sonora supera la altura del obstáculo como en la Figura 3.4), se calcula la distancia horizontal al receptor d_a , por medio de una relación de proporcionalidad, debido a que el sonido choca con las copas de los árboles y éste se dispersa. Entonces,

$$\frac{d_a}{r} = \frac{H - z_r}{z_s - z_r};$$

$$d_a = r \frac{H - z_r}{z_s - z_r}, \quad (3.73)$$

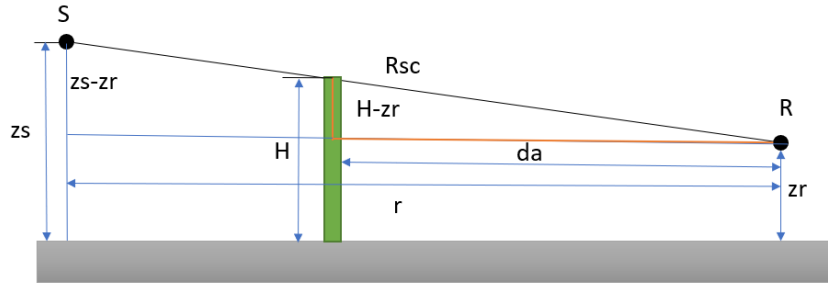


Figura 3.4: Una fuente S ubicada a una altura z_s y un receptor R ubicado a una altura z_r , la distancia de recorrido del sonido R_{sc} en el bosque cuando la fuente sobrepasa el obstáculo de altura H . Una distancia horizontal al receptor d_a , forma parte de una relación de proporcionalidad entre distancias.

y, consecuentemente,

$$R_{sc} = \sqrt{d_a^2 + (H - z_r)^2}. \quad (3.74)$$

Retomando la ecuación (3.67), el término k_p es una constante de proporcionalidad, que toma un valor de 1,25 para bosques regulares con distribución espacial homogénea [Tarrero et al., 2008]. El factor k_T es una variable que calcula el coeficiente de coherencia. Proporciona una transición suave y evita la sobre estimación a distancias cortas. Si $k_T > 1$ se usa un valor de 1 [Plovsing and Kragh, 2000], i.e.,

$$k_T = \min \left\{ 1, \left(\frac{R_{sc}\zeta}{1,75} \right)^2 \right\}. \quad (3.75)$$

El término k_f representa la fracción de sonido coherente que se transforma en sonido incoherente. Cuando entran en contacto dos ondas emitidas desde su fuente, con frecuencias y fases diferentes, se produce una interferencia. Su valor aumenta con la frecuencia y con el radio del tronco $a = d/2$ y es cero si no hay dispersión. Se considera que la dispersión es significativa solo por encima de una cierta frecuencia que depende de las dimensiones de los objetos dispersos. Este término puede seleccionarse de los valores de la Tabla 3.3 para el caso de bosques

[Fernandez, 2002],

$$k_a = \frac{2\pi f}{C_s} \left(\frac{d}{2} \right). \quad (3.76)$$

3.10 Modelo de propagación sobre el suelo

El modelo Nord2000 fue desarrollado para modelar la propagación del ruido “en exteriores”, sobre superficies de agua y tierra. Se considera una metodología para el estudio de propagación del sonido desde una fuente puntual que emite ondas esféricas en una atmósfera isotrópica y homogénea sobre un terreno plano y uniforme [Tarrero et al., 2008]. En este tipo de medio, la velocidad del sonido no depende de la posición. La dirección de propagación de la onda no varía a lo largo del medio y, por tanto, las trayectorias de los rayos son líneas rectas. En la Figura 3.5 se muestra una fuente puntual que emite una señal hacia un receptor. Además, se evidencian dos rayos, uno directo entre los dos puntos y otro reflejado en la superficie del suelo.

El modelo Nord2000 utiliza el efecto de la impedancia del suelo finita y la absorción atmosférica. Las condiciones de reflexión del suelo se dan en función del ángulo de incidencia y de las características del suelo. La impedancia se introduce obteniendo una estimación del coeficiente de reflexión. La energía acústica se reflejará más o menos dependiendo de los materiales que lo conformen. Esta propiedad mediante un parámetro llamado impedancia acústica.

Tabla 3.3: Fracción de sonido coherente, k_f , y el producto k_a entre la longitud de onda k y el radio medio del tronco $a = d/2$ [Fernandez, 2002].

k_a	k_f
0,7	0
1	0,05
1,5	0,2
3	0,7
5	0,82
10	0,95
20	1

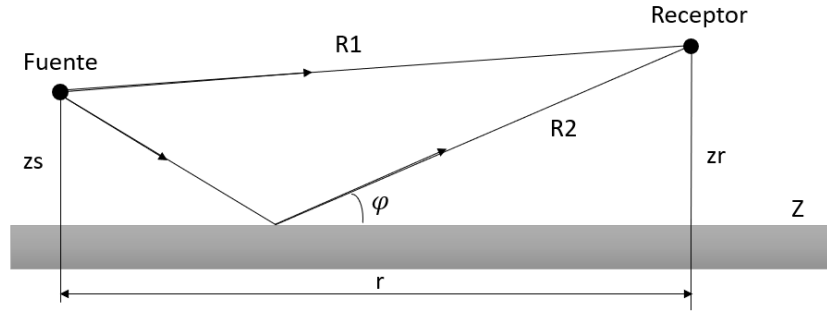


Figura 3.5: Geometría de las ondas directas y las ondas reflejadas en el suelo en la atmósfera en presencia del suelo [Ostashev et al., 2018].

En particular, el modelo incluye el factor K_Z para tomar en consideración el efecto del suelo. El modelo se expande como

$$L(r) = L_W - 10 \log(4\pi r^2) + D_I - \alpha(r) + \Delta L_s + K_Z. \quad (3.77)$$

Se recalca que la fuente sonora se considera como monopolar, ya que su campo de sonido es generado de manera puntual y con simetría esférica, es decir, depende sólo de la distancia radial. En la mayoría de situaciones reales la superficie del suelo es irregular y rugosa, y existen obstáculos como árboles, colinas, casas, etc. Estos obstáculos dan lugar (adicionalmente) a reflexión, dispersión y, consecuentemente, la predicción se torna más complicada. Cuando una onda sonora golpea la superficie del suelo una parte de la onda se refleja y la otra se transmite al suelo. La velocidad de propagación de la onda en el suelo es menor que en el aire.

Algunos terrenos naturales pueden modelarse como medios porosos. Una onda sonora provoca una vibración del aire en los poros del medio terrestre [Salomons, 2001]. Si se considera un campo de sonido armónico, la amplitud de presión compleja P_c y la amplitud de velocidad compleja \vec{v}_c mantienen una relación en donde las fluctuaciones asociadas al fluido P_c/\vec{v}_c es continua en la superficie del suelo (por ejemplo, $x = 0$) y justo debajo de la superficie del suelo, siendo esta relación la impedancia característica del suelo. Si el medio es homogéneo la impedancia característica es independiente de la profundidad en el suelo.

Las impedancias, tanto del suelo como del aire, inciden en el reflejo de la superficie de las ondas sonoras. Para las ondas esféricas, la impedancia es igual

a aquella de las ondas planas, excepto a cierta distancia pequeña de la fuente [Salomons, 2001]. A grandes distancias, la fuente de sonido se aproxima a una fuente esférica y su curvatura del frente de onda se vuelve insignificante, aproximándose a la propagación de una onda plana.

Se considera una onda de sonido plana, que se propaga en sobre un medio poroso, provocando una vibración del aire. La atmósfera y la superficie son medios que no presentan variaciones en el espacio ni en el tiempo. El número de onda k es diferente de su valor en el aire libre y contiene una parte imaginaria, que depende de la resistencia al flujo. La parte imaginaria corresponde a una reducción de la amplitud de la onda sonora mientras aumenta la distancia de propagación. Se utilizará un modelo empírico de impedancia para materiales absorbentes fibrosos desarrollado, por Delany and Bazley [1970].

Por su lado, la amplitud de presión compleja en el aire (sobre la superficie del suelo) es igual a la suma de la amplitud de presión compleja de la onda incidente y la amplitud de presión compleja de la onda reflejada. La presión sonora relativa se puede determinar utilizando el campo libre y añadiendo el campo reflejado. Explícitamente,

$$P_c = C_1 \frac{1}{R_1} \exp(ikR_1) + C_2 \vartheta \frac{1}{R_2} \exp(ikR_2), \quad (3.78)$$

donde el primer término representa el campo directo de la fuente y el segundo término representa la contribución de la reflexión en el suelo al campo. R_1 y R_2 son las distancias del trayecto directo entre la fuente-receptor y del trayecto del rayo reflejado igual a la distancia de la fuente de la imagen al receptor, respectivamente

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z_r - z_s)^2}; \quad (3.79)$$

$$R_2 = \sqrt{r^2 + (z_s + z_r)^2}. \quad (3.80)$$

Finalmente, ϑ es el coeficiente de reflexión esférica del suelo, considerando una atmósfera homogénea.

El nivel de presión sonora relativo, por efecto del suelo, se define a través de

una relación entre el nivel de presión acústica compleja P_c y el nivel de presión acústica de campo libre P_l ,

$$K_Z = 10 \log \left(\frac{|P_c|^2}{|P_l|^2} \right),$$

$$K_Z = 20 \log \left| \frac{P_c}{P_l} \right|. \quad (3.81)$$

Si se reemplaza en la penúltima relación los terminos de la ecuación (3.78),

$$K_Z = 10 \log \left| \frac{C/R_1 \exp\{ikR_1\} + C\vartheta/R_2 \exp\{ikR_2\}}{C/R_1 \exp\{ikR_1\}} \right|^2;$$

$$K_Z = 10 \log \left| 1 + \frac{R_1}{R_2} \vartheta \frac{C \exp\{ikR_2\}}{C \exp\{ikR_1\}} \right|^2;$$

$$K_Z = 10 \log \left| 1 + \frac{R_1}{R_2} \vartheta \exp\{ik(R_2 - R_1)\} \right|^2; \quad (3.82)$$

$$K_Z = 20 \log \left| 1 + \frac{R_1}{R_2} \vartheta \exp\{ik(R_2 - R_1)\} \right|.$$

Si se toma en consideración que

$$\exp(ib) = \cos(b) + i \sin(b),$$

se puede reescribir la ecuación (3.82),

$$K_Z = 10 \log |1 + d \exp(ib)|^2, \quad (3.83)$$

donde

$$d = \frac{R_1}{R_2} \vartheta,$$

y

$$b = \exp k(R_2 - R_1),$$

para escribir

$$K_Z = 10 \log |1 + d(\cos b + i \sin b)|^2,$$

$$\begin{aligned}
K_Z &= 10 \log |1 + d \cos b + id \sin b|^2; \\
K_Z &= 10 \log |(1 + d \cos b) + id \sin b|^2; \\
K_Z &= 10 \log ((1 + d \cos b)^2 + i^2 d^2 (\sin b)^2); \\
K_Z &= 10 \log ((1 + d \cos b)^2 - d^2 (\sin b)^2).
\end{aligned}$$

Finalmente,

$$K_Z = 10 \log \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \vartheta \cos(k(R_2 - R_1)) \right)^2 - \frac{R_1^2}{R_2^2} \vartheta^2 \sin^2(k(R_2 - R_1)) \right]. \quad (3.84)$$

Si en el medio de propagación se considera una superficie como el suelo las condiciones de propagación cambian. El receptor recibe un rayo directo y otro reflejado en el suelo. Las condiciones de reflexión del suelo forman parte de la función del ángulo de reflexión y de las características del suelo, ya que dependiendo de los materiales que lo conformen reflejará más o menos la energía acústica que recibe [Fernandez, 2002]. Cuando el sonido se propaga por el suelo el sonido directo interactúa con el sonido reflejado y el efecto del suelo se determina por la presión acústica en el receptor,

$$\vartheta = Rp + (1 - Rp)F(w), \quad (3.85)$$

donde el término Rp es el coeficiente de reflexión de las ondas planas y el término $(1 - Rp)F(w)$ tiene en cuenta las componentes de las ondas del suelo y de la superficie [Berengier et al., 1997]. $F(w)$ es una función de pérdidas de frontera o función compleja de la onda de tierra [Shu et al., 2007],

$$F(w) = 1 + i\pi^{1/2}w \exp(-w^2) \operatorname{erfc}(-iw), \quad (3.86)$$

donde w es una distancia numérica para la extensión de superficie de reacción [Embleton et al., 1976, Berengier et al., 1997],

$$w^2 = 2ik_0R_2\chi^2[Z(1 - Rp)]^{-2}. \quad (3.87)$$

Aquí, Z es la impedancia superficial específica normalizada y

$$\chi = [1 - (k_0/k)^2 \cos^2 \varphi]^{1/2}, \quad (3.88)$$

con $k_0 = 2\pi f/C_s$, k el número de onda complejo de la estructura porosa y φ es el ángulo de incidencia. El coeficiente de reflexión de la onda plana, R_p , está dado por una superficie de reacción local cuando la componente normal de la velocidad de la partícula en un punto de la superficie depende solamente de la presión en ese mismo punto [Bérengrer et al., 2003],

$$R_p = \frac{Z \sin(\varphi) - \chi}{Z \sin(\varphi) + \chi}. \quad (3.89)$$

Se puede explicitar, además, que

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (z)^{2n+1}}{n!(2n+1)}. \quad (3.90)$$

El modelo de impedancia acústica, normalizada para campo abierto, se encuentra en términos de la frecuencia y la resistividad efectiva del flujo [Salomons, 2001, Attenborough, 1985]. En particular, Delany and Bazley [1970] desarrollaron un modelo empírico para materiales absorbentes fibrosos, que se utiliza para terrenos naturales, como los pastizales [Defrance et al., 2007]. En este caso,

$$Z = 1 + 0,0511 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0,75} + i0,0768 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0,73}, \quad (3.91)$$

y

$$k = \frac{\omega}{C_s} \left[1 + 0,0858 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0,70} + i0,175 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0,59} \right]. \quad (3.92)$$

El material en este modelo se caracteriza por un solo parámetro, como la resistividad del flujo de aire σ [kN s m^{-4}]. Otros parámetros independientes son C_s en el aire, ω , f . Se puede observar que el signo positivo de las partes imaginarias en las ecuaciones anteriores corresponde a la elección del factor de tiempo armónico en los modelos de propagación del sonido.

En el modelo con obstáculos se considera al suelo como una capa de material poroso, homogénea y de espesor finito, con una resistividad al flujo. Esta resistividad es la resistencia específica que opone el material a que sea traspasado por el flujo de aire. Además, es una característica de cada suelo. Uno de los modelos más sencillos que utiliza la resistividad es el desarrollado por Delany and Bazley [1970], ya que tiene la ventaja práctica de utilizar un solo parámetro como la resistividad de flujo del suelo. Este modelo se basa en la descripción de materiales porosos utilizado en la propagación del sonido en exteriores y en medios porosos con una baja impedancia. En la mayoría de las situaciones la superficie del suelo es irregular y rugosa. Entre la fuente y el receptor hay obstáculos, especialmente, árboles. En el estudio se considera a los árboles como factor predominante.

El modelo Nord2000 divide a las superficies de suelo en siete clases, como se observa en la Tabla 3.4. La impedancia del suelo, predominantes en estos casos de estudio, pueden estimarse bastante bien a través de la clase B, equivalente a un suelo forestal blando, con una resistividad de flujo $\sigma_B = 31,5 \text{ kN s m}^{-4}$.

Tabla 3.4: Tipos de impedancia de suelo en función de la clase y la resistividad de flujo [Plovsing and Kragh, 2000].

Clase de Impedancia	Resistividad de flujo kN s m^{-4}	Descripción
A	12,5	Muy blando (nieve o musgo)
B	31,5	Suelo forestal blando (brezo corto y denso o musgo espeso)
C	80	Suelo suelto no compactado (césped, hierba, tierra suelta)
D	200	Suelo normal no compactado (suelos forestales, campos de pastoreo)
E	500	Terreno compactado y grava (céspedes compactados, zona de parque)
F	2 000	Suelo denso compactado (camino de grava, aparcamiento)
G	20 000	Superficie dura (asfalto denso, hormigón, agua)

Un componente importante de este estudio es la utilización de técnicas de Machine Learning. Proceso cuyo núcleo es la conversión de información en acciones inteligentes [Halde, 2016]. Actualmente es, además, una disciplina que proporciona a los sistemas cierta capacidad de “aprender” y mejorar automáticamente a partir de la experiencia. Estas técnicas se usan para enseñar a las máquinas cómo manejar los datos, que por ciertos motivos no se los puede interpretar, más eficientemente [Mahesh, 2020]. El Machine Learning posee técnicas que abarcan un amplio campo en el mundo computacional y, mediante métodos matemáticos, permiten dar un tratamiento especial a los datos. A través de la implementación de algoritmos sencillos se pueden obtener predicciones de los datos y de las características importantes de los mismos. Se ha reportado que los modelos predictivos tienen una precisión de entre el 60% y el 80%, ver e.g., [Halde, 2016].

Entre los algoritmos más utilizados podemos numerar: Regresión lineal, Regresión logística, Red neuronal, Árbol de decisión y Naïve Bayes, Máquinas de vectores de soporte y Combinación de Algoritmos. En este trabajo de investigación nos focalizamos en la Regresión Lineal. Método estadístico que permite crear nuevos puntos de datos de posición dentro del rango de puntos de datos conocidos. En resumen, el algoritmo escrito en función de los datos de entrada (mediciones reales) se ajusta a ellos, dentro de un intervalo de confianza; a continuación, la computadora (sin necesidad de realizar otro cálculo para determinar el modelo) utiliza el algoritmo para obtener los resultados predictivos. En este caso, en el espacio físico tridimensional. Es decir, esta metodología se aplicará directamente en el Capítulo 4 para conocer los valores de ubicación espacial del correspondiente frente de onda. Un cálculo posterior de la distancia radial permite llegar a la primera aproximación del modelo sin obstáculos y luego, con ciertas expansiones como la consideración de árboles y el efecto de suelo predominante, nos permite llegar a un segundo modelo con obstáculos.

3.11 Variables respuesta o resultados alcanzados

Para el cumplimiento de los objetivos se considera como variable independiente a la transmisión de ondas sonoras en espacios exteriores, con

características propias del medio y propiedades acústicas, que permiten medir la atenuación por efectos de absorción, reflexión del sonido cuando las ondas impactan sobre ellos; frente a la variable dependiente, que es el tipo de obstáculo considerado en el estudio en este caso atmósfera, árboles y el suelo. Es decir, las propiedades de absorción se manifiestan como energía incidente disipada al contacto con el obstáculo afectando a la propagación del sonido. Como resultado se pretende obtener un modelo teórico que permita calcular la presión sonora de manera ideal sin obstáculos a su paso y posterior una segunda aproximación considerando obstáculos en la propagación del sonido. Para el análisis de los datos en vista de que son pocos, se utilizó la técnica de interpolación lineal y se obtuvo un aumento de datos que sirvieron para alimentar el modelo. Los resultados del modelo empírico permitieron calcular el nivel de presión sonora.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por primera vez, un proyecto financiado enteramente por fondos ecuatorianos estudiará el ruido de la industria de extracción hidrocarburífera en las cercanías de dos reservas biológicas. Los parámetros levantados in situ se usarán como insumos de los modelos, descritos en el Capítulo anterior.

4.1 Salida de campo: Reserva Biológica de Limoncocha



Figura 4.1: Panel izquierdo: Ubicación geográfica de la Reserva Biológica de Limoncocha. Panel derecho: Ubicación más aproximada de la Estación Científica Limoncocha.

La Reserva Biológica de Limoncocha (RBL) está ubicada en el cantón Shushufindi de la Provincia de Sucumbíos, al nororiente de la Amazonía Ecuatoriana (panel izquierdo de la Figura 4.1). La RBL alberga especies de flora y fauna de un elevado interés científico. Constituye uno de los ecosistemas más importantes del Ecuador, el cual debe ser cuidado con acciones que sirvan de apoyo al desarrollo sustentable de sus recursos. La RBL se encuentra expuesta a peligros potenciales de contaminación de sus recursos debido a las actividades extractivas de petróleo, agrícolas y antropogénicas propias de la zona. La presencia de bloques petroleros con varios campos productivos, así como la agricultura de la zona, son de importancia para la economía nacional. Estas actividades generan impactos ambientales a nivel local y global, causando inestabilidad en la biodiversidad y en el ambiente [Carrillo et al., 2019]. Por estos motivos, la Universidad Internacional SEK, a través de su Facultad

de Ciencias Ambientales, estableció un centro de investigación y enseñanza en las inmediaciones de la RBL, denominado “Estación Científica Amazónica SEK-Limoncocha” (ECL) ($00^{\circ} 23' 57,40''S$; $76^{\circ} 37' 5,31''O$). Su locación se aprecia en el panel derecho de la Figura 4.1.

El primer sitio de toma de muestras acampó en la ECL, marcando una metodología clara. En el primer paso, se inició un reconocimiento del lugar a través de la ruta llamada “sendero escuela”, de aproximadamente 420 m de largo (panel izquierdo de la Figura 4.2). Este camino atraviesa áreas degradadas y tierras anteriormente cultivadas en evidente proceso de regeneración. La vegetación varía entre herbácea y arbustiva en los primeros metros del sendero y se incrementa paulatinamente en una altura aproximada de 25 m y disminuye en densidad como un bosque secundario en recuperación constituido por árboles jóvenes y delgados, como se aprecia en el panel derecho de la Figura 4.2. Además se observó árboles frutales muy altos.



Figura 4.2: Fotografías tomadas en la ruta “sendero escuela”, que atraviesa áreas degradadas y tierras en proceso de regeneración (panel izquierdo). La vegetación varía entre herbácea y arbustiva, y alcanza una altura de ~ 25 m (panel derecho).

Un tanto alejado del sendero, en el Complejo Petroecuador Shushufindi –Pozo SSFD84 ($00^{\circ} 12' 9,78''S$; $76^{\circ} 39' 26,40''O$) (panel izquierdo de la Figura 4.3)– predomina una vegetación compuesta por árboles maduros, de ~ 20 m y arbustos ~ 2 m. Igualmente, en la Envasadora GLP Shushufindi ($00^{\circ} 11' 58,19''S$; $76^{\circ} 38' 59,73''O$) se realizaron grabaciones ultrasónicas con el equipo Song Meter SM4BAT FS & ZC y con un micrófono ultrasónico SMM-U2 de manera perpendicular a la fuente de ruido. Las mediciones se realizaron en 10 puntos, a



Figura 4.3: Panel izquierdo: Ubicación de la Refinería Shushufindi EP Petroecuador. Panel derecho: Fotografía de pozo de extracción de petróleo en el Complejo Petroecuador Shushufindi. Se identifica vegetación alrededor del pozo de extracción.

lo largo de 633 m, por una vía secundaria que se aleja de la fuente sonora. La vía no presenta vegetación y, posteriormente, se cubría con vegetación circundante de bosque secundario, con árboles de hasta $\sim 50\text{m}$, como se muestra en el panel derecho de la Figura 4.3.

Posteriormente, en el Bloque 15 CPF ($00^{\circ}22' 19,01''\text{S}$; $76^{\circ} 37' 56,48''\text{O}$) (panel izquierdo de la Figura 4.4) se realizaron grabaciones de ultrasonidos con el equipo Song Meter SM4BAT FS & ZC, colocando el micrófono ultrasónico SMM-U2 de manera perpendicular a la fuente de ruido en 6 puntos a lo largo de 625 m en una carretera. La vegetación de esta carretera está predominante compuesta por arbustos de $\sim 2 - 3\text{m}$ de altura. En las cercanías se observó una franja de bosque maduro de $\sim 50\text{ m}$ de altura (ver panel derecho de la Figura 4.4).

Finalmente, en el sendero “El Caimán” ($00^{\circ} 23' 12,98''\text{S}$; $76 36' 37,55''\text{O}$) se realizaron experimentos de grabación de sonidos ultrasónicos artificiales, producidos por las aplicaciones Noise Generator y Frequency Generator. Estos emitían sonidos en frecuencias desde 1 kHz hasta 22 kHz. Cada tono se emitía en el lapso de 25s y fueron registrados por el equipo Song Meter SM4BAT FS & ZC, colocando el micrófono ultrasónico SMM-U2 de manera perpendicular a la fuente de ruido. Estos experimentos se realizaron en 3 transectos¹ a lo largo del sendero. En el primer y segundo transecto se hizo 1 repetición cada 5m, a lo largo de 50m; mientras que en el último se realizó una repetición cada 10m, a lo largo de 100m, como se identifica con la línea sólida azul de la Figura 4.5.

¹Muestreo caracterizado por la toma de datos en determinados recorridos prefijados.



Figura 4.4: Panel izquierdo: Ubicación de Petroamazonas EP Bloque 15-CPF. Panel derecho: Fotografía tomada en una carretera principal ubicada en el perímetro del complejo, donde se observa una franja de bosque maduro.

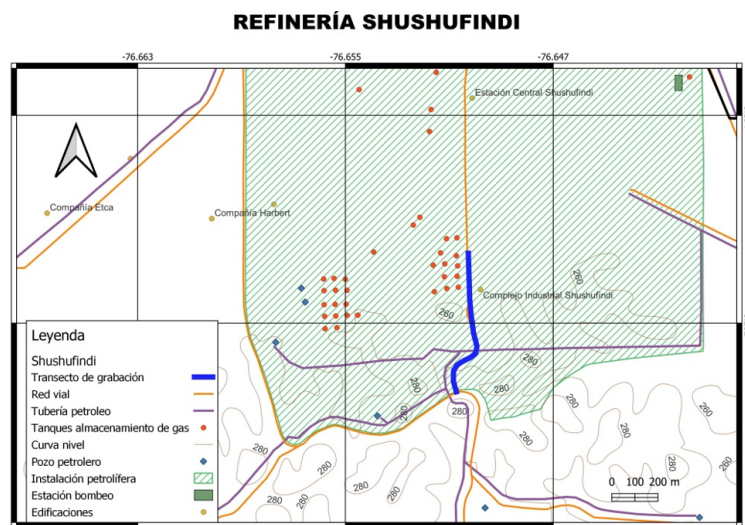


Figura 4.5: Mapa referencial de los puntos de grabación de ultrasonidos del complejo petrolero Shushufindi- sendero El Caimán. El camino de color azul representa los puntos medidos utilizando el micrófono ultrasónico SMM-U2 de manera perpendicular a la fuente de ruido.

4.2 Salida de campo: Parque Nacional Yasuní

La Estación Científica Yasuní (ECY), administrada por la Escuela de Ciencias Biológicas de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, está situada dentro del Parque Nacional Yasuní (PNY) y está ubicada en la provincia de Orellana, en la orilla derecha del Río Tiputini, a poca distancia de su confluencia con el Río Tivacuno ($76^{\circ} 23' 50'' W$; $0^{\circ} 40' 27'' S$) (panel izquierdo de la Figura 4.6). Brinda el apoyo a estudios socio-ambientales y al incremento de la conciencia ambiental de la sociedad en general. Por su parte, el PNY fue declarado como área protegida en 1979 y diez años más tarde la UNESCO estableció su incorporación dentro de

la Red Mundial de Reservas de Biósfera.

La ECY fue el punto de inicio de la segunda salida de campo para tomar mediciones con el sonómetro HY1361. Como se puede apreciar en el panel derecho de la Figura 4.6, las mediciones iniciaron en un punto cercano a la estación Tivacuno C (de color azul) en el sendero 1 “Mirador”, con una distancia entre puntos (de color rojo) de 25m, aproximadamente.

En un día posterior, aunque con condiciones atmosféricas similares al anterior, en la entrada a la estación NPF (panel izquierdo de la Figura 4.7) como se puede apreciar en el panel de la derecha de la Figura 4.7 se tomaron 34 mediciones a lo largo de 950m, con 30m entre punto aproximadamente. Se registraron las medidas de ruido por medio del sonómetro HY1361 y variables atmosféricas con el anemómetro HoldPeak HP-866B. Se puede evidenciar una considerable presencia de obstáculos.

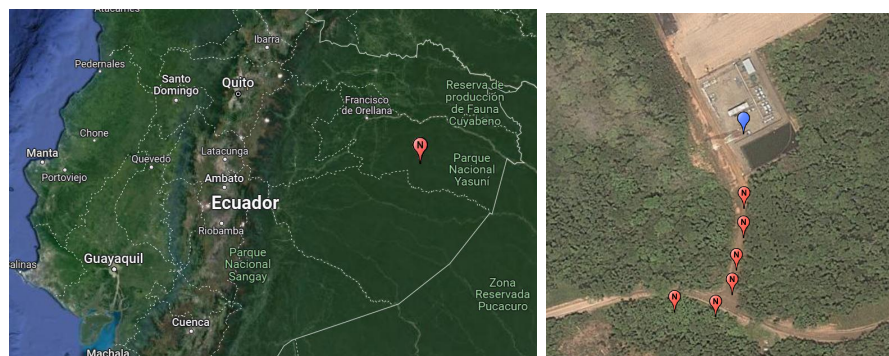


Figura 4.6: Panel izquierdo: Ubicación de la Estación Tivacuno C. Panel derecho Ubicación de los puntos de medición de sonido en la entrada a la estación en el sendero 1 “Mirador” de la ECY, la distancia entre puntos fue 25m aproximadamente.

En el sendero 2 “Chorongo” (panel izquierdo de la Figura 4.8), se realizaron réplicas de las experimentaciones de absorción de sonido a lo largo de 40 puntos, con 5m entre cada punto, los cuales se dividieron en dos partes, 20 en un transecto plano, y 20 en un transecto con pendiente como se puede apreciar en el panel derecho de la Figura 4.8. El playback consistía en un sonido que iba desde los 500 a 20000 Hz en 15 segundos. Los datos fueron tomados con el sonómetro HY1361.



Figura 4.7: Panel izquierdo: Ubicación de la Estación NPF - Repsol. Panel derecho: Ubicación de los puntos de medición de sonido en el camino de entrada a la estación de NPF.

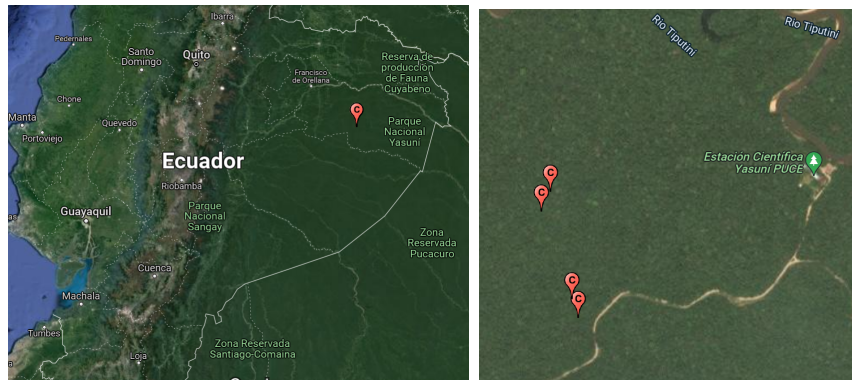


Figura 4.8: Panel izquierdo: Ubicación del sendero El Chorongo. Panel derecho: Ubicación de la ruta de medición en el sendero Chorongo, donde se realizaron mediciones de absorción de sonido con 5m entre cada punto

4.3 Parámetros considerados en el modelo teórico

En el modelo empírico de propagación sonora se han considerado parámetros geométricos relacionados con las características ambientales propias del lugar como por ejemplo: altura de la fuente, altura del receptor, distancia entre la fuente y el receptor, temperatura, humedad relativa, resistividad al flujo, diámetro medio de los troncos, altura media de los árboles, densidad superficial de los árboles, coeficiente de absorción de los árboles, entre otros.

Estos parámetros ingresan al algoritmo, implementado como un paquete de códigos en lenguaje de programación Fortran en este trabajo de investigación. El paquete de código calcula el nivel de presión en un medio con obstáculos, y sin obstáculos, para cada distancia radial. Los principales obstáculos considerados son

los árboles presentes y el suelo, cubierto con una densa vegetación predominante.

En el primer acercamiento no se considera la presencia de árboles entre la fuente y el receptor. En este caso, el modelo calcula el nivel de presión sonora en el punto de observación a partir del nivel de potencia sonora, la divergencia geométrica y la absorción atmosférica. A continuación, se usa el Modelo Nord2000 para apreciar la influencia de los árboles y del suelo. Estos resultados se comparan con resultados experimentales en la propagación del sonido en diferentes ambientes con la presencia, o no, de obstáculos.

Se nota que en ciertos lugares cercanos a las estaciones de extracción o producción se observó una pronunciada presencia de árboles y de vegetación que rodean a la fuente sonora, invadiendo todo el sector. En particular, se constató la presencia de árboles jóvenes y delgados, árboles maduros y frutales, una mezcla de bosque secundario, cultivos y pastizales. En el modelo se considera la presencia de árboles, a través de una distribución espacial normal. La altura aproximada de estos árboles oscila entre 20 y 50m. Su diámetro medio aproximado es de 15 a 20cm.

Se puede estimar que estos obstáculos impiden la propagación directa del sonido. Además, el modelo se expande para considerar el efecto del suelo, caracterizado por tener una capa densa de ~ 50 cm de altura, con secciones de troncos con plantas trepadoras de hasta ~ 20 m y un estrato final de ramas de unos 30 a 40m de altura.

4.4 Propagación sonora

Los parámetros obtenidos in situ permiten medir el nivel de presión sonora, provocado por fuentes de emisión permanente, alrededor de pozos petroleros. Estos estudios contemplan una dispersión acústica a partir de un nivel de potencia corregido por la divergencia geométrica, la absorción atmosférica, la presencia de árboles y el efecto de suelo. Se pudo notar que el levantamiento de datos tiene cierta complejidad, debido a que los senderos por donde se necesitaba caminar están llenos de una abundante vegetación y una capa lodosa, que impide el acceso a ciertos lugares.

La selección del sitio de medición se fundamenta en el lugar en donde más

Tabla 4.1: 34 puntos de medición de las variables atmosféricas: nivel de presión sonora (dB), frecuencia (Hz), elevación (msnm), temperatura (°C) y velocidad del viento (km/h). Puntos ubicados desde el ingreso a la estación NPF en la Estación Científica Yasuní a lo largo del trayecto de 950m con una separación entre puntos de 30m.

Punto grabación	dB	Frecuencia (Hz)	Elevación (msnm)	Temperatura (°C)	Velocidad viento (km/h)
NPF1	88,1	89	241	25,1	0,3
NPF2	95,2	98	241	25,9	2,1
NPF3	91,5	88	239	27	0
NPF4	83,5	80	238	27,2	0,3
NPF5	85,6	88	239	27,4	1,4
NPF6	77,8	80	239	27,4	0,3
NPF7	77,7	77	239	27,9	0,3
NPF8	78,9	80	239	27,8	1,4
NPF9	78	75	246	27,6	2,8
NPF10	77,8	79	246	27,8	0
NPF11	71,5	73	274	27,1	3,9
NPF12	71,1	77	248	28	5
NPF13	69,8	73	249	27,8	1,4
NPF14	70,3	73	249	28,3	7
NPF15	68,7	69	249	28,2	2,1
NPF16	67,1	72	250	28,5	2,5
NPF17	74,1	73	250	28,4	1
NPF18	75,9	74	251	28,1	0
NPF19	79,4	84	252	28,3	7
NPF20	79,5	79	252	28,5	0
NPF21	77,7	78	252	28	3
NPF22	88,4	94	278	27,8	0,7
NPF23	85	90	278	28,7	0,7
NPF24	75,6	76	263	28,7	3,2
NPF25	74,5	75	263	29,4	4,3
NPF26	97,5	87	262	28,9	3,2
NPF27	74,1	79	263	28,7	3,2
NPF28	75	71	264	29,2	3,9
NPF29	62,8	65	264	30,2	2,1
NPF30	72,4	71	263	31,6	0,3
NPF31	68,5	69	261	31	1,4
NPF32	72,6	70	177	31,3	2,1
NPF33	85,0	92	283	28,7	0,7
NPF34	84,7	79	263	28,7	0

se logró tomar más mediciones, esto, debido a la dificultad de poder caminar por los senderos. Las distancias radiales consideradas desde la fuente sonora hasta cada punto llegan aproximadamente hasta 1km de longitud. En la estación NPF se tomaron 34 mediciones (panel derecho de la Figura 4.7), puntos que se consideraron como nodos principales. Entre estos nodos no existen la distancia no sobrepasa los 50m entre punto a punto. Debido a sus características de medición, se ha elegido la lista de datos mostrada en la Tabla 4.1. En la información obtenida la velocidad del viento tiene valores muy pequeños en el rango $[0; 4, 3]$ km/h. Por esta razón, en el estudio, se desprecia la velocidad del viento. Los puntos de datos interpolados se encuentran entre los nodos principales.

Las primeras mediciones fueron tomadas a lo largo del camino de ingreso a la estación NPF, como se detalló en la Sección anterior. En el panel (a) de la Figura 4.9 se representa la ubicación de los primeros puntos, de la Tabla 4.1, en un sistema cartesiano $x - y$, paralelo al suelo. A continuación, se aplica la técnica de Machine Learning de interpolación lineal, que es una técnica dentro del método de Regresión Lineal, como se detalló en el Capítulo anterior. Esta técnica de interpolación lineal se desarrolló con base en los puntos nodales de la Tabla 4.1. Con el uso de este mecanismo se garantiza que el resultado de datos meteorológicos sea más significativo, desde el punto de vista estadístico. Considerando que los datos están asociados a una posición GPS, el primer modelo de propagación sin obstáculos determina el nivel de presión para cada medida cuasi horizontal (x, y) . En la Figura 4.9 (panel b) se presenta el nivel de presión sonora en línea continua, a lo largo de la distancia radial, donde se observa una esperada disminución de presión mientras se aleja de la fuente.

Debido a su carácter homogéneo, isótropo y radial se utilizó un código en Matlab (ver la Figura 4.10) para extender los resultados en el espacio tridimensional. En dicho gráfico, la barra de colores representa la intensidad del nivel de presión sonora, por cada punto espacial. Esta disminuye radialmente, pero no de manera homogénea, a su paso por el bosque. El color amarillo representa valores positivos, mientras que el color azul denota valores negativos.

A continuación, incorporamos factores de dispersión ocasionado por los obstáculos que se encuentran en el ambiente. En el PNY existe una considerable

presencia de árboles. En una hectárea se reportan ~ 670 especies de árboles. El bosque de tierra firme constituye el principal ecosistema del parque [Pérez et al., 2014]. Estos árboles rodean a los pozos de extracción de petróleo, incidiendo en el cálculo de la propagación del sonido.

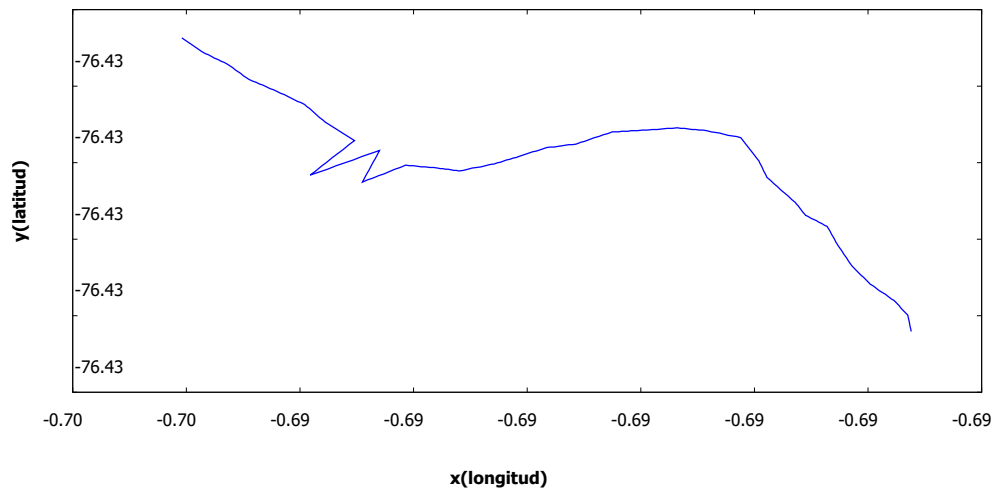
Se debe recordar que el modelo que considera obstáculos necesita medidas geométricas, como el diámetro medio del tronco del árbol, la altura de obstáculo de dispersión normalizada, la altura media del obstáculo disperso, el coeficiente de absorción de obstáculos de dispersión, la distancia efectiva normalizada a través de la zona de dispersión, la densidad de los árboles por metro cuadrado, la trayectoria total del sonido a través de la zona de dispersión. Medidas que las estimamos in situ y a través de la bibliografía.

Para el diámetro del obstáculo se basa en un estudio realizado en el PNY. Los bosques amazónicos son ricos en especies. Existe entre 200 y 300 especies de árboles que coexisten en un solo sitio. La alta diversidad tiene que ver con la variación local en los recursos del suelo causada por la topografía del sector. Existe una amplia evidencia de que la partición de especies individuales y gradientes topográficos [Valencia et al., 2004]. Los estudios además han localizado e identificado árboles, arbolitos y arbustos en 25ha de bosque. Considerando el grado en que la composición de especies de árboles cambia con la posición topográfica, así como con la distancia geográfica. El parque está casi nivelado a unos 200 m sobre el nivel del mar, pero atravesado por numerosas crestas que se elevan entre 25 y 40m por encima de los arroyos del bosque intermedio [Valencia et al., 2004].

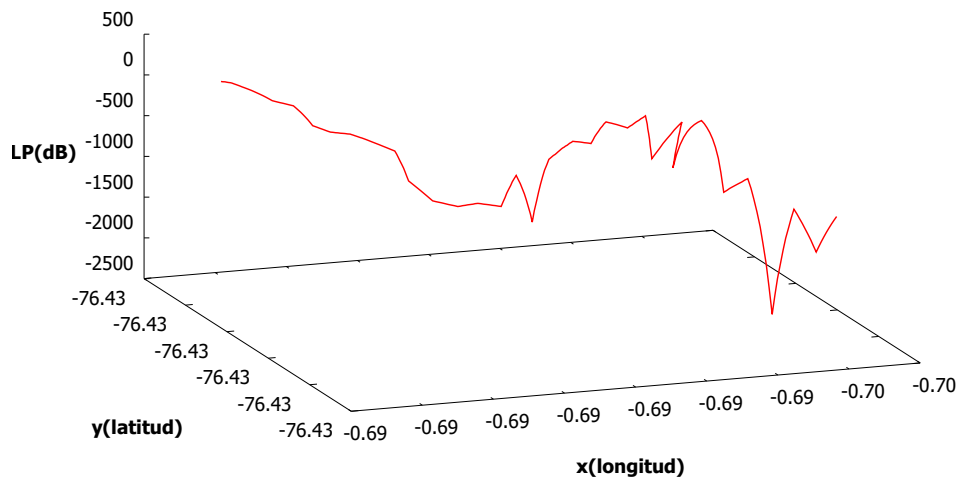
Para determinar la densidad superficial se basó en los estudios que toman como referencia una parcela de 25ha, ubicada dentro del parque justo al sur del río Tiputini en la siguiente ubicación ($0^\circ 41'S$, $76^\circ 24'W$). Según Valencia et al. [2004], se considera árbol de dosel, o emergente, aquel cuyas medidas son entre 25 y 35m, y hasta 50m de altura. Dentro de los árboles más predominantes, y más altos, tenemos las especies *Eschweilera Coriacea*. Su fruto es alimento de loros y guacamayos especies existentes del lugar.

Otra especie que nos ayuda como referencia es *Cedrelinga Cateniformis*. Es una especie que tiene entre 25-40m. Sus flores son visitadas por insectos. Esta

especie, con un diámetro $> 1\text{m}$, es la más numerosa. En el caso de árboles altos, la densidad considerada es $\sim 709,9$ individuos/ ha^{-1} , equivalente a una densidad $\sim 0,003$ árboles/ m^2 . Finalmente, la clasificación del terreno se determina utilizando el modelo empírico de Delany and Bazley [1970]. Con la combinación de estos factores, el modelo de propagación de sonido ha sido implementado y el programa calcula el nivel de presión con obstáculos, en decibeles, para cada distancia fuente-receptor.



(a)



(b)

Figura 4.9: Panel (a): Ubicación de puntos interpolados en plano xy de un medio homogéneo. Panel (b): Nivel de presión sonora en el eje vertical calculado con el modelo inicial sin obstáculos que disminuye a medida que se aleja de la fuente en sus ejes horizontal y vertical.

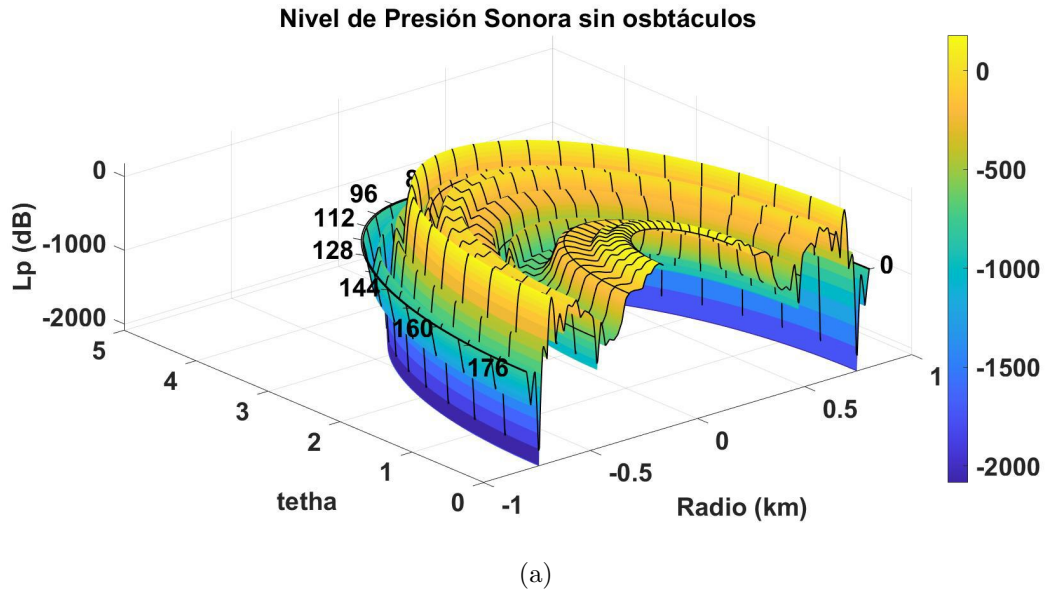


Figura 4.10: Representación polar de la propagación del sonido sin obstáculos sobre el plano xy , alrededor de la fuente. La barra de colores muestra la intensidad de L_p .

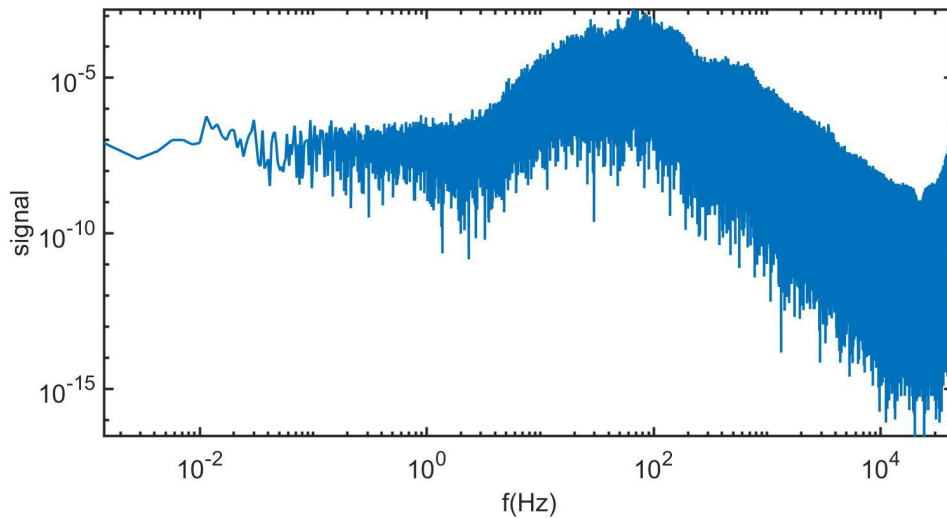


Figura 4.11: Espectro de potencias calculado del archivo de audio "SR001MS.wav", tomado como ejemplo. En el eje horizontal la frecuencia en Hz, y en el eje vertical la amplitud de la potencia.

Las mediciones se grabaron en archivos de audio a distancias de 3, 20 y 60m del perímetro del pozo de extracción. Cada archivo posee dos canales de audio, que duplican la señal. Entonces, se ha elegido la información de un solo canal. El espectro de potencia de una de estas muestras se puede observar en la Figura 4.11, donde se muestra la existencia de un amplio rango de frecuencias, propias

de la Amazonía. A continuación, se identifica el pico de frecuencia más alto y este valor se utiliza para realizar pruebas y comprobar los resultados arrojados por el modelo de propagación de sonido y los resultados obtenidos de manera experimental.

El análisis hizo uso de la transformada discreta de Fourier (DFT). Este cálculo matemático identifica las componentes de frecuencia de la señal utilizando la función `fft` (fast fourier transform). Para encontrar el valor de la potencia sonora se utilizó la función `pwelch` que, mediante un algoritmo en Matlab, utiliza el promedio de DFT calculando una estimación de densidad espectral de potencia de Welch (ver Figura 4.12). Por medio de las medidas reales tenemos la potencia

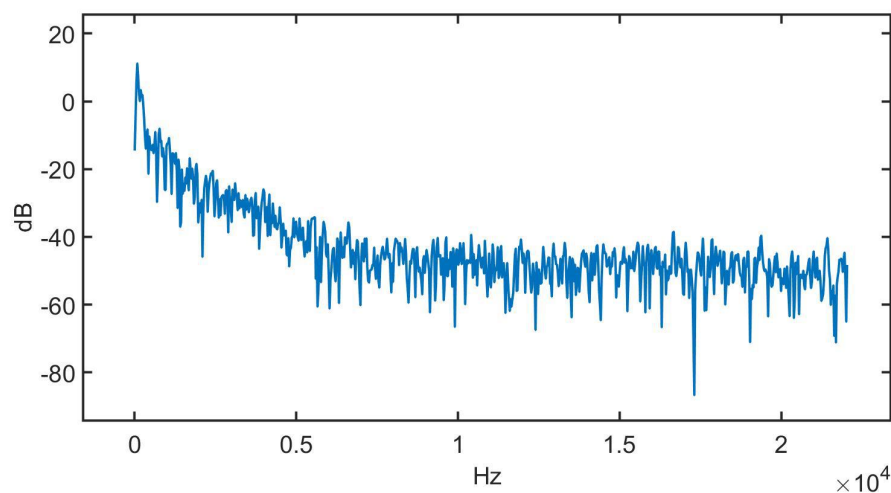


Figura 4.12: Espectro de potencia con pocas fluctuaciones. Se grafica la potencia en función de la frecuencia.

sonora que se obtiene para los tres puntos ubicados a cierta distancia de la fuente. Estos resultados no tienen precedentes y son de mucha utilidad para probar el modelo teórico mediante medidas reales.

A través del método descrito, se escoge: a una distancia de 3m la frecuencia de 212,4Hz, con un nivel de presión de 21,719dB, para el caso de una distancia de 20m la frecuencia es de 53,10dB con un nivel de presión de 45,295dB y para el caso de una distancia de 60m la frecuencia es de 26,55Hz el nivel de presión es 67,00dB. Como se lo esperaba, el nivel de presión del modelo sin obstáculos tiene valores inferiores a aquellos del modelo con obstáculos, es decir, disminuye mientras la frecuencia aumenta pero en menor intensidad en comparación con el modelo de la ecuación 3.66, como se lo presentó en la Figura 4.13. Como

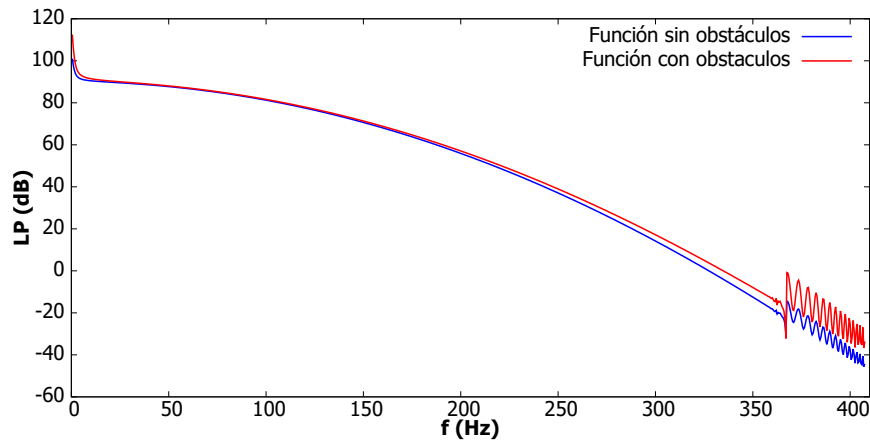


Figura 4.13: Comparación de la intensidad de Lp , en función de la frecuencia, entre los modelos de propagación de sonido sin obstáculos (línea azul) y con obstáculos (línea roja).

se puede observar, el modelo de propagación de sonido sin obstáculos coincide con el segundo modelo, excepto cuando la frecuencia es muy alta. El nivel de presión mantiene valores similares a pesar de que en este modelo ya se considera la dispersión por árboles y por efecto del suelo.

Sin embargo, en el modelo de la ecuación (3.77), a medida que la distancia radial crece la intensidad disminuye, y el nivel de presión sonora es mayor debida a la dispersión por árboles y por suelo, siempre en comparación con el modelo de propagación sin obstáculos. En la misma figura se observa que el nivel de presión desciende de manera exponencial a medida que la frecuencia alcanza valores altos y mientras la frecuencia crece existen fluctuaciones pronunciadas. Con las consideraciones anteriores y con la combinación del efecto de suelo, el modelo alimentado por todos estos datos, se presenta en la Figura 4.14. Una comparación directa de esta figura (la barra de colores muestra la intensidad de la presión sonora) con los resultados presentados en la Figura 4.10 evidencia que la presencia de obstáculos acorta la longitud de onda de propagación, claramente debido a procesos de refracción y difracción sonora. Esta compactación implica una concentración de la intensidad sonora en las cercanías –radiales– de los frentes de onda. Finalmente, se debe notar que podrían existir efectos de desnivel del terreno, que no fueron tomados en cuenta en este estudio.

Por lo tanto, para este caso, se decidió implementar la transformada rápida de Fourier (FFT) a los archivos originales que estaban en el dominio del tiempo. La

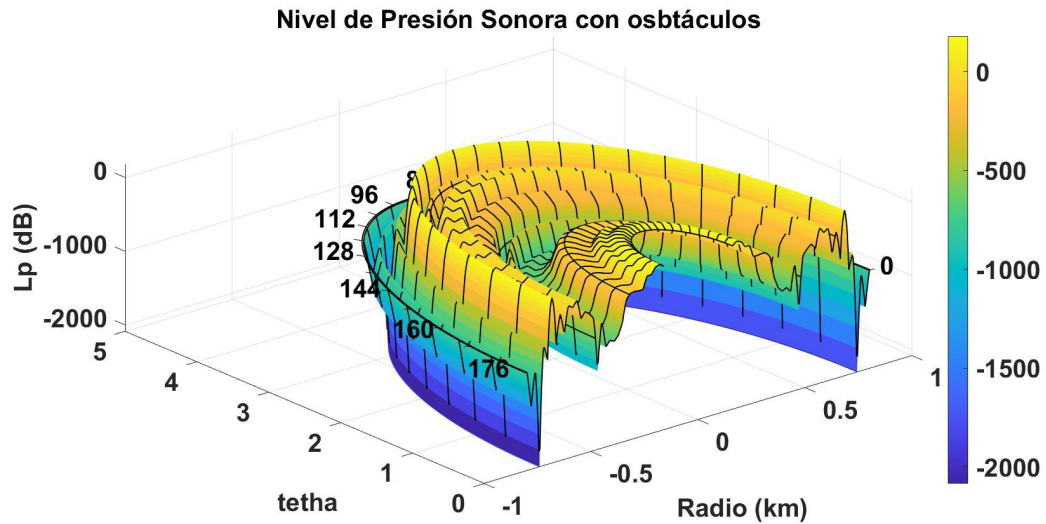


Figura 4.14: Representación polar de la propagación del sonido con obstáculos sobre el plano xy , alrededor de la fuente. La barra de colores muestra la intensidad de L_p .

FFT es un algoritmo optimizado que realiza la transformación de Fourier discreta. La discretización se debe a que la señal medida es una señal discreta dada por la tasa de muestreo de los sensores empleados. En las gráficas se muestran las frecuencias más significativas (de mayor amplitud en el espectro) para cada una de las 3 pruebas respectivamente a las 3 grabaciones.

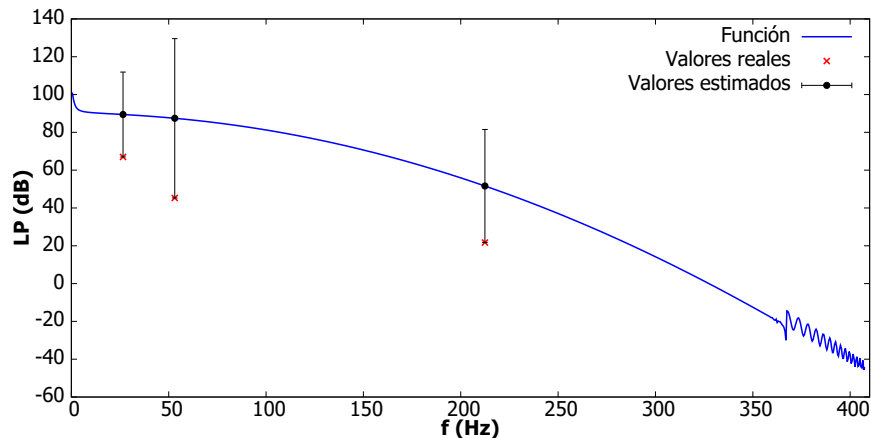


Figura 4.15: Error relativo entre las medidas estimadas y las medidas reales, a 3m (punto izquierdo), 20m (punto central) y 60m (punto derecho) desde la fuente sonora estudiada.

El análisis estadístico incluye un análisis de errores utilizando algoritmos para extraer la información y mejorar su rendimiento de forma adaptada conforme aumenta el número de muestras disponibles para el Machine Learning. El análisis

de errores permite determinar en que grado el modelo considerado afecta a la precisión de resultados experimentales. La conclusión de este análisis se muestra en la Figura 4.15, donde presentamos el error entre los valores registrados in situ de Lp y aquellos calculados con la ecuación (3.77), a posteriori de la interpolación lineal. Esto, respecto al modelo con obstáculos. El error relativo entre el modelo teórico y las medidas reales se puede observar que para la distancia de 3m sobrepasa el valor 1 y para las distancias de 20m y 60m su valor oscila entorno a $\sim 0,93$ a $\sim 0,33$, respectivamente. Es decir, el modelo con obstáculos tiene un buen grado de validez, si se toma en consideración que efectos físicos, como la resonancia, afectan directamente el resultado medido. Claramente, una mayor muestra de datos ajustará de mejor manera este último modelo.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA

5.1 Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo de investigación presenta, por primera vez, el ajuste numérico del ruido registrado in situ en las cercanías de pozos de explotación petrolera, localizados en el borde del Parque Nacional Yasuní y de la Reserva Biológica de Limoncocha. El complejo modelo semiempírico incluye la presencia del suelo y la foresta circundante a la fuente sonora.

Los modelos de propagación sonora son de carácter aditivo, por lo que se realizó una minuciosa revisión bibliográfica para emplear la combinación adecuada de términos analíticos y empíricos para ajustarse razonablemente a las condiciones reales, e.g., de flora, atmosféricas y geográficas, medidas en las cercanías de varias estaciones de extracción e industria petrolera que se aproximan a la PNY y la RBL. Aún así, debemos notar que este es un primer paso a un modelo de propagación del ruido emitido por este tipo de fuentes cuasi locales. Una mayor red de instrumentos reduciría sustancialmente el error relativo entre el modelo (extendible a ambientes similares) y los valores reales, como se aprecia en la Figura 4.15. Asimismo, la consideración de las condiciones topográficas del terreno circundante podrían influir en nuestros resultados.

Como era de esperarse, la presencia de obstáculos (árboles más otros tipo de vegetación considerados) cambia el comportamiento de la intensidad de Lp , en su propagación radial desde las fuentes sonoras y hacia el interior de la foresta. Sin embargo, en la Figura 4.14 podemos notar que la compactación de los frentes de onda, respecto al modelo sin obstáculos (Figura 4.10), no es tan grande como lo esperaríamos debido a la espesa vegetación, e.g., panel derecho de la Figura 4.2. Podemos estimar que este comportamiento se debe a la deforestación que circunda los primeros metros de las estaciones de extracción. Claramente, mediciones desde el interno de la foresta, con equipos que tengan esta capacidad, nos permitiría entender el impacto del ruido constante (de baja frecuencia) a la flora y fauna circundante. Aún cuando los modelos de propagación del ruido sin obstáculos reflejan resultados similares, en comparación al modelo con obstáculos, notamos

en la Figura 4.13 que a frecuencias altas, la influencia de los obstáculos es más notoria que a frecuencias bajas y el nivel de presión sonora sobrepasa el nivel tolerable de ruido, aproximadamente por los 100 dB. Esto nos permite intuir que el sonido de origen industrial, a causa de los pozos petroleros, efectivamente podría contaminar acústicamente y de manera permanente el bosque circundante, lo que podría provocar un eventual desequilibrio entre la vida silvestre e incluso afectar a la salud humana por la constante exposición a niveles elevados de ruido. Consecuentemente, trabajos de este tipo son necesarios para para plantear nuevas estrategias en la mitigación del ruido del sector, aportando a la conservación de las especies que habitan en la Amazonía ecuatoriana.

5.2 Bibliografía

- I. 9613-1. Acoustics—attenuation of sound during propagation outdoors—part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere, 1993.
- H. K. Abdel-Aal, M. A. Aggour, and M. A. Fahim. *Petroleum and gas field processing*. CRC press, 2003.
- E. Atmaca, I. Peker, and A. Altin. Industrial noise and its effects on humans. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(6), 2005.
- K. Attenborough. Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. *Journal of Sound and Vibration*, 99(4):521–544, 1985.
- K. Attenborough. Sound propagation in the atmosphere. In *Springer handbook of acoustics*, pages 117–155. Springer, 2014.
- M. Berengier, M. Stinson, G. Daigle, and J. Hamet. Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(1):155–162, 1997.
- M. Bérenghier, B. Gauvreau, P. Blanc-Benon, and D. Juvé. Outdoor sound propagation: A short review on analytical and numerical approaches. *Acta Acustica united with Acustica*, 89(6):980–991, 2003.
- H. Brumm and H. Slabbekoorn. Acoustic communication in noise. *Advances in the Study of Behavior*, 35:151–209, 2005.
- N. Butt, H. Beyer, J. Bennett, D. Biggs, R. Maggini, M. Mills, A. Renwick, L. Seabrook, and H. Possingham. Biodiversity risks from fossil fuel extraction. *Science*, 342(6157):425–426, 2013.
- K. V. C. Carrillo, J. E. Oviedo, D. Carrillo, and M. M. Fressneda. Arsénico en aguas, suelos y sedimentos de la reserva biológica de limoncocha-ecuador con fines de conservación. *INNOVA Research Journal*, 4(3):158–169, 2019.
- P. C. Caycedo-Rosales, J. F. Ruiz-Muñoz, and M. Orozco-Alzate. Reconocimiento automatizado de señales bioacústicas: Una revisión de métodos y aplicaciones. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18):171–195, 2013.

- M. J. Crocker. *Handbook of noise and vibration control*. John Wiley & Sons, 2007.
- B. Dai, N. Sheng, W. Zhao, F. Mu, and Y. He. Evaluation of urban inland waterway traffic noise using a modified nord 2000 prediction model. *Environmental Research*, 185:109437, 2020.
- J. Defrance, E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plovsing, G. Watts, H. Jonasson, X. Zhang, E. Premat, I. Schmich, et al. Outdoor sound propagation reference model developed in the european harmonoise project. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(2):213–227, 2007.
- M. Delany and E. Bazley. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied acoustics*, 3(2):105–116, 1970.
- A. M. Dorado-Correa, M. Rodríguez-Rocha, and H. Brumm. Anthropogenic noise, but not artificial light levels predicts song behaviour in an equatorial bird. *Royal Society open science*, 3(7):160231, 2016.
- T. F. Embleton, J. E. Piercy, and N. Olson. Outdoor sound propagation over ground of finite impedance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 59(2):267–277, 1976.
- A. I. T. Fernández. *Propagación del sonido en bosques. Análisis comparativo de las medidas in situ, en laboratorio y de los valores predichos por un modelo*. PhD thesis, Universidad de Valladolid, 2002.
- A. I. T. Fernandez. *Sound propagation in woods. Comparative analysis between in situ measurements, laboratory measurements and the values predicted by a theoretical model*. PhD thesis, Universidad de Valladolid (Spain), 2002.
- C. D. Francis, J. Paritsis, C. P. Ortega, and A. Cruz. Landscape patterns of avian habitat use and nest success are affected by chronic gas well compressor noise. *Landscape ecology*, 26(9):1269–1280, 2011.
- P. R. Furumo and T. Mitchell Aide. Using soundscapes to assess biodiversity in neotropical oil palm landscapes. *Landscape Ecology*, 34(4):911–923, 2019.

- A. García. *La contaminación acústica*, volume 6. Universitat de València, 1988.
- F. García and P. Garcés. La industrialización del petróleo en américa latina y el caribe. *Quito Ecuador*, 2013.
- E. Goodale and G. Beauchamp. The relationship between leadership and gregariousness in mixed-species bird flocks. *Journal of Avian Biology*, 41(1): 99–103, 2010.
- R. R. Halde. Application of machine learning algorithms for betterment in education system. In *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, pages 1110–1114. IEEE, 2016.
- C. H. Hansen. Fundamentals of acoustics. *Occupational Exposure to Noise: Evaluation, Prevention and Control. World Health Organization*, pages 23–52, 2001.
- D. P. y. K. S. y. A. A. P. y. B. S. y. B. S. y. B. S. H. y. H. J. y. J. M. I. y. K. V. y. o. Harfoot, Michael BJ y Tittensor. Riesgos presentes y futuros para la biodiversidad derivados de la explotación de combustibles fósiles. *Conservation Letters*.
- C. R. Hart, N. J. Reznicek, D. K. Wilson, C. L. Pettit, and E. T. Nykaza. Comparisons between physics-based, engineering, and statistical learning models for outdoor sound propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5):2640–2655, 2016.
- K. G. Horton, P. M. Stepanian, C. E. Wainwright, and A. K. Tegeler. Influence of atmospheric properties on detection of wood-warbler nocturnal flight calls. *International Journal of Biometeorology*, 59(10):1385–1394, 2015.
- A.-K. Hurtig and M. San Sebastián. Geographical differences in cancer incidence in the amazon basin of ecuador in relation to residence near oil fields. *International journal of epidemiology*, 31(5):1021–1027, 2002.
- A. M. J. Jaramillo. *Acústica: la ciencia del sonido*. ITM, 2007.

- E. Johansson. The sound amplifying forest, with emphasis on sounds from wind turbines. 2010.
- A. C. Keyel, S. E. Reed, M. F. McKenna, and G. Wittemyer. Modeling anthropogenic noise propagation using the sound mapping tools arcgis toolbox. *Environmental modelling & software*, 97:56–60, 2017.
- N. J. Kleist, R. P. Guralnick, A. Cruz, C. A. Lowry, and C. D. Francis. Chronic anthropogenic noise disrupts glucocorticoid signaling and has multiple effects on fitness in an avian community. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(4):E648–E657, 2018.
- L. Landau and E. Lifshitz. Fluid mechanics. translated from the russian by jb sykes and wh reid. *Course of Theoretical Physics*, 6, 1987.
- C. Larrea and L. Warnars. Ecuador’s yasuni-itt initiative: Avoiding emissions by keeping petroleum underground. *Energy for Sustainable Development*, 13(3): 219–223, 2009.
- C. A. Larrea Maldonado. Conservación de la biodiversidad y explotación petrolera en el parque nacional yasuní. 2017.
- M. J. Macía. Spatial distribution and floristic composition of trees and lianas in different forest types of an amazonian rainforest. *Plant Ecology*, 212(7): 1159–1177, 2011.
- B. Mahesh. Machine learning algorithms-a review. *International Journal of Science and Research (IJSR).[Internet]*, 9:381–386, 2020.
- L. Maurice, F. López, S. Becerra, H. Jamhoury, K. Le Menach, M.-H. Devier, H. Budzinski, J. Prunier, G. Juteau-Martineau, V. Ochoa-Herrera, et al. Drinking water quality in areas impacted by oil activities in ecuador: Associated health risks and social perception of human exposure. *Science of the Total Environment*, 690:1203–1217, 2019.
- C. F. Mena, F. Laso, P. Martinez, and C. Sampedro. Modeling road building, deforestation and carbon emissions due deforestation in the ecuadorian amazon:

- The potential impact of oil frontier growth. *Journal of Land Use Science*, 12 (6):477–492, 2017.
- J. M. Merino de la Fuente, L. Muñoz-Repiso, et al. La percepción acústica: Física de la audición. *Revista de ciencias*, (2):19–26, 2013.
- V. E. Ostashev, D. K. Wilson, M. B. Muhlestein, and K. Attenborough. Correspondence between sound propagation in discrete and continuous random media with application to forest acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(2):1194–1205, 2018.
- B. Plovsing and J. Kragh. Comprehensive outdoor sound propagation model. part 1: Propagation in an atmosphere without significant refraction. *DELTA Acoustics & Vibration Report AV 1849*, page 2001, 2000.
- M. I. Posada-Posada, M. d. P. Arroyave-Maya, C. E. Fernández-Ossa, et al. Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano. *Revista EIA*, 2013.
- M. A. Price, K. Attenborough, and N. W. Heap. Sound attenuation through trees: Measurements and models. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5):1836–1844, 1988.
- Pérez, C. Hernandez, H. Romero-Saltos, and R. Valencia. *Árboles emblemáticos de Yasuní, Ecuador*. 11 2014. ISBN 978-9942-20-260-4.
- M. L. Richardson, B. A. Wilson, D. A. Aiuto, J. E. Crosby, A. Alonso, F. Dallmeier, and G. K. Golinski. A review of the impact of pipelines and power lines on biodiversity and strategies for mitigation. *Biodiversity and Conservation*, 26(8):1801–1815, 2017.
- E. J. Rickley, G. G. Fleming, and C. J. Roof. Simplified procedure for computing the absorption of sound by the atmosphere. *Noise control engineering journal*, 55(6):482–494, 2007.
- D. P. Rivera Parra. Caracterización de la fauna de quirópteros del parque nacional yasuní en base a llamadas de ecolocación. B.S. thesis, Quito/PUCE/2011, 2011.

- E. Salomons, D. Van Maercke, J. Defrance, and F. de Roo. The harmonoise sound propagation model. *Acta acustica united with acustica*, 97(1):62–74, 2011.
- E. M. Salomons. *Computational atmospheric acoustics*. Springer Science & Business Media, 2001.
- N. Shu, L. F. Cohn, R. A. Harris, T. K. Kim, and W. Li. Comparative evaluation of the ground reflection algorithm in fhwa traffic noise model (tnm 2.5). *Applied Acoustics*, 68(11-12):1459–1467, 2007.
- H. Sridhar, G. Beauchamp, and K. Shanker. Why do birds participate in mixed-species foraging flocks? a large-scale synthesis. *Animal Behaviour*, 78(2):337–347, 2009.
- A. Tarrero, M. Martín, J. González, M. Machimbarrena, and F. Jacobsen. Sound propagation in forests: A comparison of experimental results and values predicted by the nord 2000 model. *Applied Acoustics*, 69(7):662–671, 2008.
- R. Valencia, R. B. Foster, G. Villa, R. Condit, J.-C. Svenning, C. Hernández, K. Romoleroux, E. Losos, E. Magård, and H. Balslev. Tree species distributions and local habitat variation in the amazon: large forest plot in eastern ecuador. *Journal of ecology*, 92(2):214–229, 2004.
- Y. van Der Hoek. The potential of protected areas to halt deforestation in ecuador. *Environmental Conservation*, 44(2):124–130, 2017.
- D. E. Villalba Garcia. La propagacion del sonido en el aire: reflexiones sobre los aspectos termodinamicos para la ensenanza de la fisica. 2021.
- D. Wilson, E. Nykaza, and M. White. Sound outdoors and noise pollution. *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two: Systems, Pollution, Modeling, and Measurements*, page 203, 2012.