

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**“DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EJECUCIÓN  
DE MODELOS MATEMÁTICOS DE ATENUACIÓN DE RUIDO, EN  
MEDIO ATMOSFÉRICO, PARA FUENTES INDUSTRIALES FIJAS  
SIMPLES O COMPLEJAS”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**POR:**

**GABRIEL FERNANDO GAVILANES ÁLVAREZ**  
***gabo\_g0125@hotmail.com***

**MARCELO ISRAEL LÓPEZ GRANJA**  
***milg\_86@hotmail.com***

**DIRECTOR: MSc. ING. BYRON ARREGUI GALLEGOS**  
***byronarregui@hotmail.com***

**Quito, agosto 2012**

## **DECLARACIÓN**

GABRIEL FERNANDO GAVILANES ÁLVAREZ y MARCELO ISRAEL LÓPEZ GRANJA, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**GABRIEL FERNANDO  
GAVILANES ÁLVAREZ**

---

**MARCELO ISRAEL  
LÓPEZ GRANJA**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por GABRIEL FERNANDO GAVILANES ÁLVAREZ y MARCELO ISRAEL LÓPEZ GRANJA, bajo mi supervisión.

---

**MSC. ING. BYRON  
ARREGUI GALLEGOS  
DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Estos años en la universidad fueron fugaces y sin duda los mejores de mi vida estudiantil; y todo gracias a mi padre, mi madre y sobre todo a mi abuela que con sus consejos y apoyo incondicional me brindaron la oportunidad de ser una mejor persona. Además debo agradecer a Byron Arregui, un gran profesor y un gran amigo, quien es personalmente y profesionalmente un ejemplo a seguir para mí. Y por último pero no menos importante quiero agradecer a mis compañeros de curso; ahora grandes amigos para siempre, de quienes aprendí valores como el compañerismo, la lealtad, la solidaridad y la importancia del trabajo en equipo.

Sin todos ustedes no podría recordar esta etapa de mi vida con mucha nostalgia y alegría.

Gabriel

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por el regalo de la vida y por darme lo necesario para concluir con éxito esta etapa de mi vida.

A mi esposa GABY, por darme el privilegio, la alegría y el honor de ser uno con ella, por cuidarme, respetarme, apoyarme y principalmente por su amor incondicional. Te amo.

A mi hija TIANNY, por brindarme el regalo y privilegio de ser su padre, compartiendo conmigo momentos inolvidables, pido a Dios me dé la suficiente sabiduría para cumplir con esta responsabilidad maravillosa.

A mis padres por la confianza, dedicación, sacrificio y cariño que me han dado durante toda mi vida. Gracias por todo MARY y LYNDON.

A mi hermano ADRIAN, por brindarme su amistad sincera y por haber compartido conmigo muchos sucesos a lo largo de mi vida.

A todos mis profesores universitarios y en especial a BYRON ARREGUI por los conocimientos impartidos, pero sobre todo por su amistad brindada.

A CARDNO ENTRIX y OCP S.A. por facilitar cierta información bibliográfica y cartográfica necesaria para el desarrollo del presente tema de titulación.

Finalmente a todas las personas que conocí en mi vida universitaria, compañeros de la carrera, amigos de la selección de fútbol y en especial a mi curso (Yess, Cris, Robin, Juancho, Pao, Vanne, Luigui, Carlos y Gabo)

Marcelo.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mi primera mentora; mi querida abuela, Graciela. Quien ha estado junto a mí en todo momento; guiándome y apoyándome aun más allá de sus posibilidades. Y con su inmensa paciencia y cariño incondicional, inculco en mí valores como la honestidad, lealtad, respeto, responsabilidad y solidaridad. Su ejemplo de vida es para mí el referente para cada día ser una mejor persona no solo en lo intelectual y profesional, sino también en lo afectivo y sentimental. Gracias por darme la oportunidad de desarrollarme como un ser humano integro.

Gabriel

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se lo dedico a mi esposa e hija, Gaby y Tianny, a quienes amo con todo mi corazón y quienes representan mi presente y futuro. Una especial dedicatoria a mi abuelita Evangelina (Mamita Valinita), quien en vida siempre me brindo todo su apoyo enseñándome grandes lecciones de vida.

Marcelo.

## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
1.3 METODOLOGÍA.....	5
1.3.1 Revisión Bibliográfica .....	5
1.3.2 Identificación de la metodología base utilizada en estudios existentes .....	7
1.3.3 Propuestas para disminuir las debilidades y limitaciones de la metodología base .....	8
1.3.4 Metodología Propuesta para la ejecución de Modelos Matemáticos de Atenuación de Ruido en Medio Atmosférico. ....	9
1.3.5 Levantamiento de la información de campo para la aplicación de la metodología propuesta .....	17
1.3.6 Aplicación .....	19
1.3.7 Comparaciones con los datos medidos.....	19
1.3.8 Flujoograma de la metodología Propuesta. ....	20
1.4 ALCANCE .....	20
<b>CAPÍTULO 2: INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
2.1 PRINCIPIOS DE ACÚSTICA AMBIENTAL.....	22
2.1.1 Origen del Sonido.....	22
2.1.2 Definiciones .....	23
2.1.3 Propiedades que definen al ruido.....	24
2.1.4 Análisis espectral.....	49

2.1.5	Influencia de las variables meteorológicas en la propagación del sonido .....	57
2.1.6	Campo libre y campo difuso .....	61
2.1.7	Teoría de Barreras.....	65
2.2	NORMATIVA RESPECTO A RUIDO.....	66
2.3	NORMAS ISO 9613.....	70
2.3.1	NORMA ISO 9613-1 DE 1993: Atenuación del ruido en su propagación en el aire ..	70
2.3.2	NORMA ISO 9613-2 DE 1996: Atenuación del sonido durante su propagación al aire libre. Parte 2: método general de cálculo .....	71
2.4	MODELO MATEMÁTICO DE ATENUACIÓN EN MEDIO ATMOSFÉRICO .....	73
2.4.1	Modelo matemático de Atenuación del ruido en su propagación en el aire - norma ISO 9613-1:1993 .....	73
2.4.2	NORMA ISO 9613-2 DE 1996: Atenuación del sonido durante su propagación al aire libre. Parte 2: método general de cálculo .....	76
2.5	MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	92
2.5.1	Diseño de la toma de la muestra para la interpolación a partir de puntos.....	93
2.5.2	Métodos de Interpolación a partir de puntos.....	94
<b>CAPÍTULO 3:INVESTIGACIÓN DE CAMPO .....</b>		<b>97</b>
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA INDUSTRIAL.....	97
3.1.1	Introducción .....	97
3.1.2	Ubicación geográfica .....	98
3.1.3	Clima y meteorología.....	99
3.1.4	Suelos .....	108
3.1.5	Topografía .....	109
3.1.6	Identificación de las fuentes de ruido y receptores sensibles.....	111
3.2	MEDICIÓN DE LA PRESIÓN SONORA DE LAS FUENTES GENERADORAS DE RUIDO .....	116

3.3	INVENTARIO DE LAS MEDIDAS DE ATENUACIÓN DE RUIDO EXISTENTES	117
3.3.1	Barreras .....	117
3.3.2	Zonas industriales y Follaje .....	122
<b>CAPÍTULO 4: APLICACIÓN.....</b>		<b>125</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE RUIDO	125
4.2	IDENTIFICACIÓN DE COEFICIENTES DE ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ACÚSTICA.....	127
4.3	MODELO DE ATENUACIÓN EN MEDIO ATMOSFERICO. ....	130
4.4	MODELO ISO 9613.....	131
4.4.1	Características del programa de modelación acústica SPM9613.....	131
4.4.2	Modelación en el Programa SPM9613.....	132
4.5	DETERMINACIÓN DE CURVAS DE ATENUACIÓN.....	134
4.6	INTERPOLACION DE LOS PUNTOS DE RUIDO (RESULTADOS).....	136
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIONES .....</b>		<b>140</b>
5.1	REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MONITOREO DE RUIDO EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	140
5.1.1	Validez de los Resultados del Monitoreo de Ruido.....	143
5.2	MAPAS TEMÁTICOS .....	144
5.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ARROJADOS POR EL MODELO CON EL MONITOREO DE RUIDO. ....	150
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>157</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	157
6.2	RECOMENDACIONES .....	159
<b>CAPÍTULO 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>161</b>

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 2-1: Frecuencia de algunas notas y longitudes de onda correspondientes, en el aire a 20°C ( $c = 344\text{m/s}$ ) .....	27
Tabla 2-2: Velocidad del sonido para ondas planas en varios medios.....	29
Tabla 2-3: Relación entre la Potencia y el nivel de presión sonora .....	40
Tabla 2-4: Relación de la presión acústica y el nivel de presión .....	42
Tabla 2-5: Niveles de presión sonora por banda de octava para un sonido.....	48
Tabla 2-6: “Frecuencias centrales de Bandas de Octava” .....	53
Tabla 2-7: Escalas de ponderación.....	56
Tabla 2-8: Normativa ecuatoriana referente a ruido .....	66
Tabla 2-9 “Coeficiente de atenuación atmosférica, $\alpha$ , para cada banda de octava” .....	80
Tabla 2-10: “Atenuación sonora debido a la propagación a una distancia “d” a través de un follaje denso” .....	91
Tabla 2-11: “Atenuación sonora debida a la propagación a través de plantas industriales” .....	92
Tabla 3-1: Ubicación geográfica de la estación Sardinas.....	99
Tabla 3-2: Rango de velocidades en la estación sardinas .....	103
Tabla 3-3: Caracterización climática de la estación Sardinas .....	107
Tabla 3-4: Uso del suelo alrededor de la estación sardinas.....	109
Tabla 3-5: Niveles de altura para las distintas áreas de la estación Sardinas....	110

Tabla 3-6: Identificación de las fuentes de ruido .....	111
Tabla 3-7: Registro fotográfico de las fuentes de ruido. ....	113
Tabla 3-8: Identificación de los receptores sensibles. ....	114
Tabla 3-9: Registro fotográfico de los receptores sensibles. ....	115
Tabla 3-10: Resultados de ruido industrial diurno Estación Sardinias. ....	116
Tabla 3-11: Medición de los niveles de presión sonora de las fuentes de ruido. ....	117
Tabla 3-12: Medidas de atenuación de ruido en el área de generadores. ....	118
Tabla 3-13: Medidas de atenuación de ruido en el área de bombas y cuarto de control. ....	118
Tabla 3-14: Infraestructura considerada como barreras.....	119
Tabla 3-15: Coordenadas y dimensiones de la infraestructura considerada como barreras acústicas .....	120
Tabla 3-16: Dimensionamiento de la infraestructura. ....	122
Tabla 3-17: Dimensiones de las zonas industriales y del follaje.....	123
Tabla 3-18: Zonas industriales y follaje. ....	124
Tabla 4-1: Valores del nivel de potencia sonora de las fuentes de ruido en el área industrial.....	125
Tabla 4-2: Características acústicas de interés de las fuentes de ruido.....	126
Tabla 4-3: Coeficiente de absorción de varios materiales .....	128
Tabla 4-4: Coeficientes de absorción para materiales de atenuación disponibles en el mercado .....	130
Tabla 4-5: Nivel de Presión Sonora a varias distancias de las Fuentes.....	134

Tabla 4-6: Datos estadísticos de la interpolación con Kriging para una función lineal y logarítmica. ....	138
TABLA 5-1: Resultados de ruido industrial en la Estación Sardinias. ....	140
Tabla 5-2: Resultados del Modelo y de la campaña del Monitoreo de Ruido.....	150
Tabla 6-1: Comparación de los resultados de ruido con la normativa ambiental	158

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1: Posición de los puntos de medida sobre una semiesfera. ....	13
Figura 2-1: Propagación del sonido en un medio elástico. ....	22
Figura 2-2: Representación de una onda sonora ideal. ....	25
Figura 2-3: Ondas de una misma frecuencia y diferente amplitud. ....	26
Figura 2-4: Representación de la longitud de onda en un tono puro. ....	27
Figura 2-5: Longitudes de ondas relacionadas con sus frecuencias. ....	27
Figura 2-6: Sonidos periódicos: (a) grave; (b) agudo. ....	32
Figura 2-7: Tono puro (onda senoidal). ....	33
Figura 2-8: Armónicos de una onda cuadrada. ....	34
Figura 2-9: Onda cuadrada. ....	34
Figura 2-10: Variación de presión acústica en el tiempo. ....	36
Figura 2-11: Propagación de la onda acústica. ....	40
Figura 2-12: Nivel de presión Equivalente. ....	44
Figura 2-13: Variación de la presión en función del tiempo para un tono puro. ...	50
Figura 2-14: Variación de la presión en función de la frecuencia para un tono puro. .....	50
Figura 2-15: Variación de la presión en función del tiempo para la suma de dos tonos simples. ....	51
Figura 2-16: Variación de la presión en función de la frecuencia para la suma de dos tonos simples. ....	51

Figura 2-17: Espectro continuo de un ruido.....	52
Figura 2-18: Curvas de Fletcher y Munson. ....	54
Figura 2-19: Curvas de ponderación A, B y C.....	55
Figura 2-20: Esquema de la trayectoria de propagación del sonido.....	59
Figura 2-21: Absorción del sonido en el aire versus humedad ambiental. ....	60
Figura 2-22: Representación del fenómeno de difracción. ....	62
Figura 2-23: Reflexión de ondas sonoras.....	63
Figura 2-24: Distribución de la energía de una onda incidente en un obstáculo ..	64
Figura 2-25: Trayectorias de una onda acústica ante un obstáculo vertical.....	65
Figura 2-26: Regiones para la determinación de efecto suelo. ....	81
Figura 2-27: Método de Evaluación de la altura media (hm).....	83
Figura 2-28: Vista de dos obstáculos presentes entre la fuente (S) y el receptor (R). ....	83
Figura 2-29: Representación de una barrera gruesa.....	86
Figura 2-30: Representación de una difracción doble .....	86
Figura 2-31: Generación de una reflexión especular desde un obstáculo.....	88
Figura 2-32: Atenuación a través de follaje denso. ....	90
Figura 2-33: Atenuación sonora debida a la propagación a través de sitios industriales .....	92
Figura 3-1: “Ruta del Oleoducto de Crudos Pesados” .....	98
Figura 3-2: “Perfil del Oleoducto de Crudos Pesados” .....	98
Figura 3-3: Histograma de Precipitación en la Estación Sardinas.....	100

Figura 3-4: Histograma de la temperatura media mensual .....	101
Figura 3-5: Histograma de temperaturas máximas y mínimas .....	101
Figura 3-6: Histograma de humedad relativa en la estación Sardinias .....	102
Figura 3-7 Histograma de velocidad del viento en la estación Sardinias. ....	102
Figura 3-8: Rosa de los vientos en la Estación Sardinias .....	104
Figura 3-9: Balance hídrico en la estación Sardinias .....	105
Figura 3-10: Diagrama Ombrotérmico de la estación sardinias – Periodo febrero 2005 - mayo 2010 .....	106
Figura 3-11: Áreas con distintos niveles en la estación.....	110
Figura 3-12: Ubicación de las fuentes de ruido. ....	112
Figura 3-13: Ubicación de los receptores sensibles. ....	115
Figura 3-14: Ubicación de infraestructura y barreras .....	119
Figura 3-15: Consideración de los Tanques de Almacenamiento como barreras. .....	119
Figura 3-16: Barreras consideradas en el Área de generación Eléctrica. ....	120
Figura 3-17: Barreras consideradas en los cuartos.....	120
Figura 3-18: Identificación de zonas industriales y zona de follaje.....	123
Figura 4-1: Espectro de frecuencias de la onda sonora de las bombas principales .....	126
Figura 4-2: Espectro de frecuencias de la onda sonora de los generadores G 0301 y G 0302.....	127
Figura 4-3: Ingreso de las condiciones iniciales del modelo de atenuación de ruido. ....	133

Figura 4-4: Resultados del modelo obtenidos en el programa SPM9613. ....	133
Figura 4-5: Curva de Atenuación de Ruido para las Bombas .....	135
Figura 4-6: Curva de Atenuación de Ruido para los Generadores G-0301 y G-0302 .....	135
Figura 4-7: Interpolación de los resultados del Modelo con el método IDW.....	136
Figura 4-8: Interpolación de los resultados del Modelo con el método Kriging...	136
Figura 4-9: Representación de la desviación estándar con el método kriging para el variograma con función lineal .....	137
Figura 4-10: Representación de la desviación estándar con el método kriging para el variograma con función logarítmica.....	137
Figura 4-11: Representación de la desviación estándar con el método kriging para el variograma con función exponencial. ....	138
Figura 5-1. Mapa de Ubicación Geográfica.....	145
Figura 5-2. Mapa de Uso de Suelo.....	146
Figura 5-3. Mapa de Ubicación de los puntos de monitoreo de ruido en la estación Sardinias .....	147
Figura 5-4. Mapa de Isófonas de la Modelación de Ruido en la Estación Sardinias. ....	148
Figura 5-5. Mapa de Isófonas del Monitoreo de ruido de la Estación Sardinias..	149

## SIMBOLOGÍA

<b>SÍMBOLO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>
$h_s$	Altura de la fuente puntual de ruido por encima del suelo	m
$h_r$	Altura del receptor sobre el suelo	m
$h_m$	Altura media de la trayectoria de propagación del sonido por encima del suelo	m
$A$	Amplitud	Pa
$\beta$	Angulo de incidencia	rad
$A$	Atenuación de banda de octava	dB
$D_z$	Atenuación de las barreras	-
$\delta L_t$	Atenuación debida a la absorción atmosférica	dB
$\alpha$	Coefficiente de atenuación atmosférica	dB/km
$\alpha$	Coefficiente de atenuación de sonido de tonos puros debido a la absorción atmosférica	dB/m
$\rho$	Coefficiente de reflexión del sonido	-
$h'$	Concentración molar de vapor de agua	%
$C_{met}$	Corrección meteorológica	dB
$S$	Distancia a través del cual se propaga el sonido	m

<b>SÍMBOLO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>
$d_{s,r}$	Distancia del borde de difracción (segundo) al receptor	m
$d_{ss}$	Distancia desde la fuente (primero) al borde de difracción	m
$d$	Distancia desde la fuente puntual de ruido hasta el receptor	m
$d_p$	Distancia desde la fuente puntual de ruido hasta el receptor proyectada sobre el plano del suelo	m
$e$	Distancia entre el borde de la primera y segunda difracción	m
$d_{o,r}$	Distancia entre el punto de reflexión sobre el obstáculo reflectante y receptor	m
$d_{s,o}$	Distancia entre la fuente y el punto de reflexión sobre el obstáculo reflectante	m
$G$	Factor de suelo	-
$f_m$	Frecuencia de la banda media	Hz
$f$	Frecuencia del sonido	Hz
$Z_a$	Impedancia acústica	Pa s/m
$D_l$	Índice de directividad de la fuente puntual sonora	-
$I$	Intensidad del Sonido	W/m <sup>2</sup>
$h$	La altura media de la fuente y receptor	m
$H_{max}$	La mayor dimensión de las fuentes	m
$I_{min}$	La mínima dimensión (longitud o altura) del plano reflectante	m

<b>SÍMBOLO</b>	<b>DEFINICIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>
$\lambda$	Longitud de Onda	m
$NI$	Nivel de Intensidad Sonora	dB
$NW$	Nivel de Potencia Sonora	dB
$Leq$	Nivel de Presión continua equivalente	dB
$NPS$	Nivel de presión sonora	dB
$T$	Periodo	s
$W$	Potencia Sonora	W
$P_a$	Presión atmosférica ambiental	KPa
$P_r$	Presión atmosférica ambiental de referencia	KPa
$P_{ref}$	Presión de referencia	Pa
$P_{ef}$	Presión efectiva o Valor eficaz de la presión sonora	Pa
$P_t$	Presión del sonido	Pa
$P_i$	Presión del sonido inicial	Pa
$T$	Temperatura ambiental atmosférica	°K
$T_0$	Temperatura del aire de referencia	°K
$t$	Tiempo	s
$c$	Velocidad de propagación del sonido	m/s

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación consiste en la elaboración de una metodología para la ejecución de modelos matemáticos de atenuación de ruido, en medio atmosférico, para fuentes industriales fijas simples o complejas, en base a las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996, tomando como caso de estudio la Estación Sardinias perteneciente a OCP Ecuador S.A., ubicada en el cantón Quijos, Provincia de Napo.

Para estructurar la metodología se recopiló la información bibliográfica sobre la naturaleza física del sonido, su dispersión en campo y la técnica de cuantificación de los niveles de potencia sonora; además, se utilizó las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996 que proporciona los algoritmos de atenuación de ruido en medio atmosférico para identificar las variables necesarias para la modelación.

Se realizó visitas a la zona industrial para identificar, las caracterizar de las fuentes de ruido, los receptores sensibles y los elementos que influyen en la propagación del sonido. Toda esta información se recopiló en una base de datos para posteriormente analizar y modelar con la ayuda del modelo de atenuación en medio atmosférico aplicado a través del software SPM9613.

Los resultados obtenidos a través del modelo fueron comparados con los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo de ruido realizado por la consultora CARDNO ENTRIX el 4 y 5 de diciembre de 2010. Y posteriormente interpolados para presentarlos en un mapa debidamente georeferenciado.

El resultado de la validación fue favorable; por tanto, la metodología propuesta es aceptable y puede ser usada al aplicar el modelo en diferentes escenarios para predecir la cantidad de energía acústica que llegara a los receptores.

## PRESENTACIÓN

El proyecto de titulación consiste en el desarrollo de una metodología validada para la ejecución de modelos matemáticos de atenuación de ruido, en medio atmosférico, para fuentes industriales fijas simples o complejas, en base a las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996.

El primer capítulo se refiere a las nociones básicas del proyecto, la problemática del ruido en el ambiente, los objetivos, la metodología propuesta para aplicar el modelo de atenuación de ruido y el alcance.

El segundo capítulo contiene la investigación bibliográfica en la cual se detallan algunas definiciones básicas, principios de acústica, el marco legal ambiental que regula la generación de ruido en el país, las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996, que describen el modelo matemático de atenuación en medio atmosférico y por último se describe algunos métodos de interpolación que se ajusta a la propagación del sonido.

En el tercer capítulo se presenta la caracterización de la estación Sardinias junto a los datos recolectados en la investigación de campo, como la identificación de emisores de ruido y receptores sensibles, medición de la presión sonora de las fuentes y el inventariado de las medidas de atenuación.

En el cuarto capítulo se determinan; las características acústicas de las fuentes, se ejecuta el modelo matemático de atenuación de ruido en medio atmosférico, se obtiene las curvas de atenuación para cada fuente y se interpolan los resultados a fin de representarlos en un mapas de ruido.

En el quinto capítulo se presenta el monitoreo de ruido realizado por la consultora Cardno Entrix, que sirve para comparar los resultados de la metodología.

En el último se da a conocer las conclusiones y recomendaciones del proyecto

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El ruido es un factor físico de riesgo importante, se lo puede definir como un sonido no deseado. Sin embargo este concepto es muy subjetivo, debido a que sonidos agradables para algunos individuos puede ser para otros, causa de enfermedad física o psíquica. Por otro lado, algunos sonidos que en determinados periodos pueden ser aceptables, se convierten en molestos a ciertas horas.

El ruido es uno de los elementos que definen nuestro entorno cotidiano; es la molestia más común que tienen que soportar las personas. Por tanto, se puede afirmar que el ruido es un contaminante ambiental que se presenta de manera persistente en el ambiente humano.

Los problemas acústicos no son nuevos, ya que han estado presentes con la evolución de la sociedad, sobre todo a partir de la revolución industrial. En cualquier caso, ninguna época anterior puede ser comparable con las fuentes de ruido que genera la sociedad actual, sobre todo en los países desarrollados. Los nuevos modelos de organización social y económica, el desarrollo tecnológico y el crecimiento de la población son factores claves en el aumento de la contaminación acústica. (Zúñiga, Blanco, & García)

Múltiples estudios científicos demuestran la influencia negativa del ruido sobre el medio ambiente y la salud humana. A diferencia de otros agentes contaminantes el ruido y sus efectos son inmediatos y su acumulación provoca un deterioro físico, psíquico y social evidente.

Entre los efectos más significativos del ruido sobre la salud humana están los siguientes:

- Efectos físicos (pérdida de audición, dolor de cabeza, hipertensión, problemas digestivos, cansancio, etc)

- Efectos psicológicos (estrés, insomnio, irritabilidad, síntomas depresivos, falta de concentración, disminución del rendimiento, etc)
- Efectos sociales (problemas en la comunicación, aislamiento, etc)

El efecto más estudiado de sobreexposición al ruido es la pérdida de audición. El problema radica en que las personas expuestas rara vez son conscientes de la relación causa-efecto, al producirse de forma lenta, aunque progresiva y no llegar a causar sordera total. (Botanical-online SL, 1999)

Consecuentemente en el Ecuador se han establecido varios límites permisibles para el ruido generado por fuentes fijas (motores de combustión interna, bombas, maquinaria industrial, entre otros) los cuales están relacionados a la zona de ubicación de dichas fuentes.

En tal virtud, para la implantación de una fuente fija generadora de ruido, se debe cumplir con un nivel máximo de ruido, medido en el lugar donde se encuentre el receptor.

Por otra parte, previo a la implementación de toda obra o proyecto que genere impactos significativos al ambiente se debe realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EslA), para “predecir y evaluar” los efectos ambientales derivados en cada etapa del proyecto (exploración, construcción, operación y abandono), entre los cuales, el ruido generado por fuentes fijas es, en la mayoría de casos, significativo. Por tanto se debe estimar la atenuación del ruido producido por dicha fuente desde su ubicación hasta el receptor sensible. Frecuentemente se presta muy poca atención, o ninguna, en la fase de proyecto a esta situación futura, y, generalmente, las molestias por ruido aparecen después.

Además, actualmente no existe una metodología validada que permita realizar esta estimación de manera científica; observándose en la práctica que se analiza este impacto de forma subjetiva.

## **1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una metodología para la ejecución de modelos matemáticos de atenuación de ruido en medio atmosférico, en base a los requerimientos de las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996, que sea aplicable a fuentes industriales simples y complejas

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir los criterios técnicos necesarios para facilitar la aplicación de modelos de ruido en medio atmosférico, esenciales para la predicción, atenuación y análisis de resultados del impacto producido por las fuentes industriales simples y complejas.
- Aplicar la metodología a las fuentes de ruido en una zona industrial compleja.
- Comparar la metodología desarrollada en base a los resultados del modelo y los valores de campañas de monitoreo realizadas en la zona industrial.

## **1.3 METODOLOGÍA**

Para cumplir con los objetivos del presente proyecto de titulación se describe a continuación la metodología para cada una de las actividades a realizarse.

### **1.3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **1.3.1.1 Conceptos Básicos de acústica**

La revisión bibliográfica es fundamental para aclarar los conceptos básicos de acústica que nos ayudaran a entender la naturaleza física del sonido y cómo se da su propagación y atenuación en medio atmosférico bajo ciertas condiciones.

### **1.3.1.2 Modelos de propagación de Ruido actualmente utilizados**

En la actualidad existen distintas normas y estándares que brindan una herramienta para determinar la propagación sonora, las cuales se enumeran a continuación.

- ISO 9613. Método Internacional para propósitos generales (Octava y 1/3 octava).
- DAL 32. Método Nórdico industrial (Octava).
- RMR/SRM2. Método de trenes Holandés (Octava).
- CRTN (L10). Método de carretera del Reino Unido.
- XPS 31-133. Métodos Franceses de carretera y trenes basados en NMPB (Octava).
- Harmonoise. Método Europeo para propósitos generales para LAeq, incluyendo efectos meteorológicos (1/3 octava).
- Método de predicción general para plantas industriales (Dinamarca).
- Construction Noise (Hong Kong).
- Entre otros.

De los modelos antes mencionados se eligió la norma ISO 9613, por que se ajusta más a los requerimientos y objetivos del presente proyecto de titulación. Además se encuentra estandarizada y es de fácil comprensión y aplicación, proporcionando resultados confiables.

### **1.3.1.3 Norma ISO 9613**

Comprendidos los conceptos básicos de acústica y elegido el modelo de propagación de ruido se procede con la revisión e interpretación de las normas técnicas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996; que plantean un método analítico de cálculo de la atenuación del sonido como resultado de la absorción atmosférica en

una variedad de condiciones; con el fin de predecir el nivel de ruido a una distancia determinada de la fuente sonora.

### **1.3.2 IDENTIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA BASE UTILIZADA EN ESTUDIOS EXISTENTES**

En el país no existe una metodología comprobada que permita realizar la modelación de atenuación de ruido para fuentes industriales fijas, sin embargo se han aplicado estos modelos de forma empírica sin una metodología comprobada.

Para el desarrollo de este proyecto se utiliza como base la metodología aplicada en el “Modelo de atenuación acústica para Basic Energy - 2008”, elaborado por el MSC. Ing. Byron Arregui Gallegos. Es importante mencionar que esta metodología se ha utilizado durante varios años en distintos trabajos. Sin embargo posee ciertas debilidades y limitaciones, las cuales se mencionan a continuación.

#### **1.3.2.1 Identificación de las debilidades y limitaciones**

Del análisis de la metodología base, se observa que no considera ciertas variables que influyen en la propagación y atenuación del ruido en medio atmosférico para zonas industriales, que resultan en debilidades y a la postre en limitaciones de la modelación.

Entre las variables más importantes que no considera la metodología base tenemos: *el tipo de suelo, la topografía de la zona, la directividad de las fuentes, la identificación y caracterización de los obstáculos (barreras, reflectores, zona industrial, follaje)* que limitará al modelo en la precisión de los resultados.

Además; es necesario definir que método de interpolación es el idóneo para representar los resultados del modelo en forma gráfica dentro de mapas de ruido.

#### **1.3.2.2 Vinculación con la norma ISO 9613**

La metodología base considera la mayoría de los requerimientos de la norma ISO 9613-1:1993, que especifica un método analítico de cálculo de la atenuación del

sonido en función de las condiciones meteorológicas y la frecuencia, para un medio ideal sin obstáculos.

Por otra parte la norma ISO 9613-2:1996 considera la interferencia de varios factores que se vincula con las variables no consideradas en la metodología base mejorando la precisión y semejanza a la realidad de los resultados de la modelación.

### **1.3.3 PROPUESTAS PARA DISMINUIR LAS DEBILIDADES Y LIMITACIONES DE LA METODOLOGÍA BASE**

Una vez determinadas las debilidades y limitaciones de la metodología base, y vinculándolos con las de las normas ISO 9613-1:1993 e ISO 9613-2:1996, se plantea incluir las variables anteriormente descritas en el subtítulo Identificación de las debilidades y limitaciones.

#### **1.3.3.1 Tipo de suelo**

El tipo de suelo influye en la atenuación del ruido ya que las ondas sonoras se reflejan o absorben en función de las características de dureza del terreno, interfiriendo así con la propagación del sonido desde la fuente hasta el receptor.

#### **1.3.3.2 Topografía del terreno**

Es importante incorporar el detalle de la topografía de la zona de estudio, ya que constituye el punto de apoyo de todos los elementos implicados, pues la diferencia del nivel entre el receptor y la fuente, influye sobre el valor de exposición al ruido.

Además se debe señalar que en ciertas ocasiones el relieve del terreno puede comportarse como un obstáculo en la propagación del sonido cuando está lo suficientemente elevado, tal es el caso de taludes.

### **1.3.3.3 Identificación y caracterización de los obstáculos**

Un obstáculo se entiende como todo objeto de tamaño considerable con respecto a la longitud de onda, que influye en la propagación del ruido; por tanto debe ser incluido en la modelación.

La manera en que interfieren los obstáculos en la propagación del sonido se da por reflexión, absorción, y transmisión de la energía de la onda acústica.

### **1.3.3.4 Directividad de las fuentes acústicas**

La directividad indica el comportamiento de la propagación del sonido en función de la dirección permitiendo conocer hacia donde se propagara la mayor cantidad de energía sonora. En la realidad cada fuente presenta una directividad propia, no obstante la determinación de esta variable resulta compleja en ocasiones, por lo cual se suele asumir que una fuente es omnidireccional lo que implica que el sonido se propaga en todas las direcciones con la misma cantidad de energía.

*Todas las variables antes mencionadas influyen en la precisión de los resultados de una modelación de ruido, por lo cual se torna trascendental su caracterización e inclusión en el modelo.*

## **1.3.4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EJECUCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE ATENUACIÓN DE RUIDO EN MEDIO ATMOSFÉRICO.**

Con el objetivo de superar las debilidades y limitaciones identificadas en la metodología base, se plantea la incorporación de las variables propuestas en el título anterior, de esta manera se propone la siguiente metodología para la ejecución de modelos matemáticos de atenuación de ruido en medio atmosférico.

### **1.3.4.1 Recopilación de información necesaria para la modelación de ruido.**

#### ***1.3.4.1.1 Caracterización del área industrial***

##### ***1.3.4.1.1.1 Descripción de la industria.***

Es importante conocer varios aspectos relacionados a la industria como son:

- Ubicación geográfica (incluyendo la elevación sobre el nivel del mar), para tener una guía de las condiciones de temperatura y humedad relativa en el área de estudio.
- Número y ubicación de las fuentes de ruido, receptores y obstáculos que influyan en la propagación.

Para la determinación de emisores y receptores se utilizara la lógica del trabajo y el criterio del técnico del responsable del estudio. Pero como regla general se considera que los emisores de ruido son los equipos o maquinarias que generan la mayor cantidad de ruido. Mientras que los receptores son los puntos, donde se tiene interés en determinar el nivel de ruido para así poder comparar con lo establecido en la legislación ambiental.

- Condiciones operativas, precisan la forma como opera la fuente de ruido en la industria, permitiendo saber si es intermitente o continua. Además para el caso de varias fuentes se puede establecer si su funcionamiento es de manera simultánea o alterna.

Esta información debe ser recopilada de las bases de datos o archivos de la propia industria (informes previos, mapas temáticos, planos, imágenes satelitales, entre otras) o de visita a campo si fuera posible y necesario.

##### ***1.3.4.1.1.2 Factores climáticos y meteorológicos***

Las variables meteorológicas como la temperatura y la humedad relativa tienen efectos importantes sobre la trayectoria de la propagación del ruido, debido a la refracción (cambio en la dirección de las ondas sonoras, producidas por

gradientes verticales de viento) y absorción de la cantidad de energía sonora (el aire seco absorbe una cantidad mayor de energía acústica que el aire húmedo)

Esta información se puede obtener de la base de datos de las estaciones meteorológicas del INAMHI, del Departamento de Aviación Civil (DAC) o incluso de la propia industria. Se recomienda realizar un análisis estadístico de datos meteorológicos de al menos dos años para ingresar condiciones meteorológicas confiables al modelo. Así es posible lograr condiciones de un año tipo, caso contrario, se puede incurrir en errores por condiciones inusuales (ejemplo, años con temperaturas extremas).

#### *1.3.4.1.1.3 Tipo del suelo*

Las ondas sonoras se reflejan o absorben en función de las características de dureza del terreno:

- Suelo duro ( $G=0$ ), incluye pavimentación, agua, hielo, hormigón y otras superficies de toda la tierra que tiene una baja porosidad. De tierra apisonada, por ejemplo, como ocurre a menudo en torno a los polígonos industriales.
- Suelo poroso ( $G=1$ ), incluye suelo cubierto de hierba, árboles u otra vegetación, y todas las otras superficies propicias para el crecimiento de la vegetación, tales como tierras de cultivo.
- Suelo mixto ( $0 < G < 1$ ), si la superficie se compone tanto de tierra dura y porosa.

El tipo de dureza del terreno se puede obtener según el uso del suelo del área de estudio, por análisis de granulometría o inspección in situ de la industria.

#### *1.3.4.1.1.4 Topografía*

La topografía influye en los resultados de la modelación principalmente por la diferencia del nivel entre el receptor y la fuente: además que en ciertas ocasiones obstaculiza la propagación de las ondas sonoras. Esta información se obtiene de los planos de la industria.

#### *1.3.4.1.2 Cuantificación sonora de la fuente de ruido*

Los resultados de la modelación dependen primordialmente de esta variable, ya que sin esta información es imposible determinar el comportamiento que tendrá el ruido en el área de estudio.

Para determinar el nivel sonoro de las fuentes de ruido se puede acudir directamente a los catálogos del fabricante o con los proveedores de los equipos.

No obstante, en caso de no contar con esta información, se puede recurrir a la cuantificación directa de la fuente sonora de estudio o de otra con características similares con un sonómetro integrador de bandas.

Sin embargo no es sencillo precisar que tan ruidosa es una fuente fija, por tanto, una forma exacta de caracterizar la cantidad de ruido producido por un emisor es determinar la potencia acústica que esta emite; pero el rango de potencias es muy amplio y resulta más conveniente expresarlas como niveles de potencia sonoras en decibeles (dB).

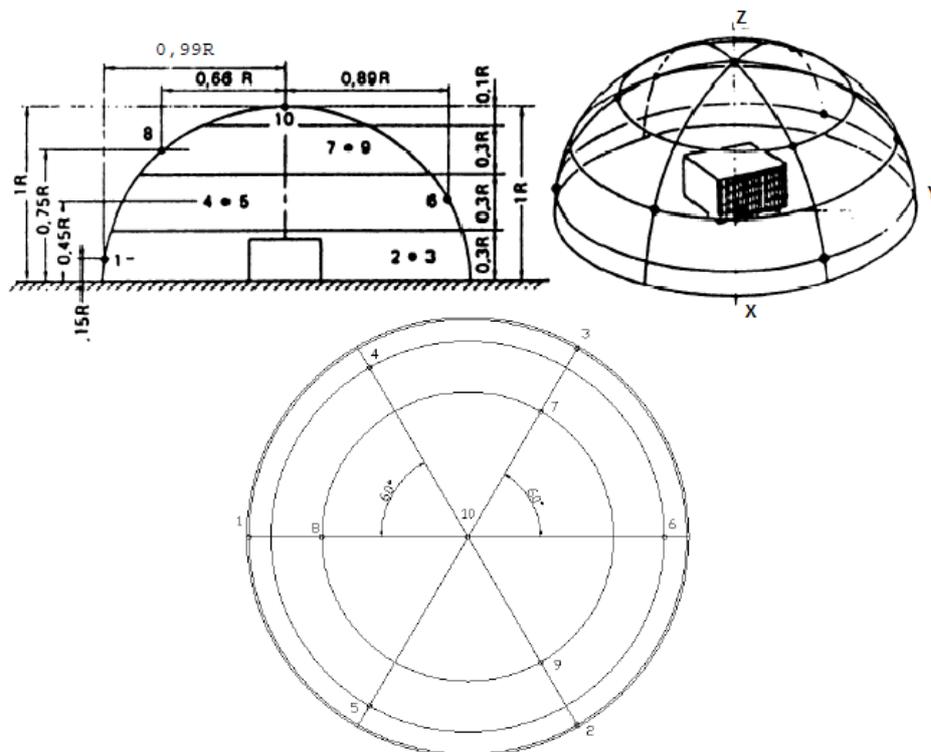
La medición del nivel de presión sonora de la fuente fija se realiza con un sonómetro integrador, en bandas de octava. Además se debe considerar que en la realidad muy pocas fuentes son omnidireccionales, es decir, que irradian la misma energía sonora en todas las direcciones, al contrario son altamente direccionales, ya que irradian más energía en unas direcciones que en otras. Por tanto, al determinar la potencia sonora de un emisor la directividad juega un papel determinante.

Para determinar el nivel de potencia sonora en un campo libre sobre un plano reflectante, típico caso de una máquina ruidosa colocado sobre un suelo duro se sigue el siguiente procedimiento:

- Se rodea la fuente con una superficie hipotética de área  $S$  en forma de un hemisferio. El área  $S$  viene dada por  $2\pi r^2$ , donde  $r$  es el radio del hemisferio.

- El radio del hemisferio hipotético ha de ser igual o mayor que el doble de la mayor dimensión de la fuente y no inferior a 1 m.
- Se mide el nivel de presión sonora en varios puntos dentro del área S. En la Figura 1-1 se muestra los puntos para las localizaciones del micrófono sobre el hemisferio. Los puntos designados están asociados con áreas iguales sobre las superficies del hemisferio. Los niveles de presión sonora en los puntos se miden con ponderación A en bandas de octava, con el sonómetro en respuesta lenta.

**Figura 1-1: Posición de los puntos de medida sobre una semiesfera.**



FUENTE: (CHÁVEZ, 2010)

- Se calcula el nivel de presión sonora media ( $\overline{NPS}$ ) a partir de los niveles de presión sonora medidos ( $NPS_i$ ), de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\overline{NPS} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1NPS_i} \right]$$

(1-1)

Donde:

$\overline{NPS}$  es el nivel de presión sonora promediado para la superficie de medida en dB

$NPS_i$  es el nivel de presión sonora en dB con ponderación A en bandas de octava de las  $i$  medidas en los puntos designados.

$N$  es el número total de medidas

- El índice de directividad DI, en decibelios (dB), de la fuente puede calcularse a partir de las medidas en campo libre sobre un plano reflectante, según la siguiente expresión.

$$DI = NPS_i - \overline{NPS} + 3dB$$

(1-2)

- Se determina el nivel de potencia sonora a partir de la siguiente ecuación

$$NW = \overline{NPS}_i + 10 \log \left( \frac{S}{S_o} \right) + K$$

(1-3)

Donde:

Nw: nivel de potencia sonora en dB

S: área de la superficie de prueba hipotética en m<sup>2</sup>

S<sub>o</sub>: área de referencia igual a 1 m<sup>2</sup>

K: es un coeficiente de corrección que compensa la influencia del ruido de fondo

$$K = -10 \log(1 - 10^{-0.1 \Delta NPS})$$

(1-4)

Donde:  $\Delta NPS = \overline{NPS} - NPS_{prf}$

La diferencia entre el nivel de presión sonora medidos (en bandas de octava) de la fuente y el de ruido de fondo respectivamente. (Chávez, 2010)

Nota: Para que este método sea valido se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

1. Las medidas se realizan sobre un plano reflectante extendido (suelo duro típico de las zonas industriales)
2. Las dimensiones del emisor no son excesivas
3. El nivel de presión sonora del ruido de fondo aislado está más de 6 dB por debajo de la fuente sin ruido de fondo

#### ***1.3.4.1.3 Reconocimiento de obstáculos en la propagación del sonido***

Todos los obstáculos que puedan tener influencia en la propagación del ruido entre el emisor y el receptor deben ser inventariados y caracterizados, de tal forma que se pueda identificar básicamente las dimensiones, tipo de material del obstáculo, y la ubicación de estos en el área industrial.

Se puede clasificar a los obstáculos en:

- Naturales: Dentro de esta categoría encontramos a rocas grandes y vegetación frondosa.
- Artificiales: se consideran elementos como edificios, muros, tapias, vallas, zonas industriales, pantallas acústicas, etc.

La influencia de los obstáculos en el modelo se mide en términos de niveles sonoros aumentados o disminuidos, por reflexión o absorción respectivamente.

Generalmente se tiene buena información cartográfica de estos obstáculos y las características se las puede extraer de la industria.

#### **1.3.4.2 Aplicación del modelo matemático**

Para estimar la propagación y la atenuación del sonido en medio atmosférico se usará el modelo estandarizado en las normas ISO 9613 parte 1 de 1993 e ISO 9613 parte 2 de 1996.

Sin embargo la complejidad en los cálculos de los algoritmos de estas normas se puede simplificar con la utilización de programas informáticos como el SPM 9613 que utiliza los mismos algoritmos de la norma.

##### ***1.3.4.2.1 Ejecución del programa SPM 9613.***

Con la información necesaria, se puede emplear el software SPM 9613 (basado en los algoritmos de las normas ISO 9613 parte 1 de 1993 e ISO 9613 parte 2 de 1996), para definir la atenuación del ruido, a fin de predecir la cantidad de energía sonora en el área de interés.

#### **1.3.4.3 Representación de la propagación del ruido en planos y mapas**

Con los resultados del modelo se procede a realizar una interpolación con métodos geoestadísticos que están incluidos en programas como ArcMap 9.2 de ESRI o en el SURFER 10. Una buena alternativa para determinar la propagación del ruido es el método de interpolación de Kriging Logarítmico, que se adapta bien a este caso y nos da a conocer de manera muy aproximada la distribución del sonido para un área determinada

A partir de la información obtenida con la interpolación, se puede generar las isófonas (líneas con igual cantidad de energía sonora) y representarlas en mapas temáticos para representar de mejor manera los valores de ruido que se tendrán en el área de estudio.

### **1.3.5 LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**

Para la ejecución del presente proyecto de titulación es necesario realizar salidas de campo al área industrial del caso de estudio, en la cuales se realizará el levantamiento de la información necesaria (características del área industrial, cuantificación sonora de las fuentes de ruido, identificación y caracterización de los obstáculos, entre otros) para la ejecución del modelo matemático de atenuación de ruido especificado en las Normas ISO 9613.

Para poder realizar esta actividad se utilizará los siguientes materiales y equipos:

- Sonómetro integrador en bandas de octava.
- GPS.
- Clinómetro óptico
- Cámara fotográfica.
- Cinta métrica.
- Trípode (1.5 m alto).
- Equipo de protección personal (EPP).

#### **1.3.5.1 Caracterización del área industrial**

##### ***1.3.5.1.1 Descripción de la industria***

La descripción de la industria se la realizara en base a la información solicitada a la empresa, pero también se determinara y comprobara cierta información como:

- Para determinar la ubicación geográfica y la elevación se utilizara un GPS Garmin 60CSx, con el cual se ubicaran varios puntos de la industria, de tal forma que se tenga un valor de coordenadas y altitud real.

- El número y ubicación de las fuentes de ruido se la realizara con el mismo GPS y con una inspección sobre toda la zona industrial.
- Los receptores sensibles serán determinados bajo el criterio de la legislación ambiental. Enfocándonos principalmente sobre los puntos donde se encuentre el ser humano.
- También es importante conocer cómo operan las fuentes de ruido, esto se lograra con la revisión de la bitácora de operación llevada por los operadores.

#### ***1.3.5.1.2 Topografía***

La topografía del área de estudio, puede ser determinada con los planos de la industria, sin embargo para este caso de estudio, esta característica será confirmada en campo.

#### ***1.3.5.1.3 Tipo de Suelo***

Para el presente caso de estudio se plantea determinar el uso del suelo de la industria y sus alrededores, con un recorrido por toda la instalación y a sus alrededores, para de esta manera caracterizar el tipo de suelo.

En caso de que esto no sea posible, se plantea utilizar un método empírico, el cual consiste en hundir una pala en el suelo, si no presenta resistencia significa que es un suelo suave y si presenta resistencia significa que es un suelo duro.

#### **1.3.5.2 Cuantificación sonora de las fuentes de ruido**

Para caracterizar el nivel de energía sonora que emiten las fuentes de la industria, se utilizará un sonómetro diferencial; el cual será ubicado según las especificaciones de la metodología propuesta. Se realizará varias mediciones para hallar el valor promedio.

### **1.3.5.3 Reconocimiento de obstáculos**

Los obstáculos a identificar son: barreras, reflectores, zonas industriales y follaje. Estos serán identificados en los recorridos dentro la zona industrial y en sus alrededor.

Se tendrá que establecer las dimensiones de estos, como es el ancho, altura y profundidad, para lo cual se hará uso del clinómetro óptico, por seguridad del personal que mida dichas variables.

### **1.3.6 APLICACIÓN**

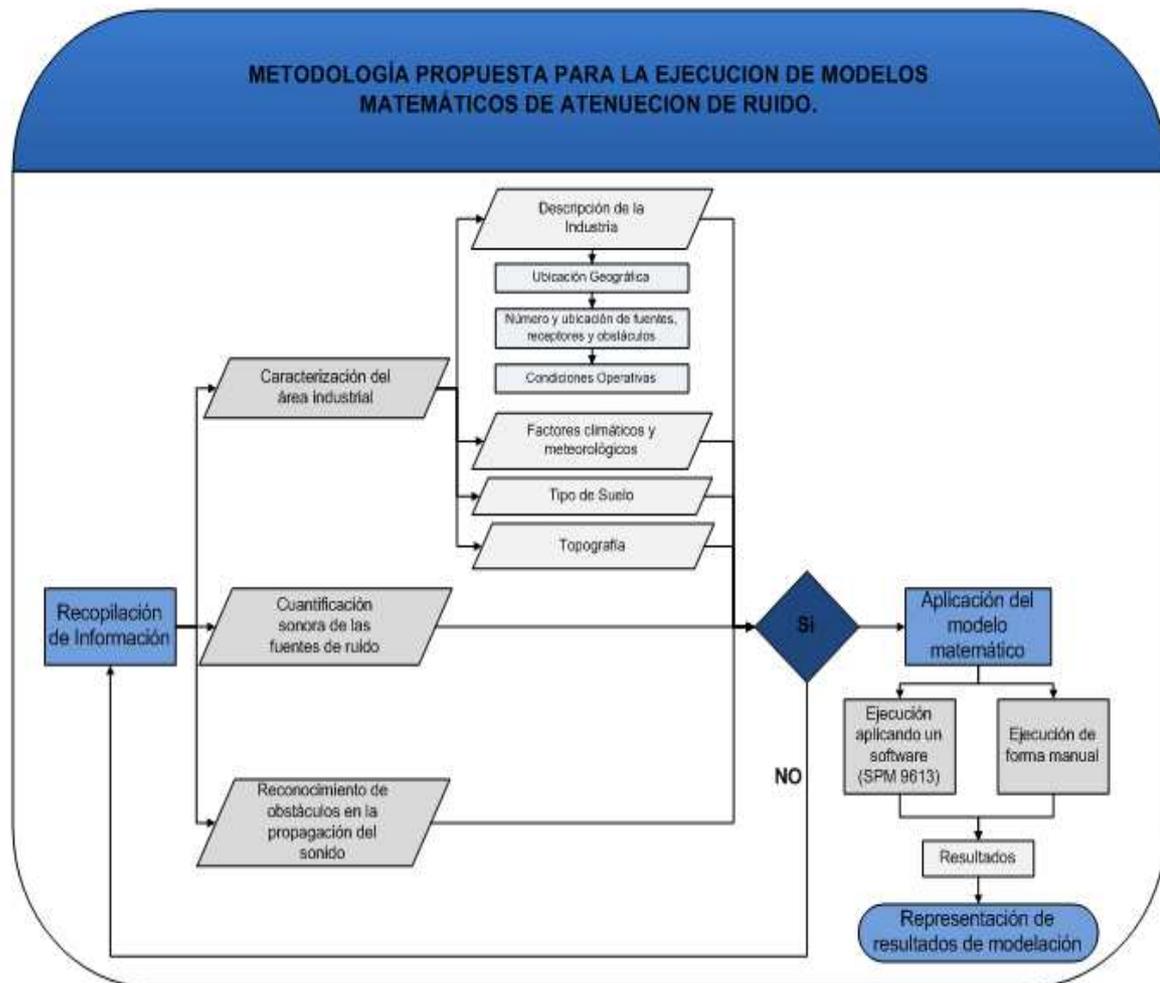
Una vez obtenida la información en campo, se procederá a realizar el análisis en gabinete. Posteriormente será procesada con el software SPM 9613. Con lo cual se obtendrá los resultados para su respectiva interpretación y comparación.

### **1.3.7 COMPARACIONES CON LOS DATOS MEDIDOS**

Los resultados que se obtendrán serán comparados con el monitoreo de ruido realizado por la consultora ambiental Cardno ENTRIX, para de esta manera tener la diferencia del nivel de presión sonora.

También se realizarán mapas temáticos de las isófonas de ruido tanto para el monitoreo como para el modelo, de tal forma que las diferencias puedan ser apreciada con mayor facilidad.

### 1.3.8 FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.



ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### 1.4 ALCANCE

La presente investigación busca la generación de una metodología para la ejecución de modelos matemáticos de atenuación de ruido en medio atmosférico, aplicable a cualquier tipo de actividad industrial con fuentes fijas de ruido

La metodología a desarrollar estará aplicada a una zona industrial compleja para este caso será la Estación de bombeo Sardinas perteneciente a OCP Ecuador S.A., ubicada en el cantón Quijos, Provincia de Napo.

Inicialmente se caracterizará la zona industrial e identificará las fuentes generadoras de ruido. Con el propósito de determinar la atenuación de la onda

sonora se realizará un inventariado de la infraestructura y los materiales de construcción que la conforman.

Los datos recopilados de niveles de ruido, barreras físicas, tipo de superficie, existencia de receptores y condiciones climáticas de la zona serán procesados en un software basado en las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996, para generar ecuaciones de atenuación.

Una vez obtenidos los resultados del modelo matemático, se prepararán mapas de distribución de ruido debidamente georeferenciados a través de un sistema de información geográfica (SIG), identificando el mejor método de interpolación para la distribución de las ondas sonoras.

Los resultados obtenidos del modelo serán comparados con los datos obtenidos del monitoreo de ruido de diciembre de 2010, realizados por la consultora ambiental Cardno Entrix, para determinar la diferencia que existe entre las dos, considerando que el monitoreo es el resultado de una serie de condiciones instantáneas, que varían en el tiempo.

## CAPÍTULO 2

### INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 PRINCIPIOS DE ACÚSTICA AMBIENTAL

##### 2.1.1 Origen del Sonido

El sonido consiste en una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión; se produce cuando el aire entra en vibración por cualquier procedimiento, generalmente cuando algún objeto vibrante entra en contacto con el aire. Por ejemplo una cuerda en vibración, empuja y comprime el aire delante de ella, y como la atmósfera es un medio elástico la porción de aire perturbada se propaga en todas las direcciones a partir del foco de perturbación. (López, 2000)

La mayor parte de los sonidos reales son el resultado de una serie de perturbaciones sucesivas. (Miyara, 1999)

**Figura 2-1: Propagación del sonido en un medio elástico.**



FUENTE: (MIYARA, 1999)

En la Figura 2-1 se puede observar un sonido como consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, periódica. (a) El aire en reposo. (b) Primera perturbación. (c) Segunda perturbación cuando la primera ha recorrido una distancia  $\lambda$  (longitud de onda). (d) Tercera perturbación cuando la primera ha recorrido una distancia  $2\lambda$  y la segunda una distancia  $\lambda$ . (e) Cuarta perturbación

cuando las anteriores han recorrido las distancias  $3\lambda$ ,  $2\lambda$ , y  $\lambda$  respectivamente. (Miyara, 1999)

## **2.1.2 Definiciones**

### **2.1.2.1 Ruido**

El ruido es definido como un sonido no deseado y que causa molestia, siendo un tipo de vibración que puede conducirse a través de sólidos, líquidos o gases. Es una forma de energía en el aire, vibraciones invisibles que entran al oído y crean una sensación. Por tanto es considerado un fenómeno subjetivo, debido a que mientras para unas personas puede ser causa de molestia en otras no tiene el mismo efecto. (Pecorelli)

Para el medio ambiente, el ruido es cualquier sensación auditiva desagradable y molesta, generalmente de intensidad alta.

El Reglamento de Prevención de la Contaminación Ambiental por Ruido, en Acuerdo Ministerial No. 7789. RO/ 560 de 12 de Noviembre de 1990 define al ruido como: “la unión estadísticamente desordenada de sonidos que pueden provocar una pérdida de audición o ser nocivo para la salud o entrañar otro tipo de peligro.”

### **2.1.2.2 Ruido de fondo**

Es el ruido que prevalece en ausencia del ruido generado por la fuente objeto de la evaluación, está asociado con el entorno. (MAE, 2008)

### **2.1.2.3 Fuente de Ruido**

Las fuentes de ruido o emisores acústicos se definen como, cualquier infraestructura, equipo, maquinaria, actividad o comportamiento que genere contaminación acústica. (Comunidad de Madrid)

#### 2.1.2.4 Receptor

Se refiere a cualquier elemento ligado a una posición geográfica concreta, de la cual interese conocer el nivel de inmisión acústica al que está expuesto.

Este criterio se aplica tanto a personas en el interior o exterior de su vivienda o de su puesto de trabajo como a áreas en las que se proyecte la construcción de viviendas u otro tipo de edificación, o incluso a zonas protegidas cuyos valores deban mantenerse bajos (Comunidad de Madrid).

#### 2.1.2.5 Generación de ruido

Esta en relación a la producción de vibraciones sonoras no deseadas, ya sea por las características físicas de las mismas o por las características propias del receptor (Comunidad de Madrid)

#### 2.1.2.6 Atenuación acústica

Disipación de la energía acústica con el tiempo o la distancia

#### 2.1.2.7 Aislamiento del sonido

Propiedad física de una estructura o material de impedir que el sonido llegue a un receptor.

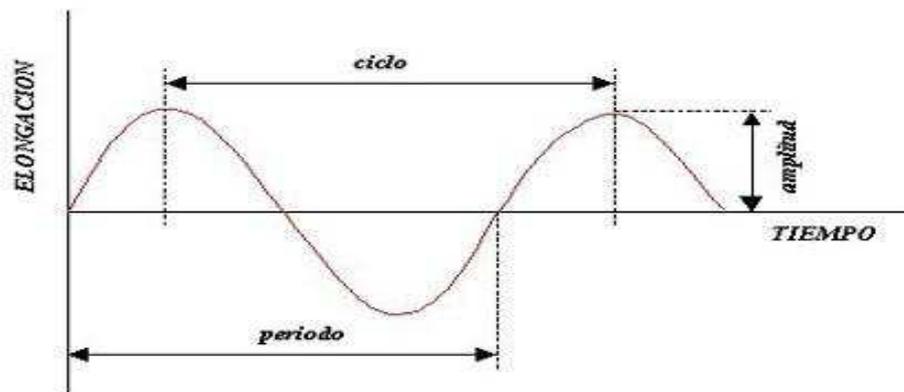
### 2.1.3 PROPIEDADES QUE DEFINEN AL RUIDO.

#### 2.1.3.1 Parámetros ondulatorios

##### 2.1.3.1.1 *Periodo (T)*

El período es el tiempo transcurrido entre dos puntos equivalentes de la oscilación es decir en producirse un **ciclo completo** de la onda sonora. Es el mínimo lapso que separa dos instantes en los que el sistema se encuentra exactamente en el mismo estado; por ejemplo, en una onda, el periodo es el tiempo transcurrido entre dos crestas o valles sucesivos. Su unidad es el segundo.

**Figura 2-2: Representación de una onda sonora ideal.**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

#### 2.1.3.1.2 *Ciclo*

Se entiende como ciclo a la repetición de un suceso periódico. Los ciclos no tienen unidades de medida

#### 2.1.3.1.3 *Amplitud (A)*

Las variaciones de presión entre los valores mínimos y máximos de una onda sonora, producen que un sonido se escuche más o menos fuerte; a esto se lo conoce como amplitud de onda.

La amplitud es un coeficiente que marca el volumen sonoro de la onda. Por tanto, a mayor amplitud mayor es el volumen y viceversa

#### 2.1.3.1.4 *Frecuencia (f)*

Es una magnitud objetiva y mensurable que se emplea para indicar el número de repeticiones de un suceso periódico en una unidad de tiempo, es decir, es el número de ciclos por segundo. Por tanto es la inversa del periodo. Su unidad es el  $\text{Hz}^1$ .

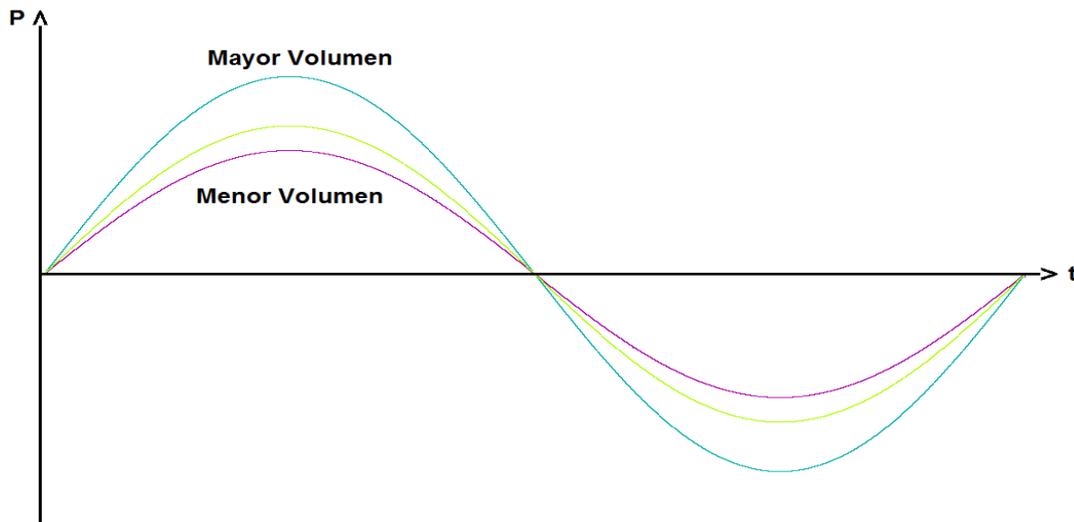
---

<sup>1</sup> Hertzio (Hz [s<sup>-1</sup>]): Un hercio representa un ciclo por cada segundo, entendiendo ciclo como la repetición de un suceso.

$$f = \frac{\# \text{ ciclos}}{\text{tiempo}} = \frac{1}{T}$$

(2-1)

**Figura 2-3: Ondas de una misma frecuencia y diferente amplitud.**



FUENTE:(PCPFILLES)

#### 2.1.3.1.5 Longitud de onda ( $\lambda$ )

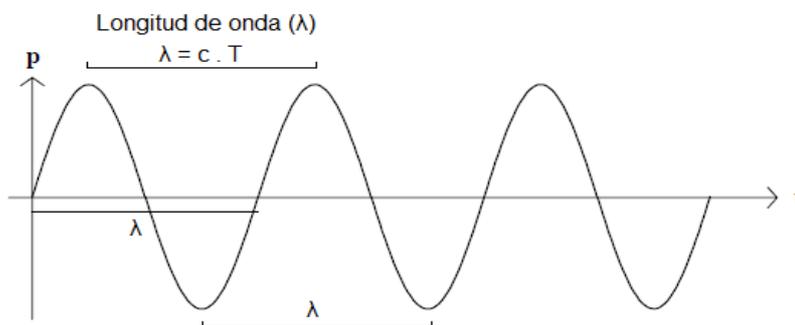
La longitud de onda está relacionada directamente con la velocidad del sonido y su frecuencia. En los sonidos periódicos, para cada periodo se repite la correspondiente perturbación que se desplaza una distancia  $c.T$ , entre puntos análogos, esta distancia se denomina longitud de onda (Ver Figura 2-4), se la mide en metros y está determinada por la siguiente relación:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c T$$

(2-2)

Para sonidos que se propagan en el aire, dentro del rango de frecuencias audibles, los límites de la longitud de onda son de 17m para 20 Hz y 17 mm para 20000 Hz, como se puede apreciar en la Figura 2-5 y Tabla 2-1.

**Figura 2-4: Representación de la longitud de onda en un tono puro.**



FUENTE: (PECORELLI)  
 ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Figura 2-5: Longitudes de ondas relacionadas con sus frecuencias.**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

**Tabla 2-1: Frecuencia de algunas notas y longitudes de onda correspondientes, en el aire a 20°C ( $c = 344\text{m/s}$ )**

NOTA MUSICAL	$f(\text{Hz})$	$\lambda (\text{M})$
DO de un tubo de órgano de 9.6 m (mínima frecuencia audible)	16	21.5
LA (contraoctava, última nota del piano)	27	12.7
DO (contraoctava)	32	10.7
DO (gran octava)	64	5.4
DO (pequeña octava)	128	2.7

<i>NOTA MUSICAL</i>	<i>f(Hz)</i>	<i>λ (m)</i>
DO	256	1.35
DO	512	0.67
FA	2734	0.125
DO	4096	0.85
<i>Máxima frecuencia audible</i>	20000	0.017

FUENTE: (MARÍN, 2001)

### 2.1.3.1.6 *Velocidad de propagación del sonido (c)*

El sonido se propaga a través de un medio elástico (como el aire) a una velocidad determinada que dependerá de las características del medio; en conclusión esta varía en función del medio en el que se trasmite. Y se mide en m/s.

La propagación de las ondas sonoras hace vibrar las partículas individuales del medio sin alterar sus posiciones medias.

La velocidad del sonido en un gas depende de su peso molecular y de su temperatura, según la ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

(2-3)

Donde:

$\gamma$  = es el coeficiente de calores específicos =  $C_p/C_v = 1.4$  (para el aire),

R = 8,31 J/mol·°K,

$M$  = masa de 1 mol en kg/mol = 0.0288 kg/mol para el aire,

$T$  = temperatura absoluta en °K.

Para temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, esta expresión puede aproximarse (para el aire) con la siguiente expresión:

$$c = 332 + 0.608T$$

(2-4)

(Miyara, 1999)

Donde  $T$  es la temperatura en grados Celsius (°C) y  $c$  es la velocidad del sonido en m/s. Por tanto, para  $T = 20$  °C resulta  $c = 344$  m/s. Como se puede observar, la temperatura del aire tiene un efecto significativo sobre la velocidad de propagación de las ondas acústicas.

Las perturbaciones se pueden propagar en cualquier medio elástico, como los líquidos y los sólidos, de hecho en los sólidos se desplazan mucho más rápido que en los gases. La Tabla 2-2 recopila valores aproximados de la velocidad del sonido en varios medios para ondas planas<sup>2</sup>

**Tabla 2-2: Velocidad del sonido para ondas planas en varios medios.**

<b>SÓLIDOS Y LÍQUIDOS EN CONDICIONES NORMALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA</b>		
<b>Sustancia</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>
Aluminio	2700	5104
Hierro	7800	5000

<sup>2</sup> En una onda plana la presión en cada instante es constante sobre cada plano perpendicular a la dirección de propagación. (Miyara, 1999)

Plomo	11400	1227
Marmol	2700	3810
Agua	998	1473
Agua de mar	1020	1460
Gasolina	700	1166

**GASES EN CONDICIONES NORMALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA**

<b>Sustancia</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Velocidad "c" (m/s)</b>
Vapor de agua	808	401
Aire	1293	344
Oxígeno	1430	317.2
Anhídrido carbónico	1970	258
Cloro	3220	206.4

FUENTE: (PECORELLI)

**2.1.3.1.7 Velocidad del sonido Vs velocidad de las partículas**

La propagación de una onda sonora no implica un desplazamiento neto de las partículas que conforman el aire, sino de la perturbación. En otras palabras, no existe propagación de materia, como sucedería en una ráfaga de viento o en el flujo de aire.

Cuando por un punto pasa una perturbación, las partículas correspondientes experimentan un pequeño desplazamiento respecto a su posición de equilibrio; al terminar la perturbación, cada partícula vuelve a su ubicación original.

“El movimiento de una partícula alrededor de su posición de equilibrio podría describirse por medio de la distancia respecto a dicha posición en cada instante (elongación), pero resulta más conveniente hacerlo en términos de la velocidad  $u$ .

Una de las razones es que para una onda plana la presión resulta ser proporcional a la velocidad”(Miyara, 1999)

$$\frac{p}{\mu} = \rho_0 c$$

(2-5)

Donde:

$\rho_0$  = Densidad del aire en Kg/m<sup>3</sup> (1.2 Kg/m<sup>3</sup> a 20 °C)

$u$  = Velocidad de las partículas (m/s)

$p$  = Presión sonora

$c$  = Velocidad de propagación del sonido (344 m/s)

#### **2.1.3.1.8 Impedancia acústica ( $Z_a$ )**

Cada medio sea este sólido, líquido o gaseoso; ofrece una resistencia para la propagación del sonido. La impedancia es determinada por:

$$Z_a = \frac{p}{\mu} = \rho_0 c$$

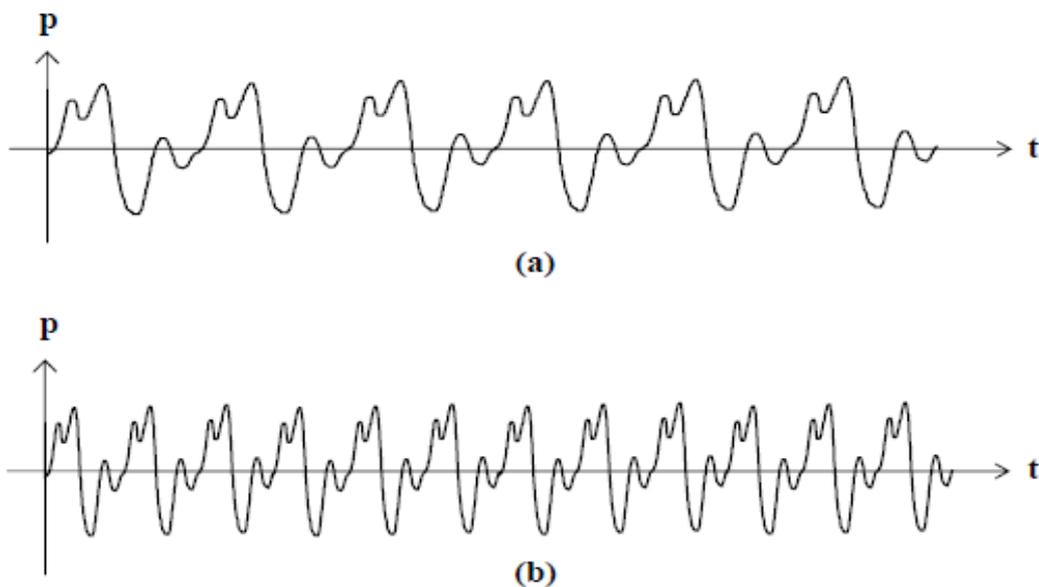
(2-6)

### 2.1.3.2 Cualidades del Sonido

#### 2.1.3.2.1 Tono

Es una característica mediante la cual distinguimos los sonidos graves de los agudos, de tal forma que los sonidos que vibran a baja frecuencia son graves (bajos), mientras que los de alta frecuencia son agudos (Altos)

**Figura 2-6: Sonidos periódicos: (a) grave; (b) agudo.**



FUENTE:(MIYARA, 1999)

#### 2.1.3.2.2 Tono Puro

El sonido producido por un diapasón<sup>3</sup> es un tono puro, simple y estable de una sola frecuencia. La variación de presión para semejante tono corresponde a la curva senoidal mostrada en la Figura 2-7, cuya ecuación se expresa como:

$$p(t) = A \text{ Sen } 2\pi ft$$

(2-7)

---

<sup>3</sup> Diapasón. Es una pieza en forma de U de metal elástico (generalmente acero). Cuando se le golpea haciéndolo vibrar, genera una onda senoidal casi inaudible dependiendo de la frecuencia.

Ecuación que corresponde a un movimiento armónico simple. Donde:

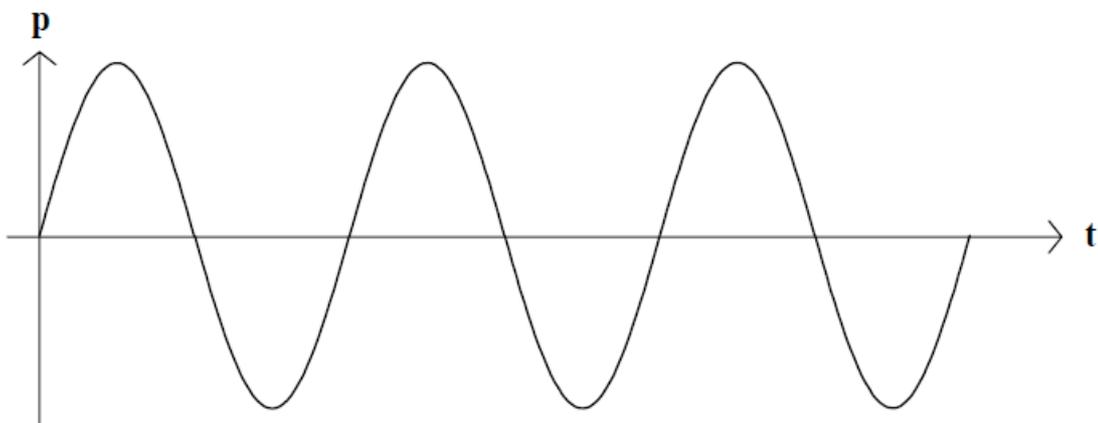
$p$  = es la presión

$A$  = la presión máxima en un ciclo dado

$t$  = es el tiempo

$f$  = es la frecuencia

**Figura 2-7: Tono puro (onda senoidal).**



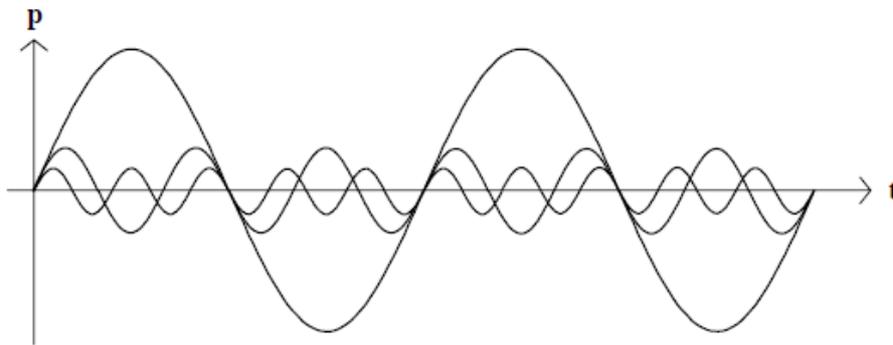
FUENTE: (MIYARA, 1999)

### 2.1.3.2.3 *Timbre*

Físicamente el timbre de un sonido se relaciona con el hecho de que casi nunca un tono es puro, es decir, nunca un sonido corresponde a una onda sonora pura. El timbre es una cualidad que nos permite distinguir dos sonidos de igual intensidad e idéntico tono que han sido emitidos por focos sonoros diferentes. Esta es la razón por la cual podemos diferenciar un tipo de instrumento de otro, o reconocer el timbre de la voz de una persona.

La distinción del timbre se debe a que la onda más importante está acompañada por otras de distinta frecuencia, normalmente múltiplos que se llaman armónicos y se superponen a la onda correspondiente a la frecuencia fundamental (La onda a la que pertenece la mayor parte de la energía y mayor amplitud de ese sonido se le llama armónico fundamental)

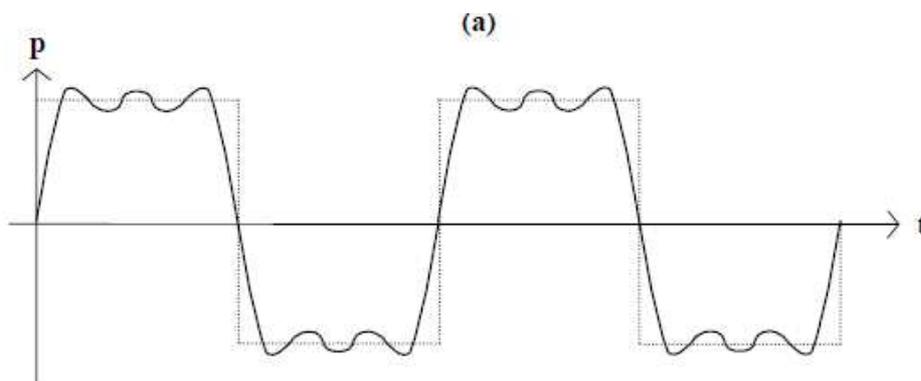
**Figura 2-8: Armónicos de una onda cuadrada.**



FUENTE: (MIYARA, 1999)

Los tres primeros armónicos de una onda cuadrada, de frecuencias  $f_0$ ,  $3 f_0$  y  $5 f_0$ . Cuya superposición resulta en una onda cuadrada.

**Figura 2-9: Onda cuadrada.**



FUENTE: (MIYARA, 1999)

### 2.1.3.3 Presión sonora

Cuando se propaga una onda sonora en un medio elástico como el aire genera una perturbación que consiste en una variación de la presión del aire respecto de la presión atmosférica. Esta presión sonora es útil para caracterizar la onda sonora ya que podemos medirla fácilmente.

$$p = P - P_0$$

(2-8)

Donde:

$p$  es la variación de la presión

$P$  es la presión generada por un cuerpo en vibración

$P_0$  es la presión atmosférica ( $10^5 \text{ Pa}$ )<sup>4</sup>

La variación de presión correspondiente a sonidos audibles está en el rango de:

$$20 \times 10^{-6} \text{ Pa} < p < 20 \text{ Pa} \quad \text{Por tanto: } p \lll P_0$$

#### 2.1.3.4 Presión Sonora Efectiva o RMS ( $P_{ef}$ )

La abreviación RMS quiere decir valor cuadrático medio de la presión (root mean square en denominación inglesa), lo cual significa que las presiones sonoras instantáneas en un intervalo de tiempo son primero elevadas al cuadrado luego promediadas y finalmente extraída la raíz cuadrada del promedio. El cálculo de la presión efectiva para una onda senoidal (tono puro) en función de la presión sonora máxima se expone a continuación:

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots P_n^2}{n}}$$

(2-9)

O también:

---

<sup>4</sup> Pascal (Pa): es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades y se lo define como la presión ejercida por una fuerza sobre una superficie.  $1 \text{ Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

(2-10)

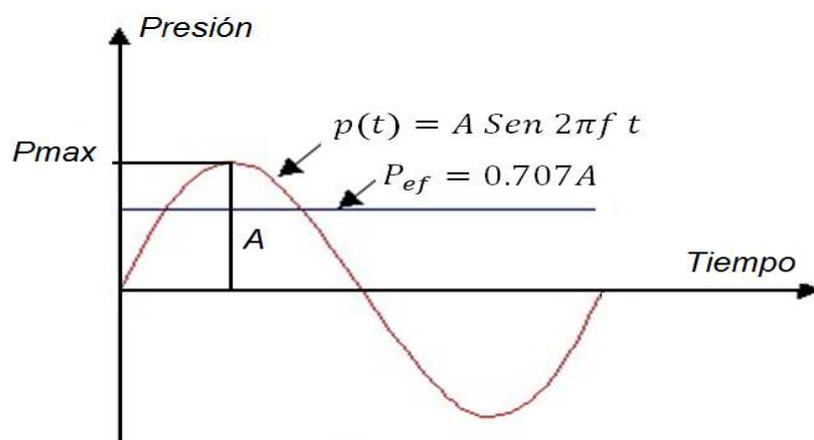
“La presión eficaz corresponde a un valor constante capaz de producir la misma intensidad media”.(Miyara, 1999)

La relación entre la presión eficaz y la máxima (amplitud) resulta ser:

$$P_{ef} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{A}{\sqrt{2}} = 0.707 A$$

(2-11)

**Figura 2-10: Variación de presión acústica en el tiempo.**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

Generalmente los instrumentos de medición de sonido son diseñados para medir la presión sonora efectiva.

### 2.1.3.5 Energía de una onda sonora

La energía es uno de los conceptos centrales en la física, debido a que es una propiedad común a todos los sistemas físicos (mecánicos, electromagnéticos, termodinámicos, químicos). Un caso particular de sistemas mecánicos son los

sistemas acústicos ya que el campo sonoro varía con la posición por tanto su energía se describe mejor mediante la densidad de energía  $D$ . La energía acústica se puede descomponer en energía potencial y energía cinética

$$D = \frac{1}{2} \left( \rho_0 u^2 + \frac{p^2}{\rho_0 c^2} \right)$$

(2-12)

Donde:

$\rho_0$  = Densidad del aire en Kg/m<sup>3</sup> (1.2 Kg/m<sup>3</sup> a 20 °C)

$u$  = Velocidad de las partículas (m/s)

$p$  = Presión sonora

$c$  = Velocidad de propagación del sonido (344 m/s)

El primer término corresponde a la energía cinética y el segundo a la energía potencial.

En el caso de una onda plana (en la cual la presión es constante sobre los planos perpendiculares a la dirección de propagación) los dos términos se hacen iguales.

$$D_{ondaplana} = \frac{p^2}{\rho_0 c^2}$$

(2-13)

### 2.1.3.6 Intensidad del Sonido (I)

La intensidad está en función de la amplitud, esta es la razón por la cual algunos sonidos son más intensos que otros. (Rodríguez & Susevich)

“La intensidad sonora puede definirse como: 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”. (Pecorelli)

Para una onda sonora que se propaga libremente; la intensidad sonora puede expresarse por:

$$i = D c \tag{2-14}$$

$$i = \frac{p^2}{\rho_0 c} \tag{2-15}$$

Siendo:  $\rho_0 c = Za$

$$i = \frac{p^2}{Za} \tag{2-16}$$

Debido que la intensidad sonora varía con el tiempo se debe realizar el cálculo de su valor medio en un intervalo T, obteniendo la Intensidad media (I):

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \tag{2-17}$$

O también:

$$I = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \tag{2-18}$$

Siendo:

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

(2-19)

En términos de  $P_{ef}$  la intensidad media es:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c}$$

(2-20)

La unidad de la intensidad utilizada por el Sistema Internacional de Unidades es el vatio por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).

### 2.1.3.7 Potencia Sonora (W)

Se define como la cantidad de energía acústica emitida en la unidad de tiempo por una fuente sonora determinada. Su unidad es el vatio (W).

Según la definición de intensidad sonora:

$$I = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo} \times \text{Superficie}} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Superficie}} = \frac{W}{S}$$

(2-21)

Para una esfera:  $S = 4\pi r^2$  ( $R$  es la distancia desde la fuente a la cual se determina la intensidad sonora)

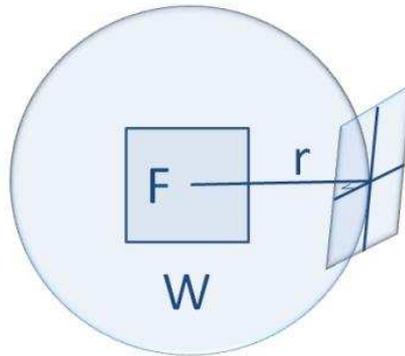
$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

(2-22)

$$W = I 4\pi r^2$$

(2-23)

**Figura 2-11: Propagación de la onda acústica.**



FUENTE: (PECORELLI)

Desde esta relación es evidente que la intensidad disminuirá con el cuadrado de la distancia desde la fuente, “ley de los cuadrados inversos”.

Considerando que:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c}$$

(2-24)

Entonces:

$$W = \frac{P_{ef}^2}{\rho_0 c} 4\pi R^2$$

(2-25)

**Tabla 2-3: Relación entre la Potencia y el nivel de presión sonora**

<b>FUENTE</b>	<b>POTENCIA</b>	<b>NIVEL DE PRESIÓN SONORA (dB)</b>
Avión Reactor	10 kilowatios	160
Martillo neumático	1 kilowatio	120
Automóvil a 72 Km/h	0.1 watio	110

<b>FUENTE</b>	<b>POTENCIA</b>	<b>NIVEL DE PRESIÓN SONORA (dB)</b>
Piano	20 miliwatios	103
Conversación normal	20 $\mu$ watios	73
Reloj eléctrico	0.02 $\mu$ watios	43
Susurro	0.00 $\mu$ watios	30

FUENTE: (MARÍN, 2001)

### 2.1.3.8 El Decibel (dB)

Los sonidos presentes en nuestro entorno tienen un rango impresionantemente amplio de presiones, por tal razón conviene utilizar una escala logarítmica para comprimir este gran intervalo.

Además la respuesta del oído humano a las presiones sonoras es semejante a esta escala. Por este motivo es útil emplear el decibel como unidad de medición.

“El decibel es una unidad adimensional usada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. De esta manera el decibel es usado para describir niveles de presión, potencia e intensidad acústica”. (Pecorelli)

### 2.1.3.9 Nivel de presión sonora (NPS):

El nivel de presión sonora se expresa en decibeles y está dada por la siguiente expresión:

$$NPS = 20 \log \frac{P_{ef}}{P_{ref}}$$

(2-26)

Donde:

$P_{ef}$ : Valor eficaz de la presión sonora

$P_{ref}$ : Presión de referencia ( $20 \times 10^{-6}$  Pa )

El valor de  $P_{ref}$  se ha elegido porque coincide con el umbral de audición normal para la frecuencia de 1 kHz, lo cual implica que un sonido se puede percibir cuando  $NPS > 0$  dB (dB).

*Nota: El oído humano es capaz de detectar variaciones de presión acústica, que se extienden desde los sonidos más intensos que pueden soportarse sin experimentar un dolor auditivo agudo que corresponde a unos 20 Pa (Pascuales), mientras que los apenas audibles están cerca de 20  $\mu$ Pa (Micropascuales o  $10^{-6}$  Pa).*

El rango de presión audible expresado en dB, será:

Límite umbral = 20 $\mu$ Pa.

$$NPS_{umbral} = 20 \log \frac{20 \times 10^{-6}}{20 \times 10^{-6}} = 0 \text{ dB}$$

Límite de dolor = 20Pa

$$NPS_{dolor} = 20 \log \frac{20}{20 \times 10^{-6}} = 120 \text{ dB}$$

**Tabla 2-4: Relación de la presión acústica y el nivel de presión**

<b>FUENTE</b>	<b><math>P_{ef}</math> (Pa)</b>	<b>NPS (dB)</b>	<b>EFEECTO</b>
Zona de lanzamiento de cohetes sin protección auditiva	20000	180	Pérdida auditiva reversible
Operación en pista de jets. Sirena antiaérea.	200	140	Dolorosamente fuerte

<i>FUENTE</i>	<i>P<sub>ef</sub> (Pa)</i>	<i>NPS (dB)</i>	<i>EFFECTO</i>
Trueno	63.245	130	Dolorosamente fuerte
Despegue de jets (60 m). Bocina de un auto (1m)	20	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático. Concierto de rock	6.324	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector. Petardos	2	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m). Transito urbano	0.632	90	Muy molesto. Daño auditivo (8 horas)
Reloj despertador (0.5 m). Secador de cabello	0.200	80	Molesto
Restaurante ruidoso. Transito por autopista. Oficina de negocios	0.063	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado. Conversación normal.	0.020	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	0.006	50	Silencio
Dormitorio. Oficina tranquila	0.00200	40	
Biblioteca. Susurro (5 m)	0.00063	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	0.00020	20	
	0.00006	10	Apenas audible
Umbral auditivo	0.00002	0	Umbral auditivo

### 2.1.3.10 Nivel de presión sonora continuo equivalente (Leq)

La mayoría de los ruidos existentes en un lugar tienen niveles de presión acústica variables en el tiempo. Por tanto lo ideal sería poder asignar un ruido constante hipotético, correspondiente a la misma cantidad de energía que el ruido real considerado en un punto determinado durante un periodo de tiempo  $T$ . Esto es precisamente lo que hace el nivel de ruido continuo equivalente, definido por la expresión:

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^2 dt$$

(2-27)

Donde:

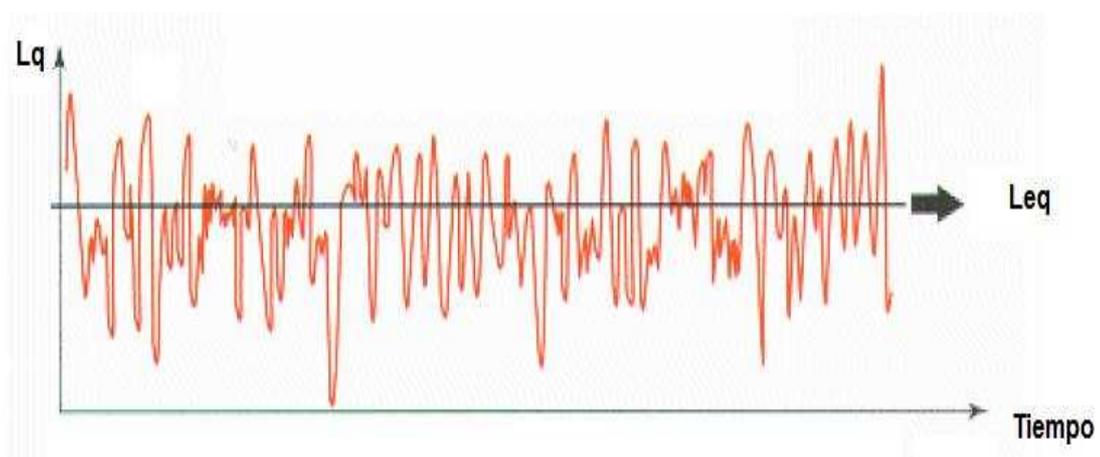
$L_{eq}$  = Nivel de presión sonora continuo equivalente

$T$  = Tiempo de medida necesario para la observación

$P$  = Presión acústica instantánea

$P_{ref}$  = Presión de referencia

**Figura 2-12: Nivel de presión Equivalente.**



FUENTE: (GÓMEZ & NARVAÉZ, 2008)

Es importante destacar lo siguiente:

- El nivel de presión acústica continuo equivalente contiene dos conceptos: un nivel en dB y un tiempo de exposición.
- La gran importancia del nivel de presión acústica continuo equivalente reside en que es el principal parámetro utilizado en la Legislación Ecuatoriana para niveles máximos de ruido según el uso del suelo.

#### 2.1.3.11 Nivel de Intensidad Sonora (NI)

El nivel de intensidad se mide en decibeles y se define con la siguiente expresión:

$$NI = 10 \log \frac{I}{I_{ref}}$$

**(2-28)**

Donde:

$I$  es la intensidad medida en un punto (watt / m<sup>2</sup>)

$I_{ref}$  es la intensidad de referencia (watt / m<sup>2</sup>)

La intensidad de referencia usada comúnmente es de 10<sup>-12</sup> watt/m<sup>2</sup>. En el aire este valor corresponde a la presión de referencia de 20 µPa.

#### 2.1.3.12 Nivel de Potencia Sonora (NW)

El nivel de potencia se mide en decibeles y se define con la siguiente expresión:

$$NW = 10 \log \frac{W}{W_{ref}}$$

**(2-29)**

$$NW = 10 \log W + 120$$

(2-30)

Donde:

$W$  es la potencia medida en un punto (watt)

$W_{ref}$  es la intensidad de referencia (watt)

La potencia de referencia usada comúnmente es de  $10^{-12}$  watts (1picowatt).

$$W_0 = 10^{-12} \text{ wattios (1 picowatt)}$$

Nota: el nivel de potencia sonora calculado con un área de referencia ( $1 \text{ m}^2$ ) es numéricamente igual al nivel de presión sonora.

### 2.1.3.13 Suma de niveles de presión acústica en dB:

Supongamos que tenemos dos fuentes de ruido que en un determinado punto producen un  $NPS_1$  y un  $NPS_2$  en dB cada una.

$$NPS_1 = 10 \log \left( \frac{P_{ef1}}{P_{ref}} \right)^2$$

(2-31)

$$P_{ef1}^2 = P_{ref}^2 10^{NPS_1/10}$$

(2-32)

$$NPS_2 = 10 \log \left( \frac{P_{ef2}}{P_{ref}} \right)^2$$

(2-33)

$$P_{ef2}^2 = P_{ref}^2 10^{NPS_2/10}$$

(2-34)

Para dos ruidos de distintas frecuencias, se cumple que el cuadrado de la presión eficaz total es:

$$PT_{ef}^2 = P_{ef1}^2 + P_{ef2}^2$$

(2-35)

Por lo tanto:

$$PT_{ef}^2 = P_{ref}^2 [10^{NPS_1/10} + 10^{NPS_2/10}]$$

(2-36)

El nivel de presión acústica será:

$$NPS_T = 10 \log \left[ \frac{PT_{ef}}{P_{ref}} \right]^2$$

(2-37)

$$NPS_T = 10 \log [10^{NPS_1/10} + 10^{NPS_2/10}]$$

(2-38)

Si suponemos que tenemos n fuentes de ruido que en un punto producen L1, L2,...; Ln, la suma en dB es:

$$L_{eq}(dB) = 10 \log \sum_{i=1}^{i=n} 10^{\frac{L_i}{10}}$$

(2-39)

Es importante notar que cuando la diferencia entre los niveles en dB de dos ruidos es de 15 dB o superior, la cantidad a sumar al ruido mayor es tan pequeña (<0.4

dB) que en la mayoría de los casos puede despreciarse, por lo que la suma de dos ruidos que difieren en 15 o más dB, en la práctica, es igual al ruido mayor.

La Ecuación (2-39), también es válida para determinar el nivel de presión sonora continuo equivalente ( $L_{eq}$ ) de un sonido, si conocemos la presión acústica en bandas de octava en dB.

**Tabla 2-5: Niveles de presión sonora por banda de octava para un sonido.**

f(Hz)	31.5	63	125	250	500	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
$L_p$ (dB)	89	89	86	78	84	86	90	91	90

FUENTE: (MARÍN, 2001)

$$L_{eq} (dB) = 10 \log \sum_{i=1}^{i=9} 10^{\frac{L_i}{10}} = 97.75 dB$$

#### 2.1.3.14 Resta de dB y ruido de fondo:

Existen situaciones en los que es necesario realizar restas de niveles de ruido como cuando se debe medir el ruido de una máquina en particular en presencia de ruido de fondo. Entonces es importante saber si el ruido medido es debido al ruido de fondo, al ruido de la máquina o a una combinación de ambos. El procedimiento cuando queremos realizar este test es el siguiente:

1. Medir el ruido total existente, el de la máquina más el ruido de fondo ( $L_{S+N}$ )
2. Detener la máquina y medir el ruido de fondo ( $L_N$ )
3. Calcular la diferencia ( $DL = L_{S+N} - L_N$ )

La resta de dB es exactamente igual que la suma pero con los signos cambiados.

$$DL_T = 10 \log \left[ 10^{\frac{L_{S+N}}{10}} - 10^{\frac{L_N}{10}} \right]$$

(2-40)

Si la diferencia es superior a 10 dB, el ruido de fondo puede ser ignorado

#### 2.1.4 ANÁLISIS ESPECTRAL

El sonido es una combinación compleja de muchos tonos semejantes. En muchas situaciones es más importante conocer la frecuencia de los componentes de un sonido que conocer la conducta exacta a lo largo del tiempo, sin embargo determinar una a una las frecuencias sería muy difícil y poco práctico, por eso un método alternativo de describir sonidos y que se usa a menudo es el llamado análisis de frecuencia. Para este propósito se divide el rango de frecuencias audibles (20 Hz a 20.000 Hz), en una serie completa de bandas de frecuencias (bandas de octava). Donde el límite superior de la banda de frecuencia es justamente el doble del límite inferior. Hay también bandas de media y un tercio de octava. (Pecorelli)

En el análisis de frecuencia nos interesa conocer el nivel de presión sonora junto con la distribución de energía acústica en cada grupo de frecuencias que componen el ruido estudiado, para así determinar sus posibles efectos, identificar sus fuentes y proponer estrategias de reducción.

##### 2.1.4.1 Espectro de frecuencia de la onda sonora

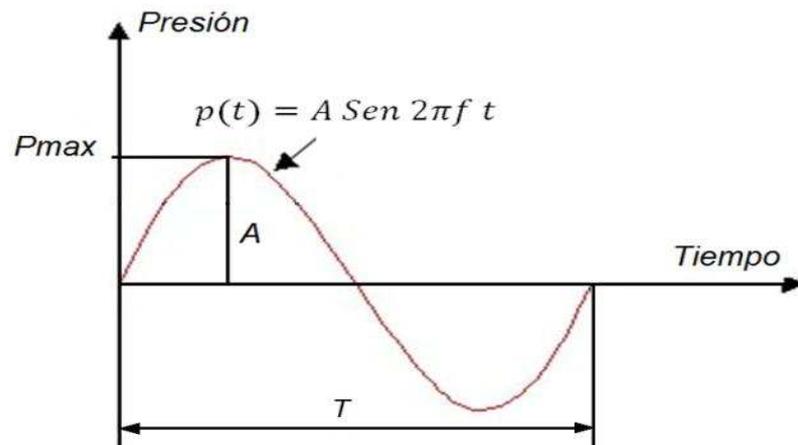
Si analizamos un tono puro expresado por:

$$p(t) = A \text{ Sen } 2\pi ft$$

Podemos realizar una gráfica de la variación de la presión acústica versus el tiempo según se indica en la Figura 2-13.

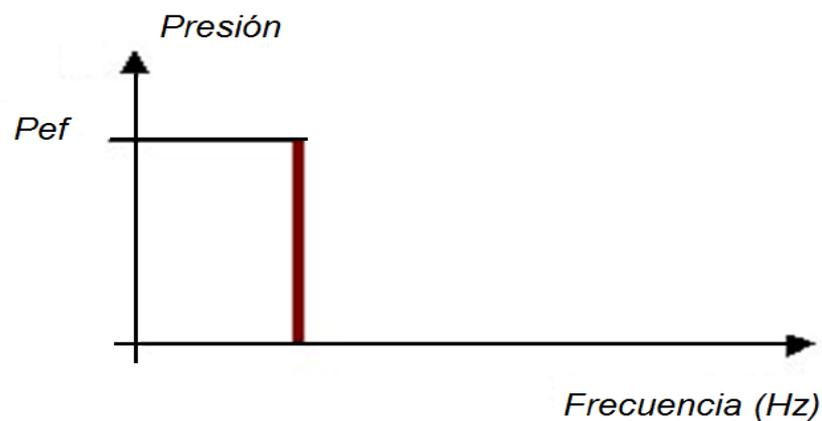
Otra posibilidad es representar una magnitud característica de la onda como la presión Sonora Efectiva ( $P_{ef}$ ) con respecto a la frecuencia Figura 2-14.

**Figura 2-13: Variación de la presión en función del tiempo para un tono puro.**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

**Figura 2-14: Variación de la presión en función de la frecuencia para un tono puro.**

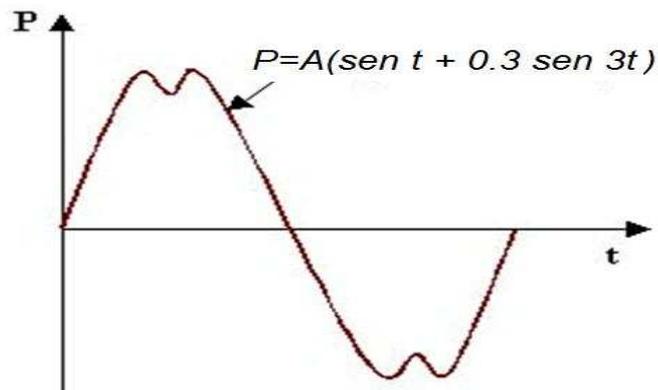


FUENTE: (MARÍN, 2001)

A esta representación se la denomina espectro de frecuencia de la onda sonora y es como se define el espectro de un ruido como la representación de la distribución de energía sonora de dicho ruido en función de la frecuencia.

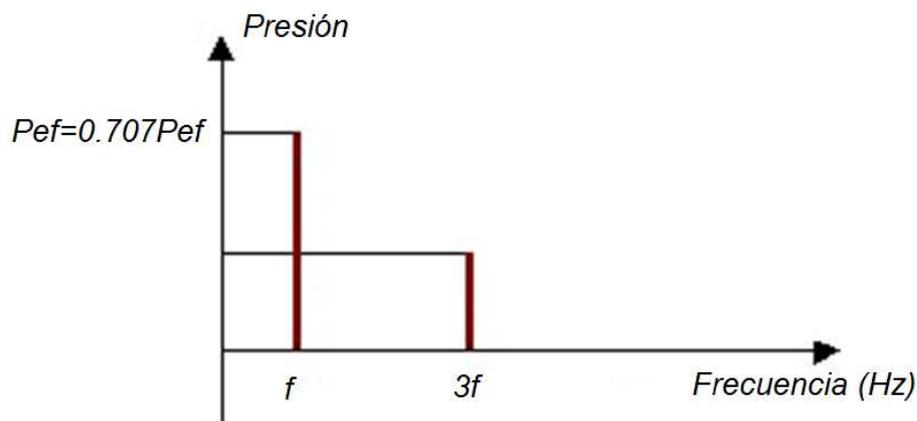
Si tenemos una onda compuesta por la suma de dos tonos simples, su espectro tendría 2 líneas de magnitud proporcional al valor eficaz de cada una de ellas.

**Figura 2-15: Variación de la presión en función del tiempo para la suma de dos tonos simples.**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

**Figura 2-16: Variación de la presión en función de la frecuencia para la suma de dos tonos simples.**

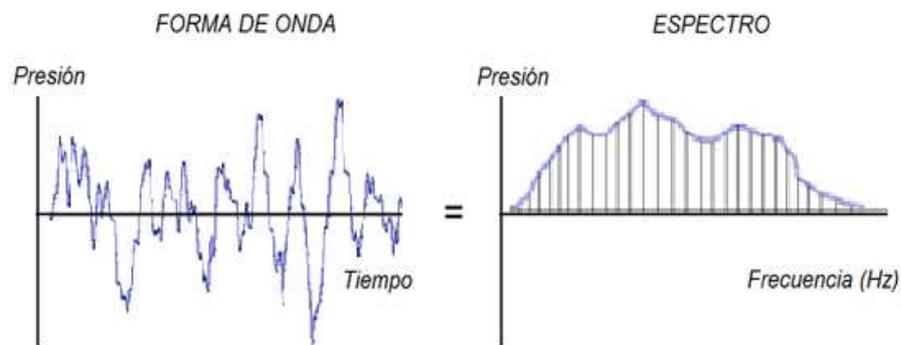


FUENTE: (MARÍN, 2001)

El ruido industrial tiene estructura compleja y está compuesto por frecuencias no definidas. El espectro ya no se muestra como barras aisladas sino una curva que representa la suma de infinitas senoidales de todas las frecuencias. (Ver Figura 2-17)

El interés del análisis en frecuencia radica en que los materiales acústicos, protectores auditivos, entre otros, son más eficaces a unas frecuencias que a otras, así como la respuesta al oído humano, de ahí que se deba conocer el espectro antes de proceder a tomar algún tipo de medida correctora.

**Figura 2-17: Espectro continuo de un ruido.**



FUENTE: (Y10)

#### 2.1.4.2 Tipos de filtros

El nivel de presión sonora es una medida objetiva y bastante cómoda de la intensidad del sonido, pero está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe. Esto se debe a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia. (Entrix Inc, 2008)

Por lo tanto, para analizar ruidos se usan filtros, que eliminan la parte del espectro que no esté comprendida entre las frecuencias que nos interesa medir. Para ello se usan tres tipos principales de filtros, que son los más usados:

- Filtros pasa bajas: dejan pasar las frecuencias que están por debajo de la seleccionada por el filtro.
- Filtros pasa altas: dejan pasar las frecuencias que están por encima de la seleccionada por el filtro.
- Filtros pasa banda: son una combinación de los dos filtros anteriores. Estos eliminan las componentes cuyas frecuencias están por encima y por debajo de los límites o frecuencias de corte de cada filtro. Sólo las frecuencias comprendidas entre ellas pasan. Estos son los más usados. (Marín, 2001)

### 2.1.4.3 Bandas de Octava

Se denomina banda de octava al grupo de frecuencias comprendidas entre dos frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  que cumplen la relación:

$$f_2 = 2f_1 \quad (2-41)$$

#### 2.1.4.3.1 Frecuencia Central

Se denomina frecuencia central de la banda a la media geométrica de las frecuencias extremas:

$$f_c = \sqrt{f_1 * f_2} \quad (2-42)$$

La frecuencia central se utiliza para denominar la banda, es decir, a la banda de octava con frecuencias extremas  $f_1= 707$  Hz y  $f_2= 1.414$  Hz se la denomina banda de octava de 1.000 Hz.

De las dos ecuaciones anteriores se deduce que:

$$f_1 = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \quad (2-43)$$

$$f_2 = f_c \sqrt{2} \quad (2-44)$$

**Tabla 2-6: “Frecuencias centrales de Bandas de Octava”**

$f_1$ (Hz)	20	44	89	177	353	707	1414	2828	5656	11312
$f_c$ (Hz)	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
$f_2$ (Hz)	44	89	177	353	707	1414	2828	5656	11312	22624

FUENTE: (PECORELLI)

Es importante destacar que la banda se va haciendo “más ancha” conforme aumenta la frecuencia (Pecorelli).

Si de un ruido conocemos la presión acústica en bandas de octava, podemos conocer el nivel de presión sonora aplicando la expresión de la suma en dB. Ver Ecuación (2-39). (Marín, 2001)

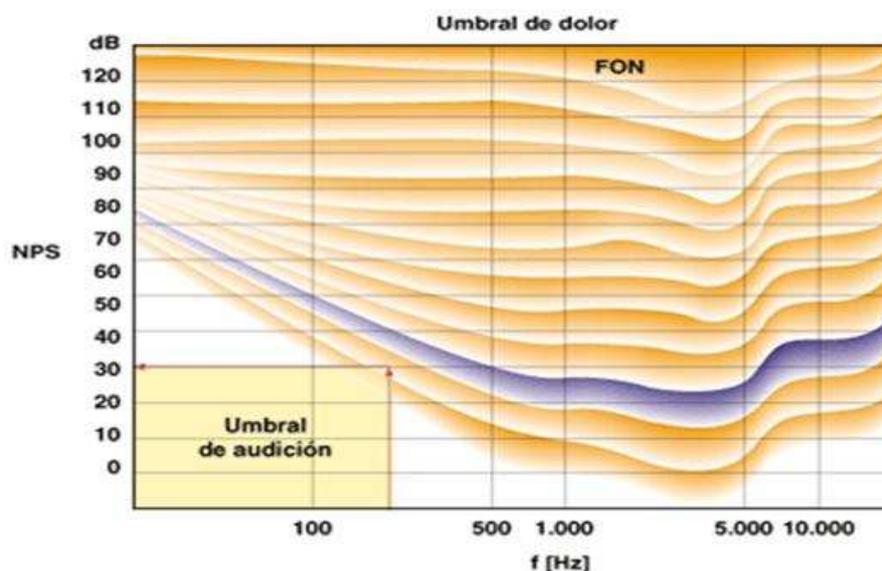
#### 2.1.4.4 Sensación sonora y Escalas de ponderación

Un ruido se percibe con más o menos intensidad por el oído humano, además de las características intrínsecas del aparato auditivo de cada persona, también depende de dos factores físicos principales: el nivel de presión sonora y la frecuencia del ruido.

El **FONIO** es el nombre dado a la unidad de nivel de intensidad de sensación sonora en las personas. (Marín, 2001)

La dependencia de la frecuencia en la sensación de sonoridad fue descubierta y medida por Fletcher y Munson, en 1933, a partir de datos experimentales realizados con grupos de personas (sin alteraciones auditivas), producto de lo cual se construyeron curvas de igual sensación sonora o curvas isosónicas, que reflejan el comportamiento del oído humano.

**Figura 2-18: Curvas de Fletcher y Munson.**



FUENTE: (ARREGUI, 2008)

Están construidas tomando como referencia un sonido a 1000Hz de frecuencia y variando su nivel de presión sonora.(Marín, 2001)

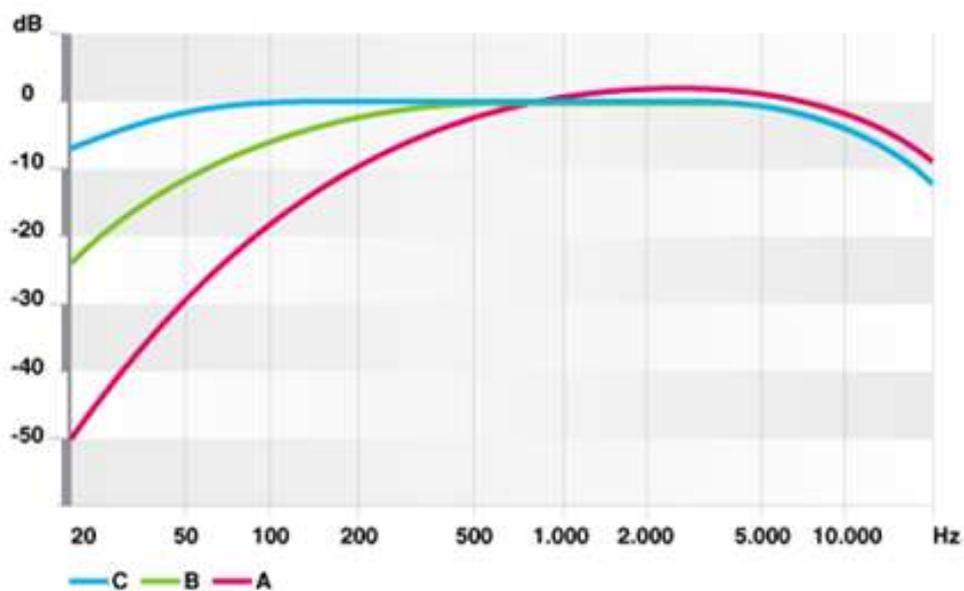
Se puede apreciar que el comportamiento del oído es desigual con el aumento de la presión sonora a las distintas frecuencias. Apreciándose 3 zonas básicas:

- de 20 a 1000 Hz zona de atenuación
- de 1000 a 5000 Hz zona de amplificación
- de 5000 Hz en adelante zona de atenuación

El nivel de presión sonora mínimo a las distintas frecuencias para tener sensación auditiva, es lo que se denomina el umbral de audición. (Marín, 2001)

Sin embargo la dificultad que se presenta en la percepción del sonido por el oído humano, permitió diseñar redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, 70 dB y 100 dB, llamadas A, B y C respectivamente. La red de ponderación A se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a los de nivel elevado.

**Figura 2-19: Curvas de ponderación A, B y C.**



FUENTE: (ARREGUI, 2008)

La escala de ponderación A es la utilizada más frecuentemente, está internacionalmente normalizada y se ajusta su curva de ponderación a la respuesta del oído humano. Los valores de nivel acústico medidos con esta escala se conocen como dB(A) o dBA, y análogamente para las otras. Debido a su buen acuerdo con la respuesta subjetiva, la escala A, es la que se suele utilizar para todos los niveles, siendo relativamente poco frecuente el uso de las escalas B, C, D y E. (Arregui, 2008)

**Tabla 2-7: Escalas de ponderación.**

<i><b>PONDERACIONES DE FRECUENCIA</b></i>	<i><b>CARACTERIZACIÓN</b></i>
<b>A</b>	Es la ponderación más utilizada para la valoración de daño auditivo e inteligibilidad de la palabra. Empleada inicialmente para analizar sonidos de baja intensidad, es hoy, prácticamente, la referencia que utilizan las leyes y reglamentos contra el ruido producido a cualquier nivel. El nivel de presión sonora se expresa en dB(A).
<b>B</b>	Creada para modelar la respuesta del oído humano a intensidades medias. Sin embargo, en la actualidad es muy poco empleada (una gran cantidad de sonómetros ya no la contemplan).
<b>C</b>	En sus orígenes se creó para modelar la respuesta del oído ante sonidos de gran intensidad. En la actualidad, ha ganado prominencia en la evaluación de ruidos en la comunidad, así como en la evaluación de sonidos de baja frecuencia en la banda de frecuencias audibles.
<b>D</b>	Esta red de compensación tiene su utilidad en el análisis del ruido provocado por los aviones.
<b>U</b>	Es una red de ponderación de las más recientes. Se aplica para medir sonidos audibles en presencia de ultrasonidos.

FUENTE: (ARREGUI, 2008)

### **2.1.5 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO**

Las variables meteorológicas influyen en la forma como se propaga la onda sonora a distintas frecuencias. Estas variables tienen mayor influencia a ciertas distancias de propagación, generalmente superiores a 100 metros

La humedad relativa del aire y la temperatura ambiental, tienen mucha influencia en la atenuación por absorción atmosférica en frecuencias altas para grandes distancias de propagación del sonido; debido a la disipación de la energía acústica en las partículas de agua en el ambiente.

“El principal efecto es el de la refracción, el cual es un cambio en la dirección de las ondas sonoras, producidas por gradientes verticales de viento y temperatura” (Gobierno de Chile CONAMA, 2008)

#### **2.1.5.1 Temperatura**

La circulación de aire en el ambiente es influenciado principalmente por la temperatura ambiental; de esta manera cuando la temperatura disminuye, la densidad del aire aumenta, por tanto el flujo de aire se hace más lento. Por el contrario, cuando la temperatura aumenta la densidad del aire disminuye; en consecuencia, el flujo de aire es más liviano.

Las gradientes de temperatura son diferentes para el día y para la noche. Durante el día la temperatura del aire desciende con el aumento de la altura por encima del suelo. Mientras que, durante la noche es al contrario, debido a que el suelo se enfría rápidamente, este fenómeno es denominado como inversión térmica y puede extenderse unos 100 metros o más por encima del suelo durante la noche.

“De esta manera cuando la temperatura del ambiente se eleva, la densidad del aire disminuye y las ondas sonoras se propagan con mayor facilidad. Por otro lado, cuando la temperatura ambiental disminuye, la densidad del aire aumenta y las ondas sonoras se propagan con mayor dificultad”. (Gobierno de Chile CONAMA, 2008)

Esto queda de manifiesto a través de la Ecuación (2-4) para la velocidad del sonido. Donde  $T$  es la temperatura ambiental existente. Se puede observar que a medida que la temperatura ambiente aumenta, también lo hace la velocidad del sonido y viceversa.

#### **2.1.5.2 Inversión térmica**

La inversión térmica fundamentalmente es el aumento de la temperatura con la variación de la altitud. Comúnmente en la tropósfera (la capa de la atmósfera que está en contacto con la superficie de la Tierra.) la temperatura desciende con la altura a razón de  $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  es decir,  $1^{\circ}\text{C}$  por cada 155 metros de altitud aproximadamente. Cuando hay inversión térmica se comporta como una tapa que detiene los flujos ascendentes de aire en la atmósfera. En efecto, el aire no puede elevarse en una zona de inversión, puesto que es más frío y, por tanto, más denso en la zona inferior.

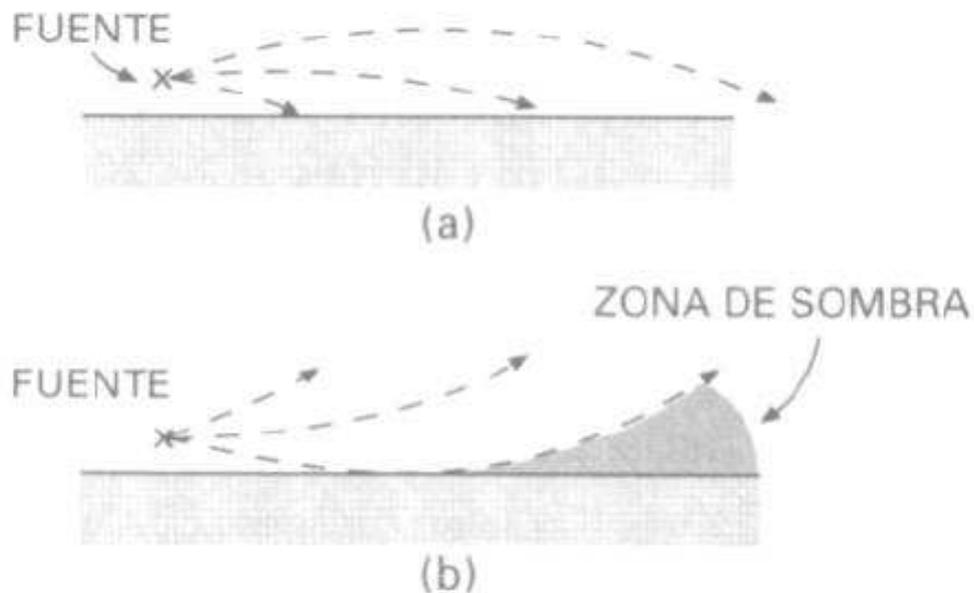
Este fenómeno se produce principalmente en las noches, cuando el suelo se enfría rápidamente. El suelo a su vez enfría el aire en contacto, volviéndose más frío y pesado que el que está en la capa inmediatamente superior. Es por esta razón que en inversión térmica estas dos capas de aire no se suelen mezclar. (Gobierno de Chile CONAMA, 2008)

Las inversiones térmicas también son frecuentes en las mañanas frías sobre los valles de escasa circulación de aire. Además se presenta en las cuencas cercanas a las laderas de las montañas en noches frías debido a que el aire frío de las laderas desplaza al aire caliente de la cuenca provocando el gradiente positivo de temperatura.

Normalmente, una inversión térmica se rompe (termina) cuando se calienta el aire que está en contacto con el suelo, así se restablece la circulación normal en la tropósfera. Esto puede ser cuestión de horas, pero en condiciones meteorológicas desfavorables la inversión puede persistir durante días.

El efecto de una inversión térmica en la propagación del sonido se puede observar en la Figura 2-20

**Figura 2-20: Esquema de la trayectoria de propagación del sonido.**



FUENTE: (GOBIERNO DE CHILE CONAMA, 2008)

a) En presencia de viento descendente o inversión térmica:

El sonido se refracta hacia abajo cuando el movimiento del viento es descendente o cuando existe inversión térmica la cual forma una especie de barrera. (Ver Figura 2-20 a)

Estas condiciones de refracción hacia abajo son favorables a la propagación del sonido, produciéndose atenuaciones mínimas debido a distintos factores, como la vegetación por ejemplo.

b) En presencia de vientos ascendentes o gradientes de temperatura;

El sonido se refracta hacia arriba cuando la propagación del viento es ascendente o cuando existen condiciones de gradientes de temperatura, como se muestra en la Figura 2-20 (b).

La refracción hacia arriba del sonido suele producir una zona de sombra cerca del suelo en la cual el sonido directo desde la fuente no puede penetrar, dando como resultado una atenuación adicional que alcanza 20 dB o más.

### 2.1.5.3 Viento

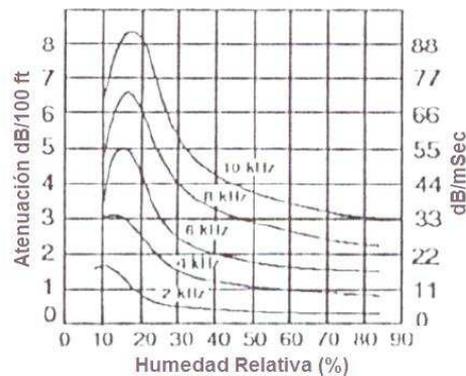
El viento es una de las principales variables atmosféricas que afecta al sonido. Influye directamente en la propagación de éste alterando el ángulo de incidencia desde la fuente hacia el receptor.

La velocidad con la que se propaga el sonido será distinta dependiendo de la velocidad del viento, esta generalmente tiene un perfil logarítmico con la altura que contribuye a modificar la velocidad del sonido en esa dirección. Por otra parte la dirección del viento modifica la velocidad del sonido en los planos horizontales de propagación. Todo esto hace que cambie la rapidez con la que se propaga el sonido y la dirección de propagación lo que origina la curvatura de las ondas sonoras, ya sea con vientos ascendentes o descendentes, como se muestra en la Figura 2-20

### 2.1.5.4 Humedad

La propagación del sonido es afectada por la humedad relativa existente en el aire. Si existe poca humedad, el aire seco absorbe una cantidad mayor de energía acústica que el aire húmedo. Esto sucede debido a que el aire húmedo es más liviano que el aire seco (el vapor de agua pesa menos que el aire). Es por esto que a mayor humedad existe una menor atenuación de ruido. Esto se puede observar en la Figura 2-21. (Gobierno de Chile CONAMA, 2008)

**Figura 2-21: Absorción del sonido en el aire versus humedad ambiental.**



FUENTE: (GOBIERNO DE CHILE CONAMA, 2008)

### 2.1.6 CAMPO LIBRE Y CAMPO DIFUSO

En los procesos de emisión, propagación y recepción del sonido, el tipo de campo acústico en el que ocurren tiene una gran influencia.

Por tanto en acústica, se definen dos tipos de campos:

- Campo acústico libre
- Campo acústico difuso.

Al analizar la definición de intensidad acústica ( $I=W/4\pi r^2$ ) y suponiendo que el sonido radiado por la fuente omnidireccional no es obstaculizado por ningún objeto, se observa que la intensidad varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia. En este caso, se habla de propagación en **campo libre**, como ocurre en un gran espacio abierto, libre de superficies reflectantes.

Las condiciones de campo libre se consiguen en laboratorios al interior de una cámara anecoica, en la que sus paredes están recubiertas de materiales altamente absorbentes a la energía acústica con el objeto de evitar cualquier reflexión. Generalmente se utiliza cuñas de lana mineral o fibra de vidrio.

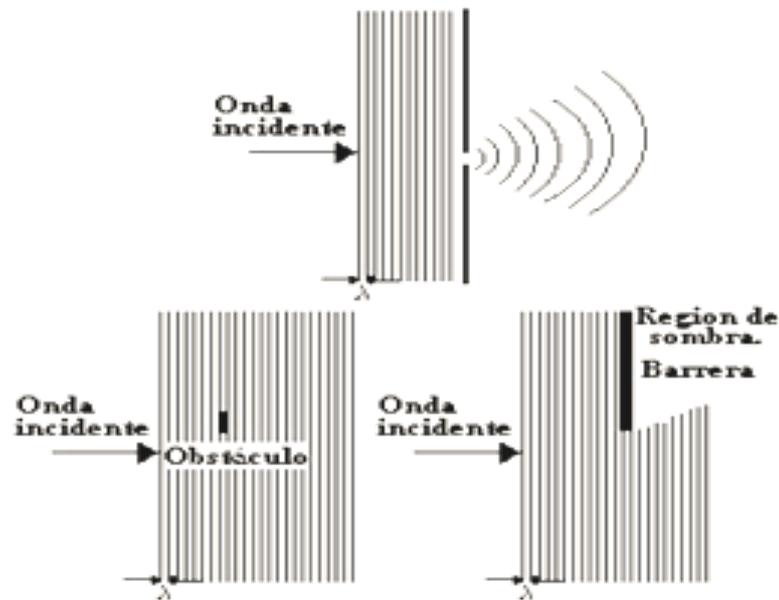
Por el contrario si la onda acústica encuentra obstáculos en su trayectoria de propagación, aparecen los fenómenos de difracción y reflexión.

#### 2.1.6.1 Difracción

Este fenómeno consiste en la capacidad de una onda en rodear un obstáculo o propagarse a través de una pequeña abertura. Su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura. Si una abertura (obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura (obstáculo) es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura.

Las longitudes de onda del sonido audible están entre 3 cm y 12 m, y son habitualmente grandes comparadas con los obstáculos y aberturas (por ejemplo puertas o ventanas), por lo que la desviación de las ondas rodeando las esquinas es un fenómeno común.

**Figura 2-22: Representación del fenómeno de difracción.**

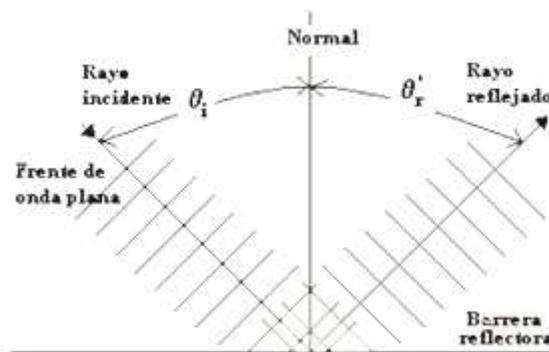


FUENTE: (MARÍN, 2001)

### 2.1.6.2 Reflexión

La reflexión es el cambio de dirección de una onda incidente que ocurre en la superficie de un obstáculo. Las reflexiones son consideradas como fuentes imaginarias ya que las fachadas de la infraestructura actúa como espejos, en las cuales las ondas sonoras son reflejada con un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia, para longitudes de onda mayores que las dimensiones de la textura en la fachada (ver Figura 2-23). Se puede caracterizar con un coeficiente de absorción  $\alpha_a = 0.1$  a la infraestructura industrial, aunque generalmente se aproxima a cero, es decir, toda la energía es reflejada. La fuente imagen creada especularmente es simétrica respecto de la fuente primaria, y es incluida como fuente adicional para los propósitos de cálculo de niveles de ruido. (Cancino, 2002)

**Figura 2-23: Reflexión de ondas sonoras.**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

La contribución de las reflexiones con objetos grandes en comparación con la longitud de onda, se manifiesta por incrementos o atenuaciones de la intensidad sonora por encima o por debajo del nivel que existiría, si no hubiera el obstáculo.

Por tanto, se define como **campo difuso**, al campo acústico en el que un gran número de ondas reflejadas, provenientes de todas direcciones, se combinan de forma que la densidad media de energía es uniforme en cualquier punto de dicho campo. Una aproximación de este tipo de campo se obtiene en gran escala, en las llamadas cámaras reverberantes. (Marín, 2001)

### 2.1.6.3 Reverberación

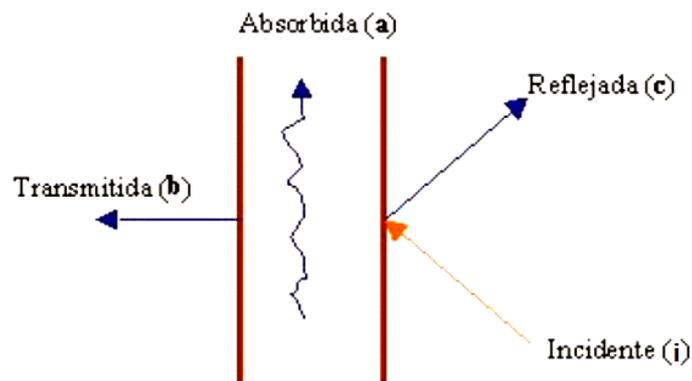
Es el fenómeno acústico de reflexión que se produce en un recinto cuando un frente de onda o campo directo incide contra las paredes, suelo y techo del mismo. El conjunto de dichas reflexiones constituye lo que se denomina campo reverberante. Se entiende como reverberación la persistencia del sonido tras la extinción de la fuente sonora debido a las múltiples ondas reflejadas que continúan llegando al oído.

El parámetro que permite cuantificar el grado de reverberación es el llamado tiempo de reverberación, que es el número de segundos requeridos para que el nivel de presión sonora disminuya 60 dB después de que la fuente ha cesado de emitir. Es este un parámetro de gran importancia para el estudio de acústica de locales.

#### 2.1.6.4 Transmisión del sonido:

Cuando una onda sonora, alcanza una pared (onda incidente) reparte toda su energía en tres formas: absorbida, reflejada y transmitida, tal como se indica en la Figura 2-24.

**Figura 2-24: Distribución de la energía de una onda incidente en un obstáculo**



FUENTE: (MARÍN, 2001)

Estas relaciones se miden usando los coeficientes de transmisión ( $\alpha_t$ ) y de absorción ( $\alpha_a$ ).

$$\alpha_t = \frac{b}{i} \tag{2-45}$$

$$\alpha_a = \frac{a+b}{i} \tag{2-46}$$

Tanto el coeficiente de transmisión como el coeficiente de absorción dependen de las siguientes características:

- Material de la pared y tipo de construcción
- Frecuencia de la onda

- Ángulo de incidencia

### 2.1.7 TEORÍA DE BARRERAS

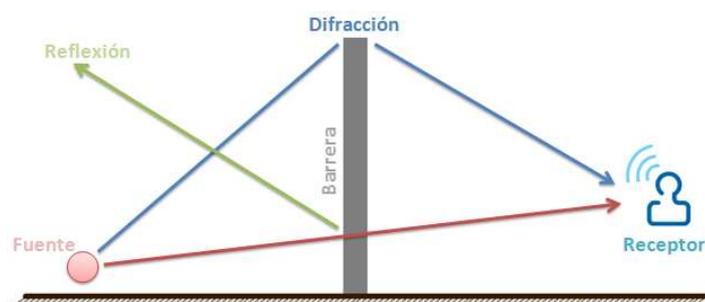
Una barrera acústica es cualquier objeto, de tamaño considerable respecto a la longitud de onda, que obstaculiza la trayectoria recta de la propagación sonora entre una fuente acústica y un receptor, como podría ser incluso el mismo relieve del terreno cuando está lo suficientemente elevado como para interrumpir la propagación sonora.

Los fenómenos que se producen al interceptar la trayectoria de las ondas acústicas con la inserción de una barrera son:

- Parte de la energía de la onda acústica se refleja en la superficie de la barrera.
- Parte de la energía no reflejada se transforma en calor al ser absorbida por la barrera.
- Parte de la energía no reflejada se transmite a través de la barrera.
- Parte de la energía se difracta por los bordes superiores y laterales.

Se debe considerar que la transmisión de la onda acústica a través de la barrera sea despreciable comparado con la difracción por los bordes.

**Figura 2-25: Trayectorias de una onda acústica ante un obstáculo vertical.**



REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

## 2.2 NORMATIVA RESPECTO A RUIDO

El marco legal ambiental que regula la generación de ruido se sustenta en toda la normativa nacional aplicable, tal como se describe a lo largo del presente título.

**Tabla 2-8: Normativa ecuatoriana referente a ruido**

<b>CUERPO JURÍDICO</b>	<b>CONTENIDO REFERENTE A RUIDO</b>
<p>La Constitución de la República del Ecuador, publicada en el Registro Oficial No.449 del 20 de octubre de 2008.</p>	<p>Art. 14.-, Sección Segunda, reconoce el: <i>“Derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado que garantice la sostenibilidad y el buen vivir. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados”</i>.</p>
<p>Ley de Gestión Ambiental codificación 19, registro oficial suplemento 418 de 10 de septiembre del 2004</p>	<p>Art 9.-, literal j: El Ministerio del Ambiente coordinará con los organismos competentes y sistemas de control para la verificación del cumplimiento de las normas de calidad ambiental referentes al aire, agua, suelo, ruido, desechos y agentes contaminantes;</p> <p>Art. 23.-, literal b: <i>“En la evaluación del impacto ambiental se incluirá condiciones de tranquilidad públicas, tales como: ruido, vibraciones, olores, emisiones luminosas, cambios térmicos y cualquier otro perjuicio ambiental derivado de su ejecución”</i></p>
<p>El Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) publicado en el Registro Oficial No.E2 de 31 de marzo de 2008</p>	<p>Libro VI Título IV Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental Artículo 42</p> <p>Objetivos específicos literal a: <i>“Determinar, a nivel nacional, los límites permisibles para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado; emisiones al aire incluyendo ruido, vibraciones y otras formas de energía; vertidos, aplicación o disposición de líquidos, sólidos o combinación, en el suelo”</i>.</p>

## CUERPO JURÍDICO

## CONTENIDO REFERENTE A RUIDO

El Libro VI, Anexo 5, 4. Requisitos, 4.1 límites máximos permisibles de niveles de ruido ambiental para fuentes fijas, 4.1.1 Niveles máximos de ruido, numeral 4.1.1.1; Los niveles de presión sonora equivalente,  $L_{eq}$ , expresados en decibeles, en ponderación con escala A, que se obtengan de la emisión de una fuente fija emisora de ruido, no podrán exceder los valores que se fijan en la Tabla 1.

Tabla 1: Niveles máximos de ruido permisible según uso del suelo

TIPO DE ZONA SEGÚN USO  DE SUELO	NIVEL DE PRESIÓN SONORA EQUIVALENTE $L_{eq}$ [dB(A)]	
	DE 06H00 A 20H00	DE 20H00 A 06H00
Zona hospitalaria y educativa	45	35
Zona Residencial	50	40
Zona Residencial mixta	55	45
Zona Comercial	60	50
Zona Comercial mixta	65	55
Zona Industrial	70	65

El numeral 4.1.1.4, indica que “En las áreas rurales, los niveles de presión sonora corregidos, que se obtengan de una fuente fija, medidos en el lugar donde se encuentre el receptor, no deberán superar al nivel ruido de fondo en diez decibeles A [10 dB(A)]”.

Ley Orgánica de Salud. Registro Oficial Suplemento 423, de 22 de Diciembre del 2006.

Art. 7.- Toda persona, sin discriminación por motivo alguno, tiene en relación a la salud, los siguientes derechos: c) Vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado y libre de contaminación;

<b>CUERPO JURÍDICO</b>	<b>CONTENIDO REFERENTE A RUIDO</b>
	<p>Art. 113.- Toda actividad laboral, productiva, industrial, comercial, recreativa y de diversión; así como las viviendas y otras instalaciones y medios de transporte, deben cumplir con lo dispuesto en las respectivas normas y reglamentos sobre prevención y control, a fin de evitar la contaminación por ruido, que afecte a la salud humana.</p> <p>Art. 117.- La autoridad sanitaria nacional, en coordinación con el Ministerio de Trabajo y Empleo y el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social, establecerá las normas de salud y seguridad en el trabajo para proteger la salud de los trabajadores.</p> <p>Art. 118.- Los empleadores protegerán la salud de sus trabajadores, dotándoles de información suficiente, equipos de protección, vestimenta apropiada, ambientes seguros de trabajo, a fin de prevenir, disminuir o eliminar los riesgos, accidentes y aparición de enfermedades laborales.</p>
<p>Reglamento de Prevención de la Contaminación Ambiental por Ruido. A.M. No. 7789. RO/ 560 de 12 de Noviembre de 1990.</p>	<p>Art. 7.- Los ruidos y vibraciones producidas por máquinas, equipos o herramientas industriales se evitarán o reducirán: En primer lugar en su generación, en segundo término en su emisión y finalmente en su propagación en los locales de trabajo.</p> <p>Art. 17.- Para efectos de prevenir y controlar la contaminación ambiental por ruido proveniente de otras fuentes fijas, tales como talleres, fábricas, comercios, etc., no se deberán producir ruidos que excedan los niveles y horarios establecidos en el Manual Operativo.</p> <p>Art. 20.- Los procesos industriales y máquinas que produzcan ruido sobre los 85 dB (A) en el ambiente de los talleres, deberán ser aislados adecuadamente y se protegerán paredes y suelos con materiales no conductores de sonido. Las máquinas se instalarán sobre plataformas aisladas y mecanismos de disminución de la vibración, reduciendo la exposición al menor número de trabajadores y durante el tiempo indispensable.</p>

<b>CUERPO JURÍDICO</b>	<b>CONTENIDO REFERENTE A RUIDO</b>																
	<p>Art. 21.- Es responsabilidad del empresario o dueño de la industria aplicar las medidas técnicas, administrativas y normativas recomendadas por los organismos competentes a fin de controlar el ruido.</p>																
<p>Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas D. E. 1215</p>	<p>Art. 22. - Límites de ruido. - Los límites permisibles para emisión de ruidos estarán sujetos a lo dispuesto en la siguiente Tabla:</p> <table border="1" data-bbox="624 741 1401 1346"> <thead> <tr> <th data-bbox="624 741 997 817">Duración diaria por horas</th> <th data-bbox="997 741 1401 817">Nivel de ruido (dBA)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="624 817 997 896">16</td> <td data-bbox="997 817 1401 896">80</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 896 997 972">8</td> <td data-bbox="997 896 1401 972">85</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 972 997 1048">4</td> <td data-bbox="997 972 1401 1048">90</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 1048 997 1124">2</td> <td data-bbox="997 1048 1401 1124">95</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 1124 997 1200">1</td> <td data-bbox="997 1124 1401 1200">100</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 1200 997 1276">1/2</td> <td data-bbox="997 1200 1401 1276">105</td> </tr> <tr> <td data-bbox="624 1276 997 1346">1/4</td> <td data-bbox="997 1276 1401 1346">110</td> </tr> </tbody> </table>	Duración diaria por horas	Nivel de ruido (dBA)	16	80	8	85	4	90	2	95	1	100	1/2	105	1/4	110
Duración diaria por horas	Nivel de ruido (dBA)																
16	80																
8	85																
4	90																
2	95																
1	100																
1/2	105																
1/4	110																
<p>Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas R.O. No. 396 de 23 de agosto de 2001</p>	<p>Art.- 15 Límites permisibles y otros parámetros, literal b), señala que: "Los niveles de exposición y emisión de ruido no superarán los límites previstos en el Reglamento para la prevención y control de la contaminación ambiental por la emisión de ruidos, publicado en el Registro Oficial 560 de 12 de noviembre de 1990</p>																
<p>Ordenanza Metropolitana: 0213 Distrito Metropolitano de Quito</p>	<p>Art. 11. 361.- Los responsables de las fuentes emisoras de ruido deberán proporcionar a las autoridades competentes la información que se les requiera, respecto a la emisión de ruido contaminante.</p>																

## **2.3 NORMAS ISO 9613**

### **2.3.1 NORMA ISO 9613-1 DE 1993: ATENUACIÓN DEL RUIDO EN SU PROPAGACIÓN EN EL AIRE**

Esta norma, especifica un método analítico de cálculo de la atenuación del sonido como resultado de la absorción atmosférica en una variedad de condiciones meteorológicas cuando el sonido se propaga a través del aire.

Para tonos puros, la atenuación debido a la absorción atmosférica se especifica en términos de un coeficiente de atenuación como una función de cuatro variables:

- Frecuencia de 50 Hz a 10 kHz
- Temperatura de - 20 °C a + 50 °C
- Humedad relativa del 10% al 100%, y
- Presión atmosférica de 101,325 kPa (una atmósfera).

Para los sonidos analizados por los filtros de octava (por ejemplo, filtros de banda de un tercio de octava), un método que se especifica en el cálculo de la atenuación por la absorción atmosférica, esta especificado en función de la frecuencia media de cada bandas.

La ISO 9613-1:1993 se aplica para una atmósfera en condiciones meteorológicas uniformes. Pero también se la puede utilizar para determinar los ajustes que deben aplicarse en la medición de los niveles de presión sonora en diferentes condiciones meteorológicas.

Esta norma se aplica a un ambiente desprovisto de niebla significativa o con contaminantes atmosféricos.

#### **2.3.1.1 Condiciones atmosféricas de referencia**

##### ***2.3.1.1.1 Composición***

La absorción atmosférica es muy sensible a la composición del aire, en particular a la concentración de vapor de agua. Para aire seco y sin contaminantes a nivel

del mar, la concentración molar estándar de los tres principales componentes, nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono son: 0.78084; 0.209476 y 0.000314, respectivamente (tomado de la norma ISO 2533).

Para aire seco, otros gases de menor importancia constituyen trazas, que no tienen una influencia significativa en la absorción de la atmósfera, y forman la fracción restante de 0.00937. Para los cálculos de la absorción atmosférica, las concentraciones molares estándar de los tres principales componentes de aire seco pueden ser supuestas hasta por lo menos 50 km por encima del nivel del mar. Sin embargo, la concentración molar de vapor de agua, que tiene una gran influencia sobre la absorción atmosférica, varía ampliamente cerca del suelo y por más de dos órdenes de magnitud a nivel del mar hasta 10 km.

#### ***2.3.1.1.2 La presión atmosférica y temperatura***

Para los efectos de esta parte de la norma ISO 9613, la presión atmosférica ambiental de referencia,  $P_r$  es la presión atmósfera estándar internacional a nivel medio del mar, es decir, 101,325 kPa.

La temperatura referencial del aire, en grados Kelvin,  $T_0$ , es 293,15 °K (20 °C), es decir, la temperatura a la que se obtuvieron la mayoría de los datos confiables para apoyar esta parte de la norma ISO 9613. (International Standard ISO 9613 part 1, 1993)

### **2.3.2 NORMA ISO 9613-2 DE 1996: ATENUACIÓN DEL SONIDO DURANTE SU PROPAGACIÓN AL AIRE LIBRE. PARTE 2: MÉTODO GENERAL DE CÁLCULO**

Esta parte de la ISO 9613 establece un método de ingeniería para el cálculo de la atenuación del sonido durante su propagación al aire libre, con el fin de predecir el nivel de ruido, a una distancia determinada de un conjunto de fuentes. El método predice el nivel de presión sonora continuo equivalente en ponderación "A" en

*condiciones meteorológicas favorables a la propagación del sonido*<sup>5</sup> desde las fuentes de emisión hasta el receptor.

El método especificado se concreta en los algoritmos de banda de octava (con frecuencias centrales desde los 63 Hz hasta los 8 kHz) para el cálculo de la atenuación del sonido que se origina en una fuente de sonido puntual, o un conjunto de fuentes puntuales. La fuente (o fuentes) puede estar en movimiento o inmóvil. Los términos proporcionados en los algoritmos se especifican para los siguientes aspectos físicos:

- Divergencia geométrica.
- Absorción atmosférica.
- Efecto de suelo.
- Reflexión de las superficies.
- Detección por obstáculos.

Este método es usado en la práctica para una gran variedad de fuentes de ruido y ambientes. Se aplica, directa o indirectamente, a muchas situaciones relativas al tráfico por carretera o ferrocarril, fuentes industriales, actividades de construcción, y muchas otras fuentes de ruido a nivel del suelo.

Para aplicar el método de la norma ISO 9613-2: 1996, varios parámetros deben ser conocidos como; la geometría de la fuente y del ambiente, la superficie característica del suelo, y la energía de la fuente en términos del nivel de potencia sonora en bandas de octava en las direcciones de la propagación.

---

<sup>5</sup> Las condiciones favorables para la propagación del ruido son; dirección del viento con un ángulo de 45° entre el centro de la fuente sonora y el receptor, además la velocidad del viento está entre 1 y 5 m/s, tomada a una altura de 3 a 11 metros desde el suelo.

### 2.3.2.1 Descripción de la fuente

Un grupo de fuentes puntuales pueden ser asumidas como un punto equivalente, situado en el centro del grupo, siempre y cuando cumplan con las siguientes condiciones:

- a) Las fuentes tienen (aproximadamente) la misma potencia sonora y altura sobre el plano del suelo local,
- b) Existen las mismas condiciones de propagación desde la fuente del ruido hasta el receptor
- c) La distancia ( $d$ ) desde un punto equivalente en las fuentes de ruido hasta el receptor exceda el doble de la mayor dimensión de las fuentes ( $H_{max}$ ) ( $d > 2 H_{max}$ )

Si la distancia  $d$  es menor ( $d < 2 H_{max}$ ), o si las condiciones de propagación son diferentes por los componentes de las fuentes, la fuente de sonido total se dividirá en sus componentes.

## 2.4 MODELO MATEMÁTICO DE ATENUACIÓN EN MEDIO ATMOSFÉRICO

### 2.4.1 MODELO MATEMÁTICO DE ATENUACIÓN DEL RUIDO EN SU PROPAGACIÓN EN EL AIRE - NORMA ISO 9613-1:1993

La norma ISO 9613-1:1993 Especifica un método analítico de cálculo de la atenuación del sonido como resultado de la absorción atmosférica en una variedad de condiciones meteorológicas cuando el sonido se propaga a través del aire

#### 2.4.1.1 Expresión Básica para la atenuación.

Un sonido de tonos puros se propaga a través de la atmósfera a una distancia  $S$ , donde la amplitud de presión del sonido  $P_t$  disminuye exponencialmente como resultado de los efectos de la absorción atmosférica desde su valor inicial de  $P_i$ ,

de conformidad con la fórmula de atenuación de ondas planas de sonido en el espacio libre

$$P_t = P_i \exp(-0.1151\alpha S)$$

(2-47)

NOTA: La constante 0.1151 es igual a  $\frac{1}{10 \log(e^2)}$

#### 2.4.1.1.1 *Atenuación de los niveles de presión sonora*

La atenuación debido a la absorción atmosférica  $\delta L_t(f)$  en decibelios, del nivel de presión sonora de un tono puro con una frecuencia  $f$ , desde el nivel inicial ( $S=0$ ) y el nivel a una distancia  $S$ , viene dada por:

$$\delta L_t(f) = 10 \log \left( \frac{P_i^2}{P_t^2} \right) dB = \alpha S$$

(2-48)

#### 2.4.1.2 **Procedimiento de cálculo del coeficiente de atenuación de tonos puros**

##### 2.4.1.2.1 *Variables*

Las variables acústicas y atmosféricas son: la frecuencia del sonido, la temperatura atmosférica ambiental, la concentración molar de vapor de agua y la presión atmosférica ambiente.

NOTA: El rango de la concentración molar del vapor de agua es de 0,2% a 2% para condiciones meteorológicas comúnmente encontradas a altitudes cercanas al nivel del mar, pero disminuyen muy por debajo de 0,01% en altitudes superiores a 10 km.

##### 2.4.1.2.2 *Fórmulas*

La atenuación debido a la absorción atmosférica es una función de dos frecuencias de relajación,  $fr_O$  y  $fr_N$ , frecuencias de relajación del oxígeno y del

nitrógeno, respectivamente. Los valores de  $fr_o$  y  $fr_N$ , en hercios, se calculará a partir de:

$$fr_o = \frac{P_a}{P_r} \left( 24 + 4.04 \times 10^4 h' \frac{0.02 + h'}{0.391 + h'} \right) \quad (2-49)$$

$$fr_N = \frac{P_a}{P_r} \left( \frac{T}{T_o} \right)^{-1/2} \left\{ 9 + 280h \exp \left[ -4.170 \left( \frac{T}{T_o} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\} \quad (2-50)$$

El coeficiente de atenuación por absorción atmosférica  $\alpha$ , en decibelios por metro se calcula a partir de:

$$\alpha = 8.686 f^2 \left\langle \left[ 1.84 \times 10^{-11} \left( \frac{P_a}{P_r} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_o} \right)^{1/2} \right] + \left( \frac{T}{T_o} \right)^{-5/2} \times \left\{ \begin{array}{l} 0.01275 \left[ \exp \left( \frac{-2239.1}{T} \right) \right] \left[ fr_o + \left( \frac{f^2}{fr_o} \right) \right]^{-1} \\ + 0.1068 \left[ \exp \left( \frac{-3352.0}{T} \right) \right] \left[ fr_N + \left( \frac{f^2}{fr_N} \right) \right]^{-1} \end{array} \right\} \right\rangle \quad (2-51)$$

En la Ecuación (2-49), Ecuación (2-50) y Ecuación (2-51), se utiliza  $P_r = 101,325$  kPa y  $T_o = 293,15$  K

### 2.4.1.3 Descripción general del problema y los métodos de cálculo

Se han considerado los efectos de la absorción atmosférica del nivel de presión sonora de un tono puro durante la propagación a través de la atmósfera. En la práctica, sin embargo, el espectro de la mayoría de los sonidos cubre un rango de frecuencias muy amplio, y el análisis espectral se realiza normalmente por medio de filtros de fracción de bandas de octava, que indican los niveles de presión sonora por cada banda.

Cuando la presión sonora es analizada por filtros de fracción de bandas de octava, el cálculo de la atenuación por absorción atmosférica se complica, debido a errores en la medición de los niveles de presión sonora en la banda.

Estos errores ocurren porque la potencia equivalente que pasa por el filtro, es mayor o menor, que la potencia equivalente que pasaría teóricamente por un filtro ideal. La medición del nivel de presión sonora en la ubicación del receptor, es especialmente vulnerable a errores en altas frecuencias; porque normalmente la atenuación por absorción atmosférica aumenta rápidamente con el incremento de la frecuencia,

#### **2.4.2 NORMA ISO 9613-2 DE 1996: ATENUACIÓN DEL SONIDO DURANTE SU PROPAGACIÓN AL AIRE LIBRE. PARTE 2: MÉTODO GENERAL DE CÁLCULO**

##### **2.4.2.1 Ámbito de aplicación**

Esta parte de la norma especifica el método de cálculo de los efectos de la atenuación del ruido de una variedad de fuentes, durante su propagación en el aire libre; con el fin de predecir el nivel de ruido a una distancia  $S$  de las fuentes.

##### **2.4.2.2 Ecuaciones básicas**

La metodología de predicción se resume a partir de la ecuación básica de propagación, la cual estima el nivel de presión sonora continuo equivalente en bandas de octava a favor del viento en la posición del receptor,  $L_{eq}(DW)$ , para una fuente puntual.

$$L_{eq}(DW) = NW + D_C - A$$

**(2-52)**

Donde:

- $NW$ , es el nivel de potencia sonora por banda de octava, en decibeles, producida por una fuente puntual relativa a una potencia sonora de referencia de 1 picowatt (1 pW);
- $D_c$ , es la corrección por directividad, en decibeles, y se refiere a la desviación del nivel de potencia con respecto a una fuente omnidireccional (toma el valor 0 para una fuente omnidireccional en campo libre).
- $A$ , es la atenuación por banda de octava, en decibeles, que se produce durante la propagación desde la fuente del sonido hasta el receptor.

La atenuación por banda de octava  $A$  esta dado por la siguiente ecuación:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc}$$

**(2-53)**

Donde:

$A_{div}$ , es la atenuación debido a la divergencia geométrica;

$A_{atm}$ , es la atenuación debido a la absorción atmosférica;

$A_{gr}$ , es la atenuación debido al efecto de suelo;

$A_{bar}$ , es la atenuación debido a una barrera;

$A_{misc}$ , es la atenuación debido a varios otros efectos misceláneos.

El nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación  $A$  será obtenido por la sumatoria de las contribuciones del promedio temporal cuadrático de las presiones sonoras calculadas de acuerdo con la Ecuación (2-52), para cada fuente sonora y para cada banda de octava, como es especificado en la Ecuación (2-54)

$$L_{eq}(DW) = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^8 10^{0.1[L_{eq}(ij) + A_f(j)]} \right] \right\}$$

(2-54)

Donde:

$n$ , es el número de contribuyentes (fuentes y caminos);

$j$ , es el índice que indica las ocho frecuencias centrales de las bandas de octava estandarizadas, que van desde los 63 Hz hasta los 8 kHz;

$A_f$ , denota la ponderación "A" estándar.

El nivel de presión sonora con ponderación "A" promediado a largo plazo  $L_{eq}(LT)$  se calculará de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L_{eq}(LT) = L_{eq}(DW) - C_{met}$$

(2-55)

Donde:  $C_{met}$ , es la corrección meteorológica.

El cálculo y el significado de los distintos términos en las ecuaciones (2-52), (2-53), (2-54) y (2-55) se explican a continuación:

### 2.4.2.3 Cálculo de los términos de atenuación

#### 2.4.2.3.1 Divergencia geométrica ( $A_{div}$ )

Corresponde a la propagación de un frente de onda esférico en campo libre desde una fuente puntual. Por tanto la energía por unidad de superficie es cada vez menor desarrollando así una atenuación, en decibeles, expresada como:

$$A_{\text{div}} = \left[ 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \right] \dots \text{dB}$$

(2-56)

Donde:

$d$ , es la distancia desde la fuente hasta el receptor, en metros

$d_0$ , es la distancia de referencia (= 1 m).

Nota: El término  $20 \log(d/d_0)$ , significa que un nivel sonoro decrece 6 dB cada vez que se dobla la distancia de propagación del sonido. También se entiende que disminuye en 20 dB cada vez que la distancia se multiplica por 10.

#### 2.4.2.3.2 *Absorción atmosférica (A<sub>atm</sub>)*

La atenuación debido a la absorción atmosférica  $A_{\text{atm}}$ , en decibeles, durante la propagación a través de una distancia  $d$ , en metros, viene dada por la Ecuación (2-57).

$$A_{\text{atm}} = \frac{\alpha d}{1000}$$

(2-57)

Donde:

$\alpha$ , es el coeficiente de atenuación atmosférica, en decibeles por kilómetro, en cada frecuencia central de banda de octava (Ver la Tabla 2-9)

**Tabla 2-9 “Coeficiente de atenuación atmosférica,  $\alpha$ , para cada banda de octava”**

TEMPERATURA °C	HUMEDAD RELATIVA %	COEFICIENTE DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA A, dB/km							
		Frecuencia (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0.1	0.4	1.0	1.9	3.7	9.7	32.8	117.0
20	70	0.1	0.3	1.1	2.8	5.0	9.0	22.9	76.6
30	70	0.1	0.3	1.0	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3
15	20	0.3	0.6	1.2	2.7	8.2	28.2	88.8	202.0
15	50	0.1	0.5	1.2	2.2	4.2	10.8	36.2	129.0
15	80	0.1	0.3	1.1	2.4	4.1	8.3	23.7	82.8

#### 2.4.2.3.3 Efectos del suelo (Agr)

La atenuación del suelo,  $A_{gr}$ , es principalmente el resultado del sonido reflejado por la superficie del terreno, interfiriendo con la propagación del sonido desde la fuente hasta el receptor. La norma ISO 9613-2 determina 2 métodos para el cálculo de esta atenuación:

##### 2.4.2.3.3.1 Método general de cálculo

La curvatura de la propagación asegura que la atenuación es determinada prioritariamente por las superficies cerca de la fuente y el receptor. Se distinguen las siguientes zonas:

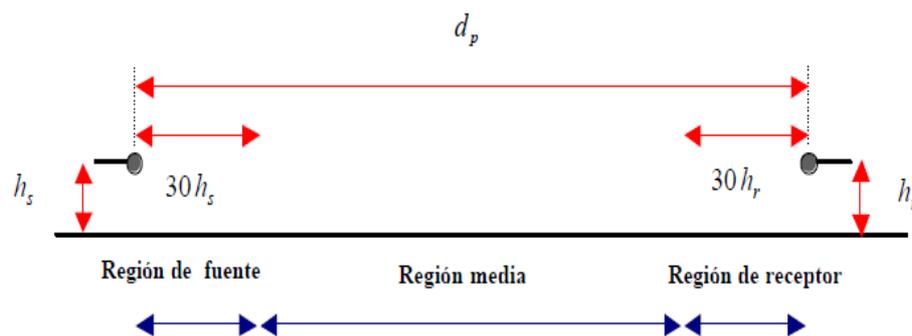
La región de la fuente que se extiende desde la fuente hacia el receptor una distancia de  $30h_s$ , donde  $h_s$  es la altura de la fuente. Esta zona tiene un máximo de distancia de  $d_p$  que es la distancia desde la fuente al receptor.

La región del receptor, que se extiende desde el receptor hacia la fuente una distancia de  $30h_r$ , donde  $h_r$  es la altura del receptor. Esta zona tiene un máximo de distancia de  $d_p$ .

La región media, que se extiende entre la fuente y el receptor si se cumple la condición que  $d_p < (30h_s + 30h_r)$ .

Las regiones antes mencionadas se muestran en la Figura 2-26

**Figura 2-26: Regiones para la determinación de efecto suelo.**



FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

Las propiedades acústicas de cada zona, se describen a través del factor de suelo  $G$  en las siguientes categorías:

- Suelo duro, se incluye pavimentación, agua, hielo, hormigón y otras superficies de toda la tierra que tiene una baja porosidad. De tierra apisonada, por ejemplo, como ocurre a menudo en torno a los polígonos industriales. Para terrenos duros  $G=0$ .
- Suelo poroso, lo que incluye suelo cubierto de hierba, árboles u otra vegetación, y todas las otras superficies propicias para el crecimiento de la vegetación, tales como tierras de cultivo. Para tierra porosa  $G = 1$ .

- Suelo mixto, si la superficie se compone tanto de tierra dura y porosa, entonces  $G$  toma valores entre 0 y 1, el valor corresponderán a la fracción de la región que es poroso.

Calculando mediante las expresiones estipuladas en la Norma ISO 9613 parte 2, se obtienen los coeficientes  $G_s$ ,  $G_r$  y  $G_m$ , los que a su vez permitirán calcular las atenuaciones de cada zona, que en conjunto dan la atenuación por efecto suelo, esto es:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m$$

(2-58)

#### 2.4.2.3.3.2 Método alternativo

Bajo las siguientes condiciones:

- Interesa sólo el nivel de presión sonora ponderado A en el receptor.
- La propagación sonora ocurre sobre suelo poroso o mixto.
- El sonido no es un tono puro.

Se puede calcular la atenuación sonora por efecto del suelo mediante la ecuación:

$$A_{gr} = 4.8 - \left( \frac{2h_m}{d} \right) \left[ 17 + \left( \frac{300}{d} \right) \right] \geq 0 \text{ dB}$$

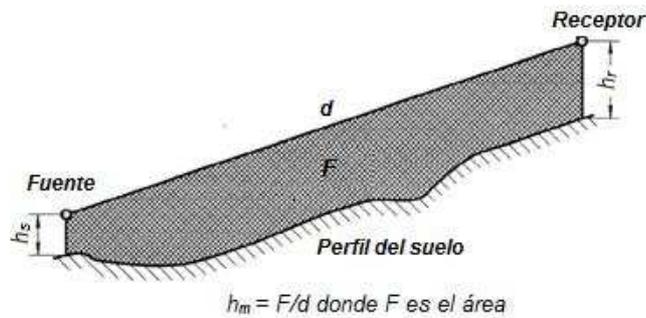
(2-59)

Donde:

- $h_m$ , es la altura media de la trayectoria de propagación sobre el suelo, en metros;
- $d$ , es la distancia desde la fuente hasta el receptor, en metros;

La altura media  $h_m$ , puede ser evaluada por el método que se muestra en la Figura 2-27. Los valores negativos para  $A_{gr}$  de la Ecuación (2-59) serán ceros.

**Figura 2-27: Método de Evaluación de la altura media ( $h_m$ )**



FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

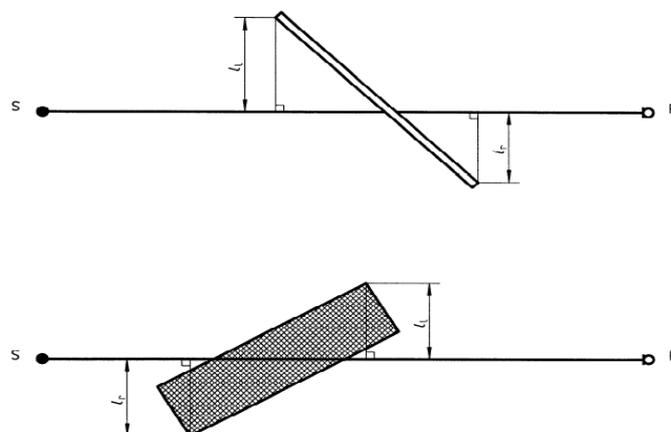
#### 2.4.2.3.4 Apantallamiento (Abar)

Un objeto será tomado como un obstáculo que sirve como pantalla acústica (a menudo llamado barrera acústica) si cumple con los siguientes requisitos:

- Su densidad superficial sea de al menos 10 kg/m<sup>2</sup>;
- El objeto tenga una superficie cerrada sin aberturas o grandes grietas;

La dimensión horizontal normal a la línea fuente-receptor sea mayor que la longitud de onda acústica,  $\lambda$ , de la frecuencia central de la banda de octava de interés, en otras palabras  $l_1 + l_2 > \lambda$ . (Ver Figura 2-28)

**Figura 2-28: Vista de dos obstáculos presentes entre la fuente (S) y el receptor (R).**



FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

Cualquier objeto que cumple con estos requisitos será tomado como una barrera.

El efecto difracción sobre un borde superior de una barrera se calcula por:

$$A_{bas} = D_z - A_{gr} > 0 \quad (2-60)$$

Y la difracción por un borde vertical,

$$A_{bar} = D_z > 0 \quad (2-61)$$

Donde:

- $D_z$  es la atenuación de la barrera por banda de octava
- $A_{gr}$  es la atenuación del suelo en ausencia de la barrera

Se asume que sólo un camino es importante entre la distancia fuente–recepto, por tanto:

$$D_z = 10 \log \left[ 3 + \left( \frac{C_2}{\lambda} \right) C_3 Z K_{met} \right] \quad (2-62)$$

Donde:

$C_2$  es igual a 20, y en casos especiales cuando se toman en cuenta las reflexiones del suelo como fuentes imaginarias  $C_2$  es igual a 40

$C_3$  es iguala a 1 para difracciones simples y para difracciones dobles se calcula mediante:

$$C_3 = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e}\right)^2}$$

(2-63)

$\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de octava en metros;

$K_{met}$  es el factor de corrección de efectos meteorológicos dado por la siguiente ecuación:

$$K_{met} = \exp\left[-\left(\frac{1}{2000}\right)\sqrt{\frac{d_{ss}d_{sr}d}{2z}}\right] \text{ para } z > 0$$

$$K_{met} = 1 \text{ para } z \leq 0$$

(2-64)

Nota: Para difracciones laterales se asume que  $K_{met} = 1$ ,

$z$  es la diferencia entre los caminos recorridos entre la onda difractada y la onda directa, dada para una simple difracción por la Ecuación (2-65):

$$z = \left[(d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2\right]^{1/2} - d$$

(2-65)

Donde:

- $d_{SS}$  es la distancia al primer borde difractante,
- $d_{SR}$  es la distancia del segundo borde difractante al receptor,
- $a$  es la distancia paralela a la barrera en metros entre la fuente y el receptor,
- $d$  es la distancia entre la fuente y el receptor.

Para difracción doble la expresión queda determinada por

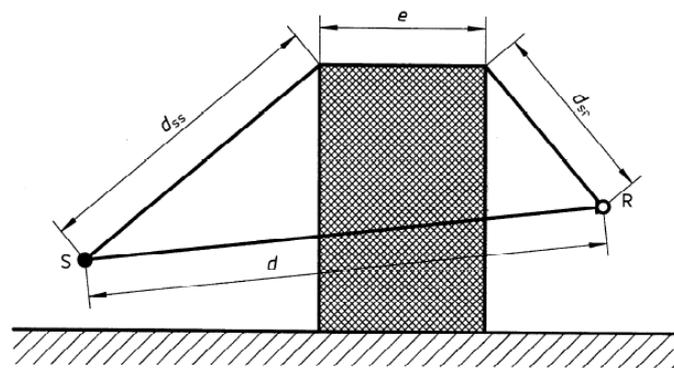
$$z = \left[ (d_{ss} + d_{sr} + e)^2 + a^2 \right]^{1/2} - d$$

(2-66)

Donde:  $e$  es la distancia entre los dos bordes difractantes, en el caso de doble difracción.

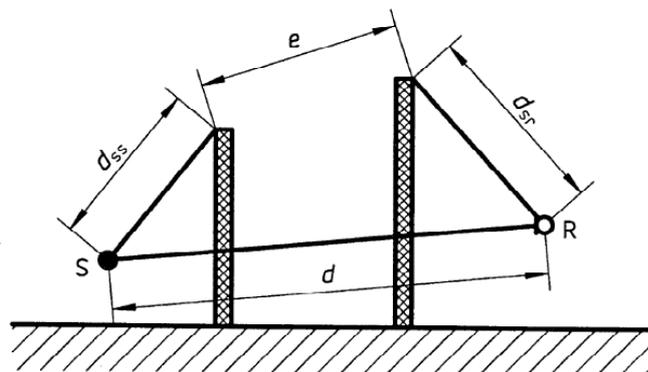
En la Figura 2-29 se observa el casos de barrera gruesa y en la Figura 2-30 una difracción doble.

**Figura 2-29: Representación de una barrera gruesa.**



FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

**Figura 2-30: Representación de una difracción doble**



FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

#### 2.4.2.3.5 Reflexiones

Las reflexiones son consideradas en términos de fuentes imaginarias. Esas reflexiones son desde techos exteriores y superficies con algún grado de verticalidad, tal como la fachada de edificios, la cual puede incrementar el nivel de presión sonora en el receptor. Los efectos de reflexiones desde el suelo no son incluidos, ya que esos entran en el cálculo de  $A_{gr}$ .

Las reflexiones generadas por la presencia de un obstáculo se calcularán para cada banda de octava, cuando existan las siguientes condiciones:

- Una reflexión especular, se puede construir, como se muestra en la Figura 2-31;
- El coeficiente de reflexión sonora de la superficie del obstáculo debe ser mayor que 0,2;
- La superficie es lo suficientemente grande, en relación a la longitud de onda,  $\lambda$ , (en metros) para la banda de interés, según la Ecuación (2-67):

$$\frac{1}{\lambda} > \left[ \frac{2}{(l_{min} \cos \beta)^2} \right] \left[ \frac{d_{s,o} d_{or}}{(d_{s,o} + d_{or})} \right]$$

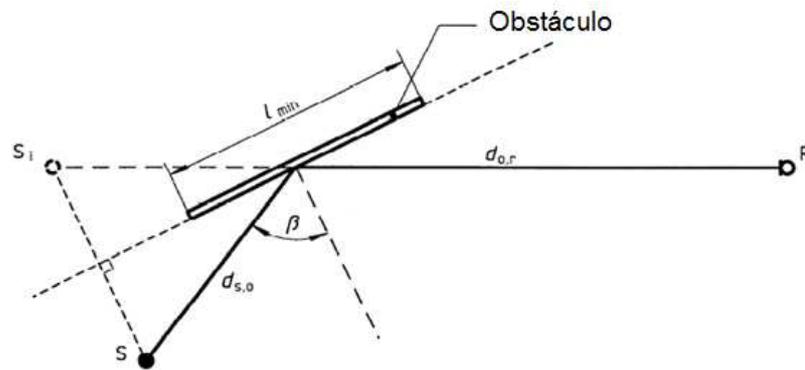
(2-67)

Donde:

- $\lambda$ , es la longitud de onda del sonido (en metros) en la frecuencia central  $f$  (Hz) de la banda de octava de interés
- $l_{min}$ , es la mínima dimensión (largo o alto) de la superficie reflectante.
- $\beta$ , es el ángulo de incidencia, en radianes;
- $d_{s,o}$ , es la distancia entre la fuente y el punto de reflexión sobre el obstáculo;

- $d_{o,r}$ , es la distancia entre el punto de reflexión sobre el obstáculo y el receptor;

**Figura 2-31: Generación de una reflexión especular desde un obstáculo**



FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

Si alguna de estas condiciones no se cumplen para una determinada banda de octava, entonces las reflexiones serán despreciables.

La fuente real y la imaginaria se manejan por separado. El nivel de potencia sonora de la fuente imaginaria  $NW_{im}$  se calculará a partir de:

$$NW_{im} = NW + 10 \log(\rho) + D_{lr} \quad dB$$

**(2-68)**

Donde:

- $NW$  es el nivel de potencia sonora de la fuente
- $\rho$ , es el coeficiente de reflexión sonora para un ángulo  $\beta$ , sobre la superficie del obstáculo ( $\geq 0,2$ );
- $D_{lr}$ , es el índice de directividad de la fuente en la dirección imagen - receptor.

#### 2.4.2.4 Corrección meteorológica ( $C_{met}$ )

Para determinar el nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación A, en el receptor a largo plazo  $L_{eq}(LT)$  es decir en intervalos de tiempo (T) de varios meses o un año, hay que considerar la variedad de condiciones meteorológicas, tanto favorables como desfavorables para la propagación. Un valor para  $L_{eq}(LT)$  se puede obtener en esta situación a partir del calculado de  $L_{eq}(DW)$  a través de la Ecuación (2-52), mediante la corrección meteorológica  $C_{met}$  en la Ecuación (2-55)

Un valor (en dB) para  $C_{met}$  en la Ecuación (2-55) se puede calcular utilizando la Ecuación (2-69) y Ecuación (2-70) para el caso de una fuente puntual de sonido que sea constante en el tiempo:

$$C_{met} = 0 \quad si \quad dp \leq 10 (h_s + h_r) \quad (2-69)$$

$$C_{met} = C_0 \left[ \frac{1 - 10(h_s + h_r)}{dp} \right] \quad si \quad dp > 10 (h_s + h_r) \quad (2-70)$$

Donde:

- $h_s$ , es la altura de la fuente, en metros
- $h_r$ , es la altura del receptor, en metros
- $dp$ , es la distancia entre la fuente y el receptor proyectado al plano horizontal del suelo, en metros;
- $C_0$ , es un factor, en decibelios, que depende de las estadísticas meteorológicas locales para velocidad y dirección del viento y los gradientes de temperatura.

Los efectos de las condiciones meteorológicas en la propagación del sonido son pequeños para distancias cortas, mientras que, para distancias más largas los efectos son de interés

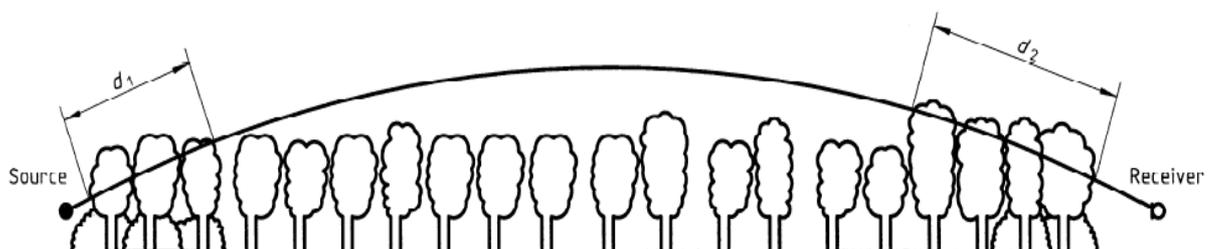
Nota: La experiencia indica que los valores de  $C_o$ , en la práctica se limitan a un rango entre 0 a 5 dB, y valores superiores a 2 dB son excepcionales. Por tanto se asume que  $C_o$  es igual a 2dB en la mayoría de los casos

#### 2.4.2.5 Influencia del Follaje (Afol)

El follaje de árboles y arbustos proporcionan una pequeña atenuación, pero sólo si es lo suficientemente denso como para bloquear por completo la visión a lo largo de la trayectoria de propagación, es decir, cuando existe la imposibilidad de realizar contacto visual entre el receptor y la fuente. La atenuación puede ser por vegetación cerca a la fuente, o cerca al receptor, o por ambas situaciones, como se ilustra en la Figura 2-32.

Por otra parte, la inclinación de las distancias  $d_1$  y  $d_2$  se puede tomar a lo largo de la línea de propagación del ruido en un ángulo de  $15^\circ$  con respecto a la tierra

**Figura 2-32: Atenuación a través de follaje denso.**



NOTE —  $d_f = d_1 + d_2$

FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

En la Tabla 2-10 se da a conocer el efecto de la atenuación producto de la presencia de follaje:

**Tabla 2-10: “Atenuación sonora debido a la propagación a una distancia “d” a través de un follaje denso”**

<i>DISTANCIA DE</i>	<i>FRECUENCIA (Hz)</i>							
<i>PROPAGACIÓN (M)</i>	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10 m < d < 20 m	<b>Atenuación (dB)</b>							
	0	0	1	1	1	1	2	3
20 m < d < 200 m	<b>Atenuación (dB/m)</b>							
	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.12

FUENTE: (INTERNATIONAL STANDARD ISO 9613 PART 2, 1996)

#### 2.4.2.6 Sitios industriales (A<sub>site</sub>)

En los sitios industriales, la atenuación puede ocurrir debido a que las instalaciones (y otros objetos) se encuentran dispersas bloqueando el camino de propagación del sonido.

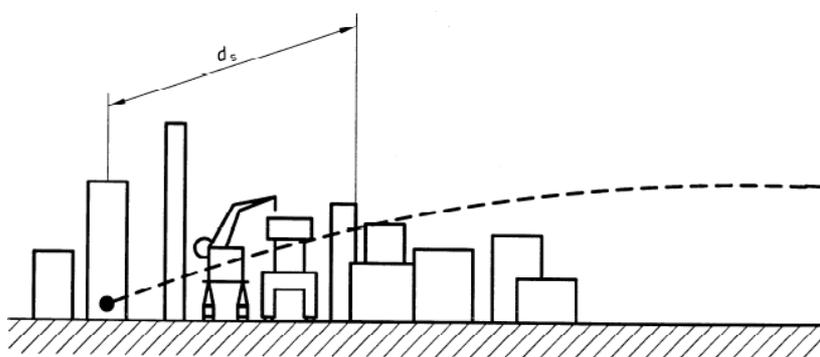
Los sitios industriales pueden ser descritos como barreras  $A_{bar}$  dependiendo del criterio del equipo técnico.

Como el valor de  $A_{site}$  depende en gran medida del tipo de lugar, se recomienda que sea determinado por mediciones. Sin embargo, para estimar la atenuación, se utilizará los valores mostrados en la Tabla 2-11. La atenuación se incrementa linealmente con la longitud del camino de propagación  $d_s$  a través de las instalaciones (ver Figura 2-33), presentando una atenuación máxima de 10 dB.

**Tabla 2-11: “Atenuación sonora debida a la propagación a través de plantas industriales”**

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A_{site}$ (dB/m)	0	0.015	0.025	0.025	0.02	0.02	0.015	0.015

**Figura 2-33: Atenuación sonora debida a la propagación a través de sitios industriales**



## 2.5 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.

“Interpolación es un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una locación precisa a partir de valores del atributo obtenidos de puntos vecinos ubicados al interior de la misma región. A la predicción del valor de un atributo en lugares fuera de la región cubierta por las observaciones se le llama extrapolación” (FAO, 2003)

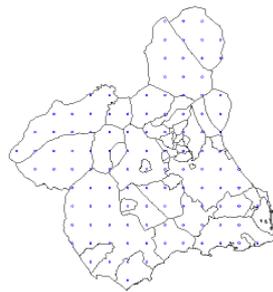
La interpolación se la puede realizar en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que según el Environmental Systems Research Institute (ESRI, 1993): “es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, codificación, análisis espacial, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada”

Todos los métodos de interpolación espacial se basan en la presunción lógica de que cuanto más cercanos estén dos puntos sobre la superficie terrestre, los valores de cualquier variable cuantitativa que midamos en ellos serán similares, es decir, las variables espaciales muestran una autocorrelación espacial (SIGMUR, 2006).

### 2.5.1 DISEÑO DE LA TOMA DE LA MUESTRA PARA LA INTERPOLACIÓN A PARTIR DE PUNTOS.

Para poder realizar una interpolación se requiere contar con un número de puntos muestreados, para lo cual se tiene varios tipos de muestreo que se pueden usar o incluso combinar:

- a) Muestreo regular, los puntos de muestreo se disponen siguiendo una malla regular



FUENTE:(SIGMUR, 2006)

- b) Muestreo aleatorio, los puntos de muestreo se disponen al azar



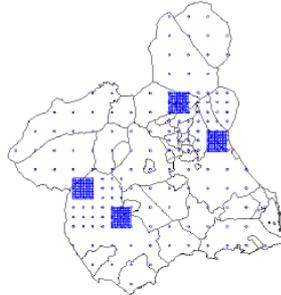
FUENTE:(SIGMUR, 2006)

- c) Muestreo estratificado, se utiliza una variable de apoyo para realizar el muestreo de forma que se debe muestrear en todos los valores posibles de la variable de apoyo.



FUENTE:(SIGMUR, 2006)

- d) Muestreo por agregados, se establecen varias escalas de muestreo y en cada una de ellas se hacen muestreos regulares o aleatorios.



FUENTE:(SIGMUR, 2006)

## 2.5.2 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN A PARTIR DE PUNTOS.

Los métodos de interpolación a partir de puntos se los clasifica en dos grandes grupos:

- Métodos globales, utilizan toda la muestra para estimar el valor en cada nuevo punto. El problema de los métodos globales es que sólo consiguen modelar una componente a escala global, pero no las componentes a escala más detallada. (FAO, 2003)
- Métodos locales, se basan en la utilización de los puntos más cercanos al punto de interpolación para estimar la variable. Asumen una autocorrelación espacial y estima los valores de la variable como una media ponderada de los valores de un conjunto de puntos de muestreo cercanos. El problema más importante de los métodos basados en medias ponderadas es que, se interpola basándose en el valor medio de un

conjunto de puntos situados en las proximidades, por tanto nunca se van a obtener valores mayores o menores que los de los puntos utilizados (SIGMUR, 2006)

Dentro de los métodos más utilizados para la realizar una interpolación de puntos tenemos los siguientes:

- Método de las medias móviles ponderadas.
- Método de Griging

#### **2.5.2.1 El Método de las medias móviles ponderadas (IDW).**

Es lógico pensar que cuanto más apartados estén dos puntos más diferentes serán sus valores de variable. Para tener en cuenta este hecho se utilizan las medias ponderadas. (SIGMUR, 2006)

Este método utiliza los promedios de los valores de entrada con lo que estima el valor de un atributo según una función inversa de la distancia, por lo cual se le conoce como Inversed Distance Weighted (IDW). La estimación se repite para cada punto del área de interpolación, utilizando un vecindario circular o elíptico de radio conocido. (Arce Mesén, 2001)

Se asume que cada punto posee una influencia local que disminuye con la distancia. De esta manera, el método pondera con mayor fuerza a los puntos cercanos y con menor intensidad sobre aquellos ubicados a mayor distancia. (Ortiz)

Siendo apropiado para cuando la variable analizada disminuye conforme aumenta la distancia, como es el caso de la atenuación de ruido en medio atmosférico. (Ortiz)

Sin embargo, el resultado jamás superará los límites máximos y mínimos establecidos en los puntos de entrada del análisis. (Ortiz)

### 2.5.2.2 El método de Kriging.

Es un método geoestadístico que interpola en función de medias ponderadas donde el conjunto de los pesos asignados a los puntos de muestreo minimiza la varianza de estimación basándose en una autocorrelación espacial (genera funciones de Variograma y covarianza para estimar relación estadística entre los valores medidos) para obtener unos factores de ponderación optimizados.(Ortiz)

El principio del método dice que la variación espacial de un atributo es muy irregular para ser modelizada por una simple función matemática, pero puede ser descrita por una superficie estocástica.(Ortiz)

Es un método muy extendido, pero es bastante complejo matemáticamente y muy exigente en cuanto a la calidad de la muestra de puntos. (SIGMUR, 2006)

Kriging es similar al método IDW en cuanto a ponderar los valores medidos aledaños. En IDW, la ponderación depende solamente de la distancia hacia la locación a predecir, mientras que en el Kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre las locaciones medidas y la predicción realizada sino que además se considera la forma en cómo se organiza espacialmente la totalidad de los puntos localizados sobre una superficie.(Ortiz)

## **CAPÍTULO 3**

### **INVESTIGACIÓN DE CAMPO**

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA INDUSTRIAL**

##### **3.1.1 INTRODUCCIÓN**

OCP Ecuador S.A. es una empresa privada ecuatoriana encargada de operar desde el 2003 el oleoducto de crudos pesados (OCP), que es el segundo oleoducto principal que tiene el Ecuador para transportar crudo desde la Amazonía hasta la Costa.

El transporte de crudo pesado se inicia en la estación Amazonas a 5 kilómetros de la ciudad de Nueva Loja, donde se cuantifica el ingreso del producto que entrega cada empresa. El crudo es enviado a los tanques de almacenamiento (capacidad 1.200.000 barriles). Posteriormente es calentado por un sistema de intercambio de calor e impulsado por las bombas principales que proporcionan la presión suficiente para iniciar el recorrido.

Luego es enviado a Cayagama, ubicada en Sucumbios. Aquí puede continuar su ascenso hasta llegar a la tercera estación: Sardinias, ubicada en Napo. En esa estación también se recibe crudo de la estación colindante de AGIP, de esta forma la capacidad aumenta.

La estación Páramo da el último impulso para poder superar el punto más alto: (4.200 msnm) en el sector de La virgen. Esta es la última infraestructura de bombeo del sistema OCP.

El crudo inicia su descenso siendo necesario un proceso de reducción de presión, mediante dos estaciones instaladas para ello: Chiquilpe y Puerto Quito.

Finaliza su viaje al llegar al Terminal Marítimo de OCP, ubicado en Punta Gorda, a 15 kilómetros de la ciudad de Esmeraldas (capacidad 3 750 000 barriles)

El Terminal Marítimo cuenta con un área mar afuera en donde dos monoboyas son las encargadas de cargar buques de hasta 325 toneladas de capacidad.

**Figura 3-1: “Ruta del Oleoducto de Crudos Pesados”**



FUENTE: (OCP)

**Figura 3-2: “Perfil del Oleoducto de Crudos Pesados”**



FUENTE: (OCP)

Para el desarrollo del presente proyecto de titulación se ha tomado como caso de estudio la estación de bombeo Sardinias.

### 3.1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

La Estación de bombeo Sardinias está ubicada en el cantón Quijos, Provincia de Napo, aproximadamente a 1802 msnm; se asienta junto a la vía Quito-Lago Agrio y limita con la Estación Baeza perteneciente a AGIP Oil. Las coordenadas promedio fueron obtenidas con un sistema de posicionamiento satelital (GPS Garmin 60CSx).

Los datos fueron obtenidos sobre la base del Datum Horizontal "PSAD-56" (provisional para Sud América – 1956) y el Datum Vertical de La Libertad (Provincia del Guayas, 1959). (Entrix Inc, 2006). Ver Figura 5-1.

**Tabla 3-1: Ubicación geográfica de la estación Sardinas**

<i>DENOMINACIÓN</i>	<i>COORDENADAS GEOGRÁFICAS</i>		<i>COORDENADAS UTM. (ZONA 18S)</i>	
	Longitud	Latitud	Este	Norte
Estación de Bombeo Sardinas	W 77° 51' 19"	S 0° 26' 00"	182 121	9 952 028

FUENTE: (ENTRIX INC, 2006)

### 3.1.3 CLIMA Y METEOROLOGÍA

El clima y la meteorología constituyen factores ambientales relacionados con la dinámica atmosférica y, en mayor o menor grado, influyen sobre todas las actividades humanas.

Las observaciones y mediciones meteorológicas se utilizan para determinar el comportamiento espacial y estacional de las variables que influenciarán la propagación del ruido en la estación de Sardinas y sus inmediaciones

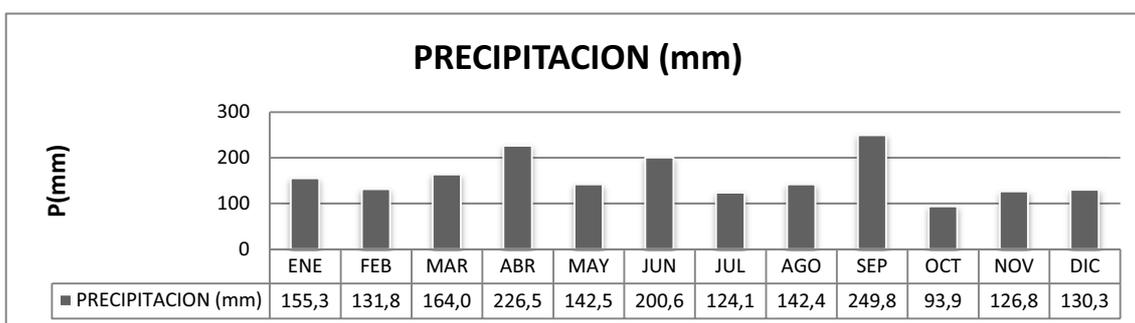
Por tanto para el análisis del clima se compiló la información obtenida de la estación meteorológica perteneciente a OCP Ecuador en Sardinas en una base de datos, la misma que fue depurada para el posterior análisis estadístico en base a los valores medios, máximos y mínimos de los datos arrojados por la estación. La depuración consistió en eliminar de la base de datos la información errónea originada por fallas técnicas en el almacenamiento de datos, mantenimiento de la estación, o defectos en los sensores.

Los principales elementos climáticos<sup>6</sup> analizados fueron: precipitación (P), temperatura (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), y la evapotranspiración potencial (ETP). En la Tabla 3-3 se presentan los histogramas de las diferentes características climáticas<sup>7</sup>, analizados en base a la información obtenida de la estación meteorológica de la estación de Sardinas. El análisis estadístico se realizó en base a registros horarios.

### 3.1.3.1 Precipitación.

El análisis del histograma de precipitación representado en la Figura 3-3, indica que la mayor pluviosidad se presenta en el mes de septiembre con una precipitación media mensual de 249.8 mm para la estación de Sardinas. El mes de menor precipitación corresponde a octubre con un valor medio mensual de 93.9 mm. La precipitación media anual es de 1887.9 mm al año.

**Figura 3-3: Histograma de Precipitación en la Estación Sardinas**



FUENTE: OCP ECUADOR  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Observando el histograma de precipitación, se concluye que el periodo lluvioso se encuentra entre los meses de enero y junio. Sin embargo, pueden presentarse elevadas precipitaciones en cualquier mes del año.

<sup>6</sup> Elementos climáticos: son las magnitudes físicas, medibles, que se utilizan para caracterizar las condiciones del medio

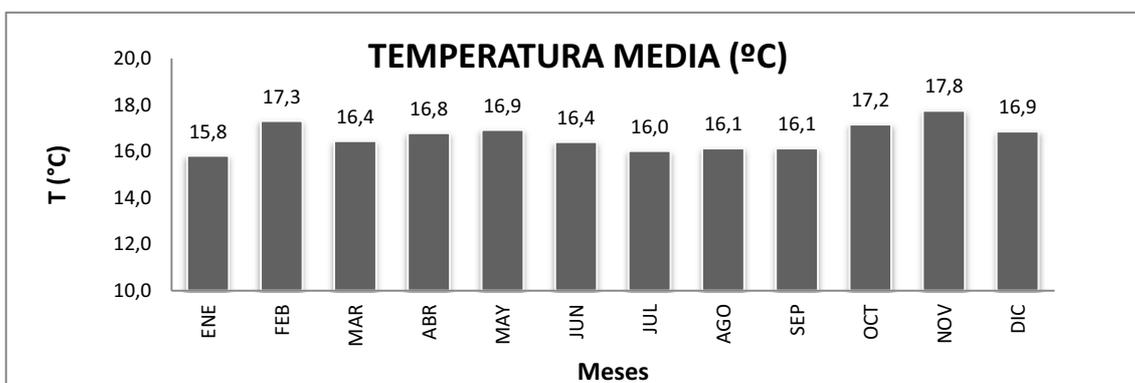
<sup>7</sup> Características climáticas: Son magnitudes físicas expresadas en unidades definidas, y sirven para caracterizar los elementos climáticos; por ejemplo, la temperatura media máxima, la suma mensual de precipitaciones, etc.(Cardno Entrix, 2010)

### 3.1.3.2 Temperatura

Al observar los histogramas de la Figura 3-4 y Figura 3-5, que presentan los valores de temperatura media, máxima y mínima, registrados en la estaciones Sardinias, se determina que la temperatura media anual fue de 16.6 °C, sin embargo, en el histogramas de temperaturas medias mensuales se muestran una ligera disminución de la misma entre los meses de junio a septiembre.

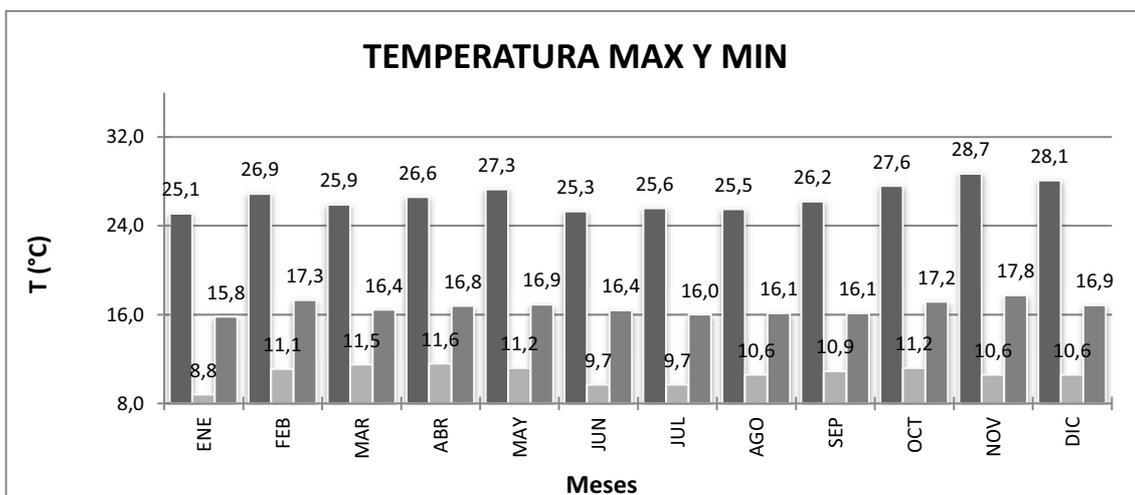
Las temperaturas medias máximas se alcanzan en noviembre con un máximo de 28.7°C. La temperatura media mínima fue de 8.8°C, en el mes de enero.

**Figura 3-4: Histograma de la temperatura media mensual**



FUENTE: OCP ECUADOR  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Figura 3-5: Histograma de temperaturas máximas y mínimas**



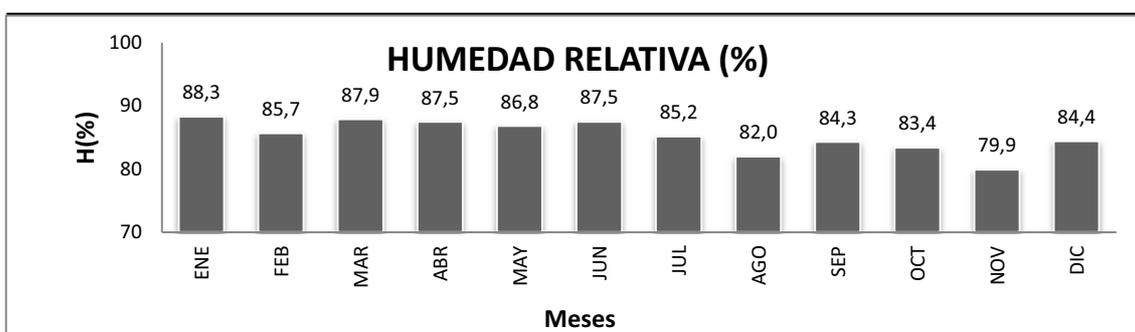
FUENTE: OCP ECUADOR  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### 3.1.3.3 Humedad Relativa

La humedad relativa es un parámetro importante tanto para la formación de fenómenos meteorológicos como para la atenuación del ruido en su propagación a través del aire.

En la estación meteorológica de Sardinias, la humedad relativa promedio fue de 85,2%. Adicionalmente, todos los meses presentaron una humedad relativa media superior al 79% ver la Figura 3-6.

**Figura 3-6: Histograma de humedad relativa en la estación Sardinias**



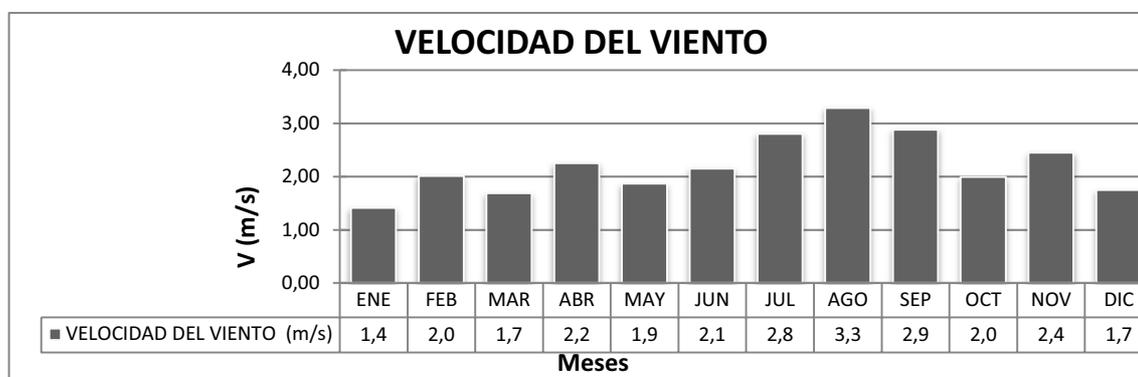
FUENTE: OCP ECUADOR

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### 3.1.3.4 Velocidad y dirección del viento

Respecto a la velocidad del viento, en la estación Sardinias se presentó un valor medio de 2,21 m/s y un valor máximo de 3.6 m/s para julio del 2005. (Figura 3-7)

**Figura 3-7 Histograma de velocidad del viento en la estación Sardinias.**



FUENTE: OCP ECUADOR

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

La rosa de los vientos que se indican en la Figura 3-8 se elaborará con las medias horarias de la estación meteorológica de OCP en Sardinias, en la cual el 30.22% del tiempo se registró calma (viento menor a 0.5 m/s). Las direcciones predominantes son Sur Oeste (SW 18.53%) Este Noreste (ENE 12.62%) y Oeste Suroeste (WSW 10.07%), entre las cuales acumulan aproximadamente el 41.22% del tiempo (ver la Tabla 3-2).

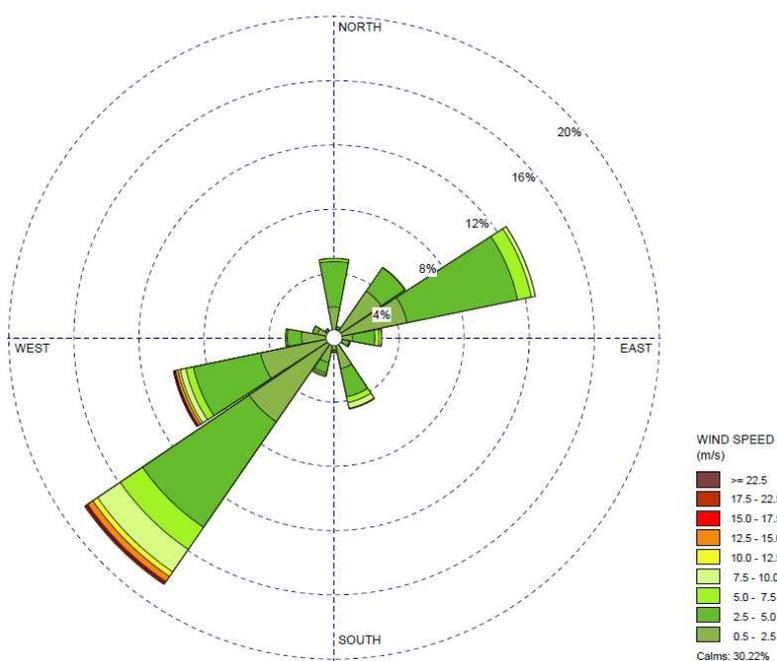
**Tabla 3-2: Rango de velocidades en la estación sardinias**

DIRECCIÓN	RANGO DE VELOCIDADES (m/s)									TOTAL (%)
	0.5-2.5	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-10.0	10.0-12.5	12.5-15.0	15.0-17.5	17.5-22.5	≥ 22.5	
<b>N</b>	1.90791	2.82517	0.17122	0.03669	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>4.94099</b>
<b>NNE</b>	0.54424	0.15899	0.01835	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.72158</b>
<b>NE</b>	3.51006	1.75503	0.02446	0.00612	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>5.29566</b>
<b>ENE</b>	4.58020	6.92228	0.86223	0.23849	0.01223	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>12.6154</b>
<b>E</b>	1.13129	1.35755	0.28129	0.14065	0.00612	0.00612	0.0000	0.00612	0.0000	<b>2.92913</b>
<b>ESE</b>	0.51367	0.43417	0.06115	0.01835	0.0000	0.00612	0.0000	0.0000	0.0000	<b>1.03345</b>
<b>SE</b>	0.26906	0.04281	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.31187</b>
<b>SSE</b>	1.96294	1.78561	0.36691	0.36079	0.03058	0.02446	0.0000	0.0000	0.0000	<b>4.53128</b>
<b>S</b>	0.77050	0.10396	0.01223	0.03058	0.00612	0.01223	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.93561</b>
<b>SSW</b>	1.57769	0.66043	0.11619	0.09173	0.00612	0.01835	0.0000	0.0000	0.0000	<b>2.47049</b>
<b>SW</b>	6.31688	7.91904	1.65719	1.68776	0.35467	0.39137	0.09784	0.11007	0.0000	<b>18.5348</b>
<b>WSW</b>	4.61077	4.20718	0.47698	0.34856	0.13453	0.17122	0.05504	0.07338	0.0000	<b>10.0777</b>

DIRECCIÓN	RANGO DE VELOCIDADES (m/s)									TOTAL (%)
	0.5-2.5	2.5-5.0	5.0-7.5	7.5-10.0	10.0-12.5	12.5-15.0	15.0-17.5	17.5-22.5	≥ 22.5	
W	2.00575	0.86223	0.06727	0.05504	0.00612	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.99639
WNW	1.05179	0.28741	0.01223	0.01835	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.36978
NW	0.55036	0.12230	0.006112	0.01223	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.69100
NNW	0.22014	0.07950	0.01835	0.00612	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.32410
Sub-total	31.5233	29.5236	4.15214	3.05143	0.55647	0.62985	0.15288	0.18957	0.0000	69.7792
Calma										30.22
Total										100.00

FUENTE: OCP ECUADOR - ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Figura 3-8: Rosa de los vientos en la Estación Sardinias



FUENTE: OCP ECUADOR PERIODO FEBRERO 2005 A MAYO 2010  
 ELABORADO POR (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)  
 WRPLOT VIEW - LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE

### 3.1.3.5 Evapotranspiración potencial (ETP)

Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) son requeridos para calcular el balance hídrico y realizar una clasificación climática.

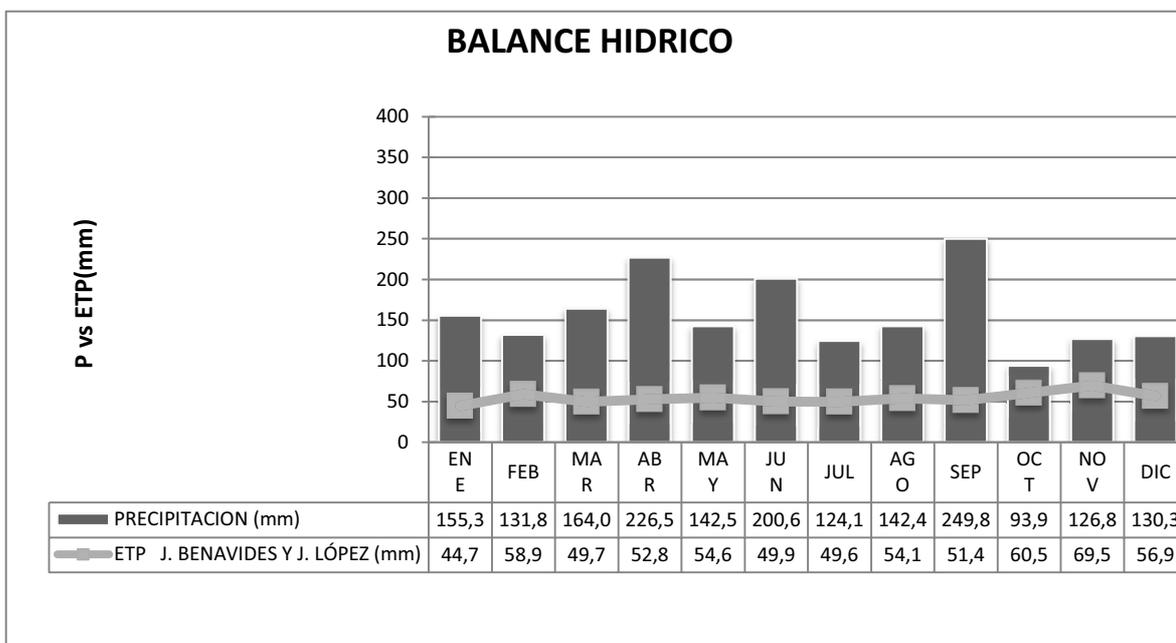
A partir de los datos registrados por la estación meteorológicas en Sardinias, se estimo la evapotranspiración potencial, mediante el método de Thornthwaite; obteniendo un valor de ETP total anual de 752.6 mm.

El clima en la Estación Sardinias de acuerdo a los valores obtenidos corresponde a: Mesotérmico II (B'2), Perhúmedo, con una falta de agua pequeña o nula

### 3.1.3.6 Balance hídrico

El balance hídrico mensual de la estaciones Sardinias se muestran en la Tabla 3-3. Los valores de evapotranspiración nunca superaran a los de precipitación (ver Figura 3-9) de hecho el valor medio anual de las excedencias de la pluviosidad sobre la ETP fue de 1135.3 mm

**Figura 3-9: Balance hídrico en la estación Sardinias**

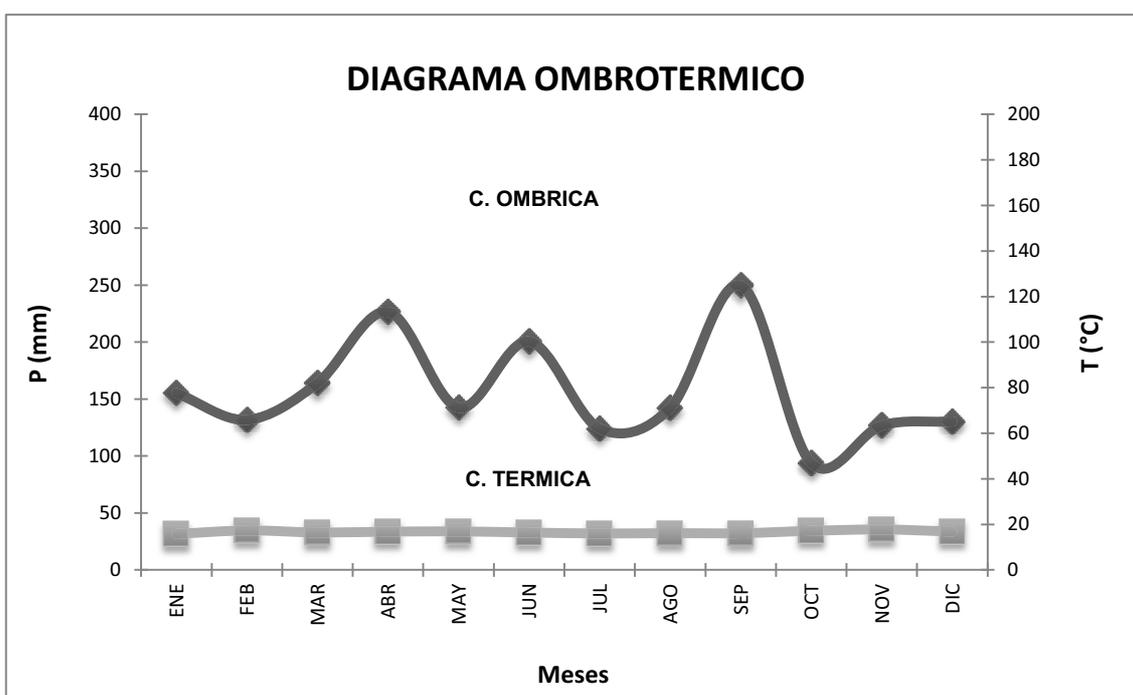


FUENTE: OCP ECUADOR  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Para la elaboración de los diagramas ombrotérmicos de Gausse, en el eje de las abscisas (X) se colocan los meses del año, y en un doble eje de ordenadas (Y) se pone, en un lado las precipitaciones medias mensuales (mm), y en el otro, las temperaturas medias mensuales (°C). La escala de precipitaciones debe ser el doble que la de temperaturas (Figura 3-10). Esto es, por cada °C en temperatura, se toman 2 mm en precipitación. Por ejemplo, a un valor de 20 °C le corresponde, en la misma línea, el valor de 40 mm.

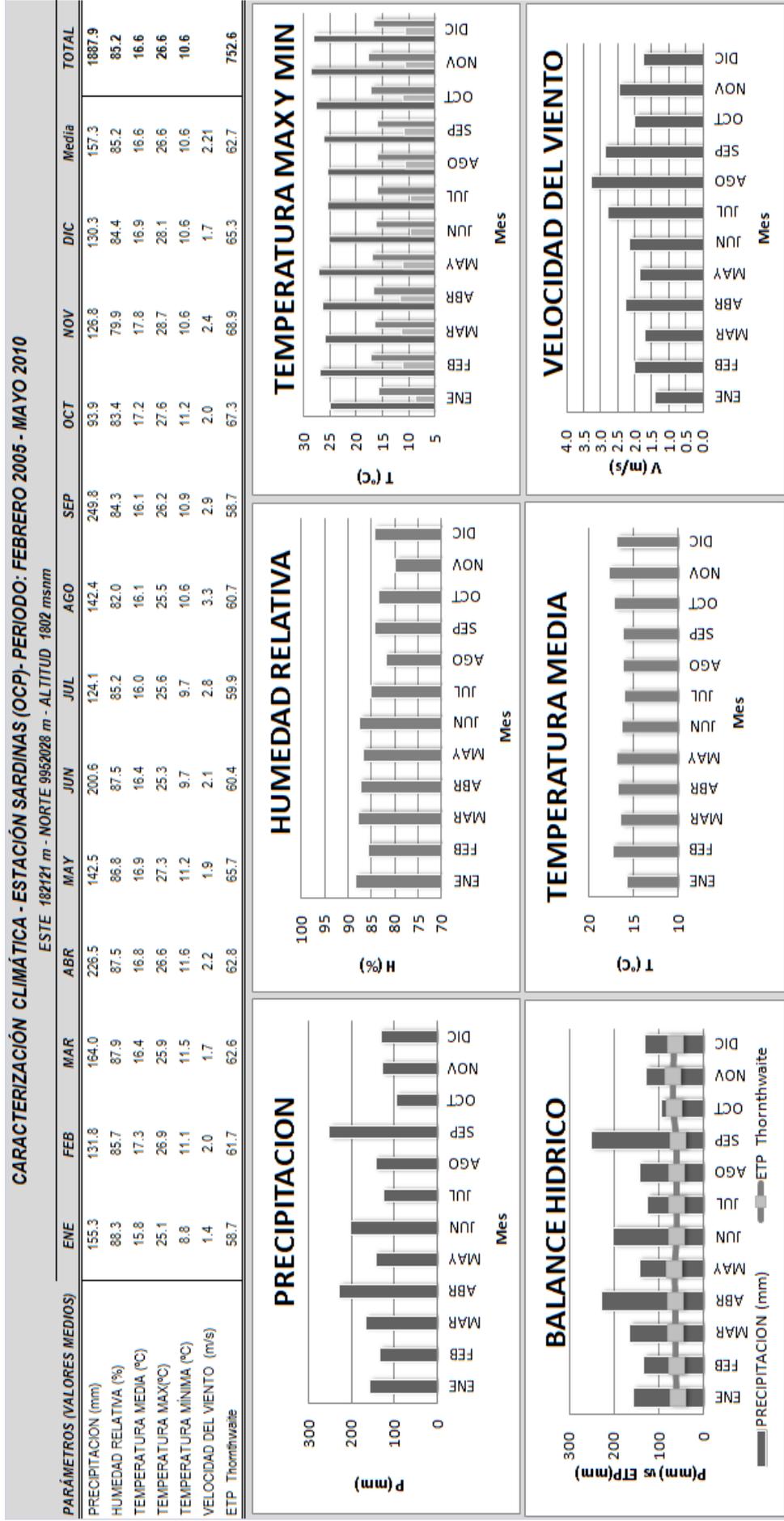
De acuerdo al diagrama ombrotérmico no se registraron meses secos durante el periodo de registro de la temperatura y precipitación (ver Figura 3-10 )

**Figura 3-10: Diagrama Ombrotérmico de la estación sardinas – Periodo febrero 2005 - mayo 2010**



FUENTE: OCP ECUADOR  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Tabla 3-3: Caracterización climática de la estación Sardinias



### **3.1.4 SUELOS**

El análisis del componente suelo se orienta a determinar las características físicas y los usos del recurso en la Estación Sardinas y sus alrededores.

#### **3.1.4.1 Características físicas.**

Las características físicas fueron determinadas en base a la información de estudios realizados por la consultora CARDNO ENTRIX, en los cuales se concluyen que:

- El área de la estación Sardinas presenta un suelo con superficies inclinadas.
- Se caracteriza por la presencia mayoritaria de depósitos coluviales<sup>8</sup>, con pendientes entre el 25-50%.
- El suelo dominante corresponde al subgrupo Typic Hapludolls, los cuales son profundos, bien drenados y derivados de los depósitos coluviales.
- Las texturas son francas en todo el perfil.
- Son de reacción ácida en la superficie y ligeramente ácidas más abajo, la materia orgánica presentan valores medios, saturación de bases altos y la fertilidad natural es baja.

#### **3.1.4.2 Usos del Suelo.**

El uso del suelo se lo determino con ayuda de la imagen satelital proporcionada por OCP y con la salida de campo, de tal forma que se obtuvo los siguientes usos y sus respectivos porcentajes para un radio de 500 metros alrededor de la Estación Sardinas.

---

<sup>8</sup> Depósito coluviales: Son acumulaciones de material procedente de la erosión de una ladera por efecto de la gravedad.

**Tabla 3-4: Uso del suelo alrededor de la estación sardinas**

<i>USO DE SUELO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>PORCENTAJE</i>
Zona Industrial	Se considera el espacio en el cual se encuentra la Estación Sardinas de OCP y la Estación Baeza de Agip Oil Ecuador.	13.98
Zona de Arboles	El bosque secundario que se encuentra entre la Estación Sardinas y la vía al Chaco, el cual ha sufrido un proceso de desbroce y en la actualidad es un bosque producto de la regeneración de la vegetación.	4.24
Zona Residencial	Forma parte de esta categoría todos aquellos espacios en los cuales se identificaron asentamientos humanos. Dentro de la zona industrial existe un área de campamento que fue considerada como zona residencial.	3.81
Zona de Pastizal	Corresponden áreas cubiertas por especies de carácter herbáceo, introducidos por el hombre para el desarrollo de actividades agropecuarias	77.97

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ &amp; LÓPEZ GRANJA, 2012)

En la Figura 5-2. Mapa de Uso de Suelo., se puede apreciar lo antes expuesto.

En general el tipo de suelo de la Estación Sardinas ha sido adecuado con material pétreo para poseer mayor estabilidad, esto conlleva a tener un suelo de características duras.

### 3.1.5 TOPOGRAFÍA

La topografía es importante porque constituye el punto de apoyo de la mayoría de los elementos que modifican la propagación del sonido. El sonido tiende a propagarse en línea recta pero bajo ciertas circunstancias tiende a seguir las ondulaciones del terreno.

Al no contar con la topografía de la estación Sardinas, se procedió a determinar de manera aproximada las alturas sobre el nivel del mar de las distintas áreas de dicha industria, determinándose cinco áreas con distintos niveles, los cuales se muestran en la siguiente figura:

**Figura 3-11: Áreas con distintos niveles en la estación**



FUENTE: OCP 2011

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Con la ayuda de un clinómetro y asumiendo como base 1800 msnm para el área del campamento, se determino las diferentes alturas para las distintas áreas de la estación, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3-5: Niveles de altura para las distintas áreas de la estación Sardinas**

<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>NIVEL (msnm)</i>
Nivel Campamento	1800.0
Nivel Bodega	1803.0
Nivel Generadores	1804.5
Nivel Bombas	1807.0
Nivel Calentadores	1811.0

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### 3.1.6 IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE RUIDO Y RECEPTORES SENSIBLES.

Para reconocer los posibles emisores de ruido y receptores sensibles se analiza la información existente sobre la industria y sus alrededores, con lo que se obtiene una idea general.

Se estableció como fuentes de ruido los equipos que generan la mayor cantidad de energía sonora, realizando una medición en campo durante el monitoreo del 5 de diciembre del 2010. A continuación se indican las principales fuentes de ruido:

**Tabla 3-6: Identificación de las fuentes de ruido**

<i>FUENTES DE RUIDO</i>	<i>ESTADO DE OPERACIÓN</i>	<i>UBICACIÓN (PSAD 56)</i>		<i>TIPO DE INSTALACIÓN</i>	<i>POTENCIA (Kw)</i>
		<i>ESTE</i>	<i>NORTE</i>		
<b>Área de bombas</b>					
Bomba principal P 0301 A	encendida	182155	9951937	Motor Wartsila 12V32LN	3370
Bomba principal P 0301 B	encendida	182150	9951943	Motor Wartsila 12V32LN	3370
Bomba principal P 0301 C	apagada	182146	9951950	Motor Wartsila 12V32LN	3370
Bomba principal P 0301 D	apagada	182137	9951962	Motor Wartsila 12V32LN	3370
Bomba principal P 0301 E	apagada	182133	9951968	Motor Wartsila 12V32LN	3370

FUENTES DE RUIDO	ESTADO DE OPERACIÓN	UBICACIÓN (PSAD 56)		TIPO DE INSTALACIÓN	POTENCIA (KW)
		ESTE	NORTE		
Bomba principal P 0301 F	apagada	182128	9951975	Motor Wartsila 12V32LN	3370
<b>Área de generadores</b>					
Generador G 0301	encendido	182194	9951989	Motor Wartsila 6L32LN	2126
Generador G 0301	apagado	182190	9951986	Motor Wartsila 6L32LN	2126
Generador G 0303	apagado	182185	9951984	Motor Wartsila 12V200	2026

PROYECCIÓN UTM PSAD 56  
FUENTE: OCP ECUADOR  
REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

La ubicación de las principales fuentes de ruido consideradas para la industria se presenta en la siguiente figura:

**Figura 3-12: Ubicación de las fuentes de ruido.**



FUENTE: OCP 2011  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

A continuación se presentan las fotografías de las fuentes de ruido dentro de la estación:

**Tabla 3-7: Registro fotográfico de las fuentes de ruido.**

		
Foto 1. Área de bombeo de Crudo.	Foto 2. Área de bombeo de Crudo	Foto 3. Área de bombeo de Crudo.
		
Foto 4. Bomba P 0301 A.	Foto 5. Bomba P 0301 B.	Foto 6. Bomba P 0301 C.
		
Foto 7. Bomba P 0301 D.	Foto 8. Bomba P 0301 E.	Foto 9. Bomba P 0301 F.
		
Foto 10. Área de generación eléctrica.	Foto 11. Área de generación eléctrica.	Foto 12. Área de generación eléctrica.



ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ &amp; LÓPEZ GRANJA, 2012)

En un estudio acústico es necesario también determinar cuáles son los receptores de ruido para saber cómo están siendo afectados. Para este caso, el principal afectado es el ser humano ya que está expuesto a altos niveles de energía acústica; por lo tanto se analiza cada zona para definir aquellas de mayor exposición.

**Tabla 3-8: Identificación de los receptores sensibles.**

RECEPTOR	ZONA SEGÚN EL USO DEL SUELO	LEQ (dBA)		UBICACIÓN (PSAD 56)	
		06H00 20H00	20H00 06H00	Este	Norte
Cuarto de Control	Industrial	70	65	182127	9951976
Mecánica	Industrial	70	65	182111	9952011
Garita de Control	Industrial	70	65	182219	9951923
Campamento	Residencial	50	40	182242	9951994
Campamento Militar	Residencial	50	40	181913	9951896
Vivienda	Residencial	50	40	181885	9952066

FUENTE: TULAS

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ &amp; LÓPEZ GRANJA, 2012)

Es importante conocer el tipo de zona según el uso del suelo, para establecer el límite permisible de ruido de acuerdo a la normativa.

La ubicación de los receptores sensibles se presenta en la siguiente figura:

**Figura 3-13: Ubicación de los receptores sensibles.**



FUENTE: OCP 2011

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

A continuación se presentan las fotografías de los receptores sensibles de ruido dentro de la estación:

**Tabla 3-9: Registro fotográfico de los receptores sensibles.**

<p>Foto 1. Cuarto de Control.</p>	<p>Foto 2. Mecánica</p>	<p>Foto 3. Campamento</p>
<p>Foto 4. Garita de Control</p>		

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### 3.2 MEDICIÓN DE LA PRESIÓN SONORA DE LAS FUENTES GENERADORAS DE RUIDO

En la estación Sardinias no todos los equipos funcionan simultáneamente, estos trabajan en fusión de la capacidad de crudo que se requiera bombear y alternadamente para facilitar las operaciones de mantenimiento por tanto, durante el monitoreo, las siguientes fuentes de ruido se encontraban en funcionamiento: Generador G-0301, Bomba Principal P-0301A y Bomba Principal P-0301B.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el monitoreo efectuado el 05 de diciembre de 2010.

**Tabla 3-10: Resultados de ruido industrial diurno Estación Sardinias.**

CÓDIGO	NIVEL DE PRESIÓN SONORA EN BANDAS DE OCTAVA. (dBA)										LEQ (dBA)
	16Hz	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	
P 0301 A	21.7	52.9	66.9	75.8	86.3	94.4	98.9	95.6	95.5	86.90	102.80
P 0301 B	28.9	48.4	69.8	77.6	88.6	98	101.7	98.5	100.1	91.90	106.20
G 0301	28.8	56	70.1	81.5	86.2	94	97	91.9	90.2	81.40	100.40

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Nota: es importante mencionar que los valores del Nivel de Presión Sonora de la Bomba P 0301B están influenciados por el nivel de ruido de la bomba P 0301A.

En el anexo fotográfico se puede observar los equipos y la infraestructura en la estación sardinias.

La medición de los niveles de presión sonora de los emisores de ruido se observa en el siguiente registro fotográfico.

**Tabla 3-11: Medición de los niveles de presión sonora de las fuentes de ruido.**

		
<p>Foto 1. Medida del Nivel de Presión Sonora en el área de Bombeo.</p>	<p>Foto 2. Medida del Nivel de Presión Sonora en el área de Bombeo.</p>	<p>Foto 3. Medida del Nivel de Presión Sonora en el área de Bombeo.</p>
		
<p>Foto 4. Medida del Nivel de Presión Sonora en el área de Generación</p>	<p>Foto 5. Medida del Nivel de Presión Sonora en el área de Generación</p>	

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### **3.3 INVENTARIO DE LAS MEDIDAS DE ATENUACIÓN DE RUIDO EXISTENTES**

#### **3.3.1 BARRERAS**

En la inspección realizada a la estación Sardinias el 31 de agosto del 2011 se pudo registrar la existencia de medidas de atenuación de ruido dentro de la zona industrial.

Para el área de generación eléctrica se ha tratado de solucionar el excesivo ruido producido por los motores, encerrando los generadores en un galpón constituido por tres paredes de láminas de galvalume (acero revestido con una aleación de aluminio zinc) de un espesor de 0.30mm. Además fuera de este galpón se ha situado una barrera de acero con un espesor de 3 mm. con el fin de reducir el ruido incidente en el campamento como se puede apreciar a continuación.

**Tabla 3-12: Medidas de atenuación de ruido en el área de generadores.**

		
Foto 1. Área de Generación Eléctrica.	Foto 2. Área de Generación Eléctrica y Barrera acústica.	Foto 3. Barrera del área de Generación Eléctrica

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Sin embargo en el área de bombeo no se registro alguna medida de aislamiento acústico, solo existe una pared divisoria entre las bombas. Por otra parte el cuarto de control cuenta con paredes revestidas por materiales de aislamiento acústico y con ventanas dobles.

**Tabla 3-13: Medidas de atenuación de ruido en el área de bombas y cuarto de control.**

		
Foto 1. Área de Bombeo de Crudo.	Foto 2. Pared divisoria en el área de bombas	Foto 3. Cuarto de Control.

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Además, también se considero como barreras las instalaciones que influyen en la propagación del sonido, como son: mecánica, bodega de contingencia, campamento y algunos tanques de almacenamiento.

**Tabla 3-14: Infraestructura considerada como barreras.**

		
<p>Foto 1. Bodega de Contingencias.</p>	<p>Foto 2. Mecánica</p>	<p>Foto 3. Tanques de Almacenamiento de Crudo.</p>

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

En la siguiente figura se observa la ubicación de las instalaciones consideradas como barreras:

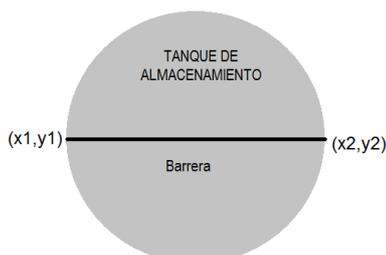
**Figura 3-14: Ubicación de infraestructura y barreras**



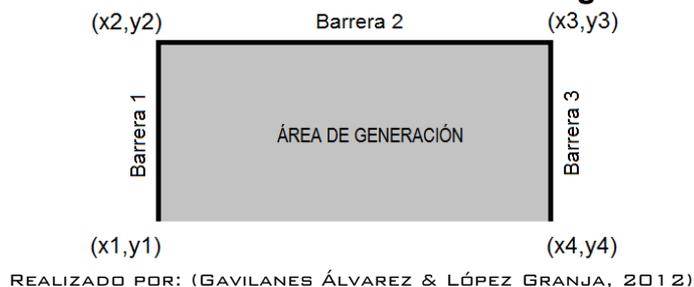
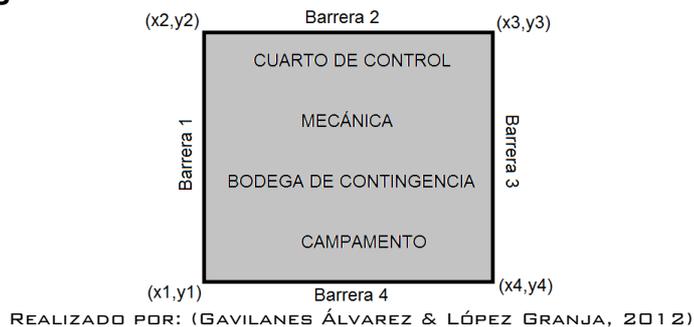
FUENTE: OCP ECUADOR  
 REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Nota: Los tanques se consideraron como una barrera perpendicular a la propagación del sonido. Además cada pared de los cuartos se tomaron como barreras individuales (en total cuatro barreras una por cada pared). Como se muestra en las siguientes figuras:

**Figura 3-15: Consideración de los Tanques de Almacenamiento como barreras.**



REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Figura 3-16: Barreeras consideradas en el Área de generación Eléctrica.****Figura 3-17: Barreras consideradas en los cuartos.**

En la siguiente tabla se puede apreciar las dimensiones de las barreras consideradas en la Estación Sardinias.

**Tabla 3-15: Coordenadas y dimensiones de la infraestructura considerada como barreras acústicas**

<b>CÓDIGO</b>	<b>ALTURA(M)</b>	<b>ANCHO(M)</b>	<b>ESPEJOR(CM)</b>
Barrera Área de Generación	6.0	8	0.3
Pared Área de Bombas	12.5	14	20
Área de Generación (Barrera 1)	12.5	10	0.03
Área de Generación (Barrera 2)	12.5	29	0.03
Área de Generación (Barrera 3)	12.5	10	0.03

<b>CÓDIGO</b>	<b>ALTURA(M)</b>	<b>ANCHO(M)</b>	<b>ESPEJOR(CM)</b>
Cuarto de Control (Barrera 1)	4.5	14	
Cuarto de Control (Barrera 2)	4.5	17	
Cuarto de Control (Barrera 3)	4.5	12	
Cuarto de Control (Barrera 4)	4.5	16	
Mecánica (Barrera 1)	9.0	18	0.03
Mecánica (Barrera 2)	9.0	12	0.03
Mecánica (Barrera 3)	9.0	18	0.03
Mecánica (Barrera 4)	9.0	12	0.03
Bodega de Contingencia (Barrera 1)	8.5	10	0.03
Bodega de Contingencia (Barrera 2)	8.5	21	0.03
Bodega de Contingencia (Barrera 3)	8.5	10	0.03
Bodega de Contingencia (Barrera 4)	8.5	21	0.03
Campamento (Barrera 1)	3.5	47	20
Campamento (Barrera 2)	3.5	9	20
Campamento (Barrera 3)	3.5	47	20
Campamento (Barrera 4)	3.5	10	20
TK 0305	10.5	22	

CÓDIGO	ALTURA(M)	ANCHO(M)	ESPESOR(CM)
TK 0306	6.0	11	
TK 0307	6.0	10	
TK 0313	8.5	14	
TK 0318	9.5	22	
Cubeto Frente	1.5	75	20
Cubeto Atrás	1.5	75	20

FUENTE: OCP ECUADOR  
 REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

La determinación de las dimensiones de la infraestructura considerada en la tabla anterior se aprecia en las siguientes fotografías:

**Tabla 3-16: Dimensionamiento de la infraestructura.**



ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

### 3.3.2 ZONAS INDUSTRIALES Y FOLLAJE

La infraestructura de la Estación Sardinias provoca distintos fenómenos en la propagación del sonido tales como: reflexión múltiple, difusión y difracción. Estos fenómenos ocurren debido a la presencia de obstáculos dispersos que interceptan las trayectorias de propagación de las ondas sonoras. (Ver Sitios industriales (Asite)).

El follaje de árboles y arbustos también contribuyen en esta atenuación, pero sólo si son lo suficientemente densos como para bloquear por completo la visión a lo largo de la trayectoria de propagación. (Ver Influencia del Follaje (Afol))

En la inspección realizada a la estación Sardinas el 31 de agosto del 2011 se pudo constatar que existe un área con vegetación frondosa, por lo que se la considera como una zona de follaje y además se establecieron siete zonas industriales, que se muestran en la siguiente figura:

**Figura 3-18: Identificación de zonas industriales y zona de follaje**



FUENTE: OCP ECUADOR  
REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Las dimensiones de estas zonas industriales y del follaje se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3-17: Dimensiones de las zonas industriales y del follaje**

<b>CÓDIGO</b>	<b>ALTURA(M)</b>	<b>ÁREA (M<sup>2</sup>)</b>
Zona Industrial 1	3.5	9373.9
Zona Industrial 2	25.0	1322.3
Zona Industrial 3	3.0	975.9
Zona Industrial 4	2.0	1018.2

<b>CÓDIGO</b>	<b>ALTURA(M)</b>	<b>ÁREA (M<sup>2</sup>)</b>
Zona Industrial 5	4.0	376.3
Zona Industrial 6	3.0	1061.0
Zona Industrial 7	3.0	669.1
Follaje	17.5	359.0

REALIZADO POR: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Tabla 3-18: Zonas industriales y follaje.**



ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

## CAPÍTULO 4

### APLICACIÓN

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE LAS FUENTES DE GENERACIÓN DE RUIDO

Durante el monitoreo realizado el 5 de diciembre del 2010 los equipos en funcionamiento que se consideraron como fuentes de ruido fueron: Generador G-0301, Bomba Principal P-0301A y Bomba Principal P-0301B. Por tanto, en este título se determinaran sus características acústicas.

Las bombas principales presentes en el área industrial son relativamente iguales en sus componentes y funcionamiento de ahí que se han considerado que mantienen características acústicas similares, en tal virtud el ruido generado por la bomba principal P 0301 A, es asumido para el resto de bombas en su análisis.

Con este mismo criterio se ha asumido que los generadores eléctricos G 0301 y G 0302 mantienen características acústicas similares; sin embargo no se cuenta con información para el análisis del generador G 0303; ya que no se encontraba en funcionamiento en el día de muestreo de ruido.

**Tabla 4-1: Valores del nivel de potencia sonora de las fuentes de ruido en el área industrial.**

CÓDIGO	NIVEL DE POTENCIA SONORA EN BANDAS DE OCTAVA PARA UN ÁREA DE UN METRO CUADRADO ALREDEDOR DE LA FUENTE. (dBA)										Leq (dBA)
	16Hz	31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	
P 0301 A	21.7	52.9	66.9	75.8	86.3	94.4	98.9	95.6	95.5	86.90	102.80
G 0301	28.8	56	70.1	81.5	86.2	94	97	91.9	90.2	81.40	100.40

**Tabla 4-2: Características acústicas de interés de las fuentes de ruido.**

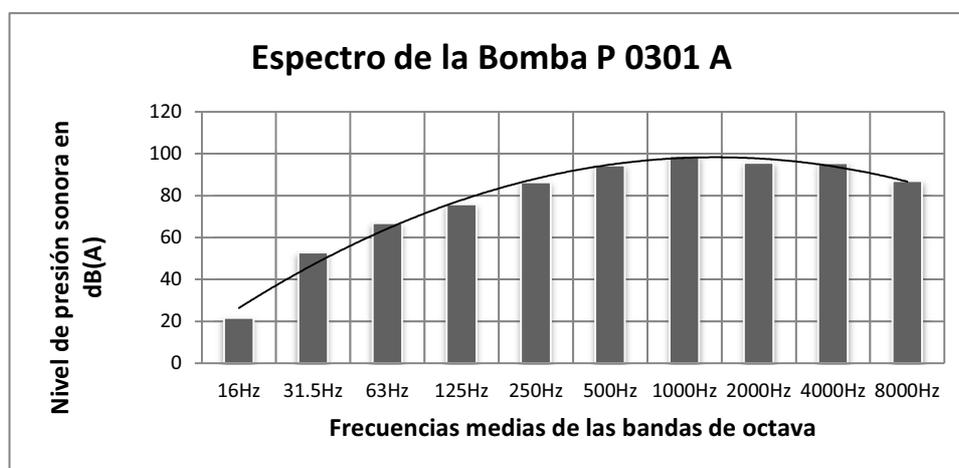
<i>FUENTES DE RUIDO</i>	<i>NIVEL DE POTENCIA SONORA (dBA)</i>	<i>PRESIÓN EFECTIVA (PA)</i>	<i>INTENSIDAD SONORA (VATIOS /m<sup>2</sup>)</i>	<i>POTENCIA SONORA (VATIOS)</i>
Bomba P 0301 A	102.8	2.76077	0.018463767	0.019054607
Generador G 0301	100.4	2.09426	0.010624789	0.010964782

REALIZADO POR (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Otra característica de gran interés es la directividad de las fuentes de ruido, sin embargo para la modelación se asumió que eran omnidireccionales; ya que la infraestructura de la zona industrial es compleja y resulta riesgoso ingresar con los equipos para determinar esta variable. Además se debe considerar que las fuentes de ruido trabajaban simultáneamente y no es posible detener el funcionamiento de alguna de ellas, factor que interfiere en la directividad.

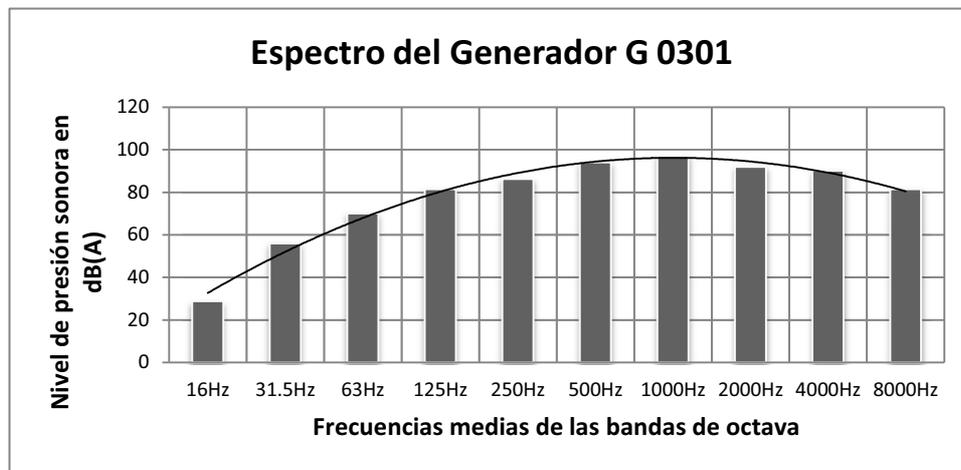
El ruido industrial tiene estructura compleja y se muestra como una curva de la suma de infinitas senoidales de todas las frecuencias, por tanto es importante determinar el espectro de ruido que no es más que la representación de la distribución de la energía sonora en función de la frecuencia.

**Figura 4-1: Espectro de frecuencias de la onda sonora de las bombas principales**



REALIZADO POR (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Figura 4-2: Espectro de frecuencias de la onda sonora de los generadores G 0301 y G 0302**



REALIZADO POR (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

## 4.2 IDENTIFICACIÓN DE COEFICIENTES DE ATENUACIÓN POR ABSORCIÓN ACÚSTICA

El coeficiente de atenuación por absorción acústica ( $\alpha_a$ ) es la relación entre la energía acústica absorbida y la incidente sobre un material por unidad de superficie (Ver Ecuaciones (2-45) y (2-46))

El coeficiente de absorción para un material está en función de:

- La naturaleza del material,
- La frecuencia del sonido
- El ángulo con que incide la onda sonora sobre la superficie.

Nota: ya que el coeficiente de absorción varía con la frecuencia, se suelen tomar los rangos de frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz (según Norma UNE 74041-80 Medida de Coeficientes de Absorción en Cámara Reverberante, equivalente a la ISO 354-1963). (Marín, 2001)

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de absorción acústica en función de la frecuencia para distintos materiales empleados habitualmente en la construcción:

**Tabla 4-3: Coeficiente de absorción de varios materiales**

<i>MATERIAL</i>	<i>FRECUENCIA (Hz)</i>					
	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>
Hormigón sin pintar	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Hormigón pintado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Madera en paneles	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
Paneles de madera a 5cm de la pared	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
Madera aglomerada en panel	0.47	0.52	0.50	0.55	0.58	0.63
Filtro asbesto (1cm)	-	-	0.35	0.30	0.23	-
Filtro de papel y asbesto	-	-	0.38	0.55	0.46	-
Filtro sobre pared (3cm)	0.13	0.41	0.56	0.69	0.65	0.49
Corcho (3cm)	0.08	0.08	0.30	0.31	0.28	0.28
Corcho perforado y pegado a la pared	0.14	0.32	0.95	0.90	0.72	0.65
tapices	0.14	0.35	0.55	0.75	0.70	0.60
Ladrillo visto	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
Ladrillo pintado	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02

<b>MATERIAL</b>	<b>FRECUENCIA (Hz)</b>					
	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
Enlucido de yeso sobre ladrillo	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Enlucido de yeso sobre cemento	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.03
Enlucido de cal	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Placa de yeso de 12 mm a 10 cm	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Alfombra sobre cemento	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
vidrio	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Mármol o azulejos	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Parquet de madera	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Goma con un espesor de 0.5cm	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
Cortina (475 g/m <sup>2</sup> )	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Superficie de piscina llena de agua	0.008	0.008	0.013	0.015	0.020	0.25
Cajas de huevos	0.01	0.07	0.44	0.61	0.48	0.69

FUNTES: (MARÍN, 2001), (LÓPEZ, 2000)

**Tabla 4-4: Coeficientes de absorción para materiales de atenuación disponibles en el mercado**

<i>MATERIALES ACÚSTICOS DEL MERCADO</i>	<i>FRECUENCIA (Hz)</i>					
	<i>125</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2000</i>	<i>4000</i>
Espuma de poliuretano de 35 mm (Fonac)	0.11	0.14	0.36	0.82	0.92	0.97
Espuma de poliuretano de 50 mm (Fonac)	0.15	0.25	0.50	0.94	0.92	0.99
Espuma de poliuretano de 75 mm (Fonac)	0.17	0.44	0.99	1.00	1.00	1.00
Espuma de poliuretano de 35 mm (Sonex)	0.06	0.20	0.45	0.71	0.95	0.89
Espuma de poliuretano de 50 mm (Sonex)	0.07	0.32	0.72	0.88	0.97	1.00
Espuma de poliuretano de 75 mm (Sonex)	0.13	0.53	0.90	1.00	1.00	1.00
Lana de vidrio de 1.4 kg/m <sup>3</sup> y 25mm de espesor	0.15	0.25	0.40	0.50	0.65	0.70
Lana de vidrio de 1.4 kg/m <sup>3</sup> y 50mm de espesor	0.25	0.45	0.70	0.80	0.85	0.85
Lana de vidrio de 35 kg/m <sup>3</sup> y 25mm de espesor	0.20	0.40	0.80	0.90	1.00	1.00
Lana de vidrio de 35 kg/m <sup>3</sup> y 50mm de espesor	0.30	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00

FUENTES: FUNTES:(MARÍN, 2001), (LÓPEZ, 2000)

### **4.3 MODELO DE ATENUACIÓN EN MEDIO ATMOSFERICO.**

Una forma básica y simplificada de modelar la atenuación de ruido en medio atmosférico, es considerar el fenómeno de divergencia geométrica que corresponde a la propagación de un frente de onda esférico en campo libre desde una fuente puntual. Por tanto la energía sonora por unidad de superficie es cada vez menor. Este modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$NPS = Leq_{fuente} - \left[ 20 \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + 11 \right]$$

(4-1)

Donde:

*NPS*, Nivel de presión sonora a una distancia *d*, en *dB*A

*Leq<sub>fuente</sub>*, Nivel de presión sonora equivalente de la fuente de ruido, en *dB*A

*d*, es la distancia desde la fuente hasta el receptor, en metros

*d<sub>0</sub>*, es la distancia de referencia (= 1 m).

Con los datos del Generador G 0301, se procede a calcular el Nivel de Presión Sonora esperado a una distancia de 500 metros.

$$NPS = 104.5 - \left[ 20 \log \left( \frac{500}{1} \right) + 11 \right]$$

$$NPS = 61.52 \text{ dB}A$$

Es importante mencionar que este modelo solo considera la divergencia geométrica, excluyendo los demás factores que influyen en la propagación del sonido. Por tanto el resultado obtenido es solo referencial.

#### **4.4 MODELO ISO 9613**

Para facilitar el trabajo de la modelación de atenuación de ruido en base a los algoritmos de la norma ISO 9613, especificados en el título 2.4, se ha utilizado el Software SPM9613.

##### **4.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA DE MODELACIÓN ACÚSTICA SPM9613**

El programa se basa en los algoritmos de las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996, con este software se obtienen las predicciones de los niveles sonoros en

ponderación A y C en receptores específicos y también en contornos de niveles sonoros.

El programa fue desarrollado y optimizado por Power Acoustics Inc. para estimar y predecir el ruido de fuentes industriales. Permite realizar predicciones de fuentes múltiples e incluye adicionar los obstáculos y superficies reflectantes. Es extremadamente flexible y fácil de usar.(Power Acoustic Inc.)

Puede ingresarse un máximo de:

- 200 Fuentes
- 200 Barreras
- 200 Zonas industriales y follaje
- 48 Observadores
- 121 Observadores de contorno

Sin embargo, una de las limitaciones que posee el programa es que deja por fuera modelos de predicción de ruido para carreteras, ferrocarriles y aeropuertos.

#### **4.4.2 MODELACIÓN EN EL PROGRAMA SPM9613.**

Todos los datos que se obtuvieron en campo y en gabinete fueron ingresados en el programa, de tal forma que se trato de representar la realidad en la medida de lo posible. La información ingresada fue:

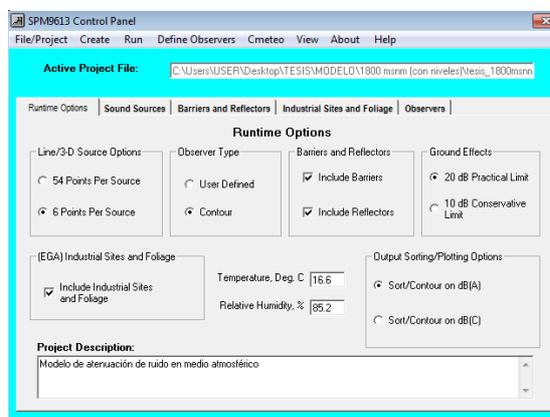
- Las condiciones climáticas
- Las fuentes sonoras
- Las barreras artificiales y naturales
- La infraestructura
- El tipo de suelo

- Los Observadores

Nota: Los observadores son puntos donde el programa determinara el nivel de presión sonora, los cuales tuvieron las mismas coordenadas que los puntos del monitoreo de ruido realizado por la consultora Cardno Entrix, para así poder comparar los resultados. (Ver Figura 5-3)

A continuación se presenta las figuras del ingreso de datos:

**Figura 4-3: Ingreso de las condiciones iniciales del modelo de atenuación de ruido.**



FUENTE: SPM9613; SEGUNDA VERSIÓN - 2002

Una vez ingresada la información se corrió el programa para obtener los resultados, los cuales se interpolan y representaran en un mapa georeferenciado.

**Figura 4-4: Resultados del modelo obtenidos en el programa SPM9613.**

Sources	16	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	dB(A)	dB(C)
Total of Sources	22.9	52.3	67.0	75.7	86.3	94.6	98.9	95.6	95.8	87.0	102.8	102.6
P-0301A	20.9	52.1	66.1	75.0	85.5	93.6	98.1	94.8	94.6	85.8	101.9	101.6
P-0301B	18.5	38.0	53.4	67.2	78.2	87.6	91.3	88.0	89.5	80.8	95.6	95.3
G-0301	04.0	31.2	45.3	57.2	62.5	70.3	73.3	68.0	65.5	53.1	76.0	76.4

FUENTE: SPM9613; SEGUNDA VERSIÓN - 2002

#### 4.5 DETERMINACIÓN DE CURVAS DE ATENUACIÓN

Como ya se ha mencionado, un sonido emitido en campo libre desde una fuente puntual hipotéticamente omnidireccional, presenta una atenuación en la que el nivel de presión sonora será inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (es decir, cada vez que se duplica la distancia de propagación del sonido, el nivel de presión sonora es atenuado en 6 dB)

Con este antecedente y con la ayuda del software SPM9613 se han determinado las curvas de atenuación del sonido en función de la distancia, para las fuentes generadoras de ruido. Considerando que la Bomba P-0301A representa el comportamiento de las demás bombas y que el generador G-0301 representa el comportamiento del generador G-0302, por presentar características similares.

Los valores de ruido obtenidos conjuntamente con la distancia para las diferentes fuentes se presentan en la siguiente tabla:

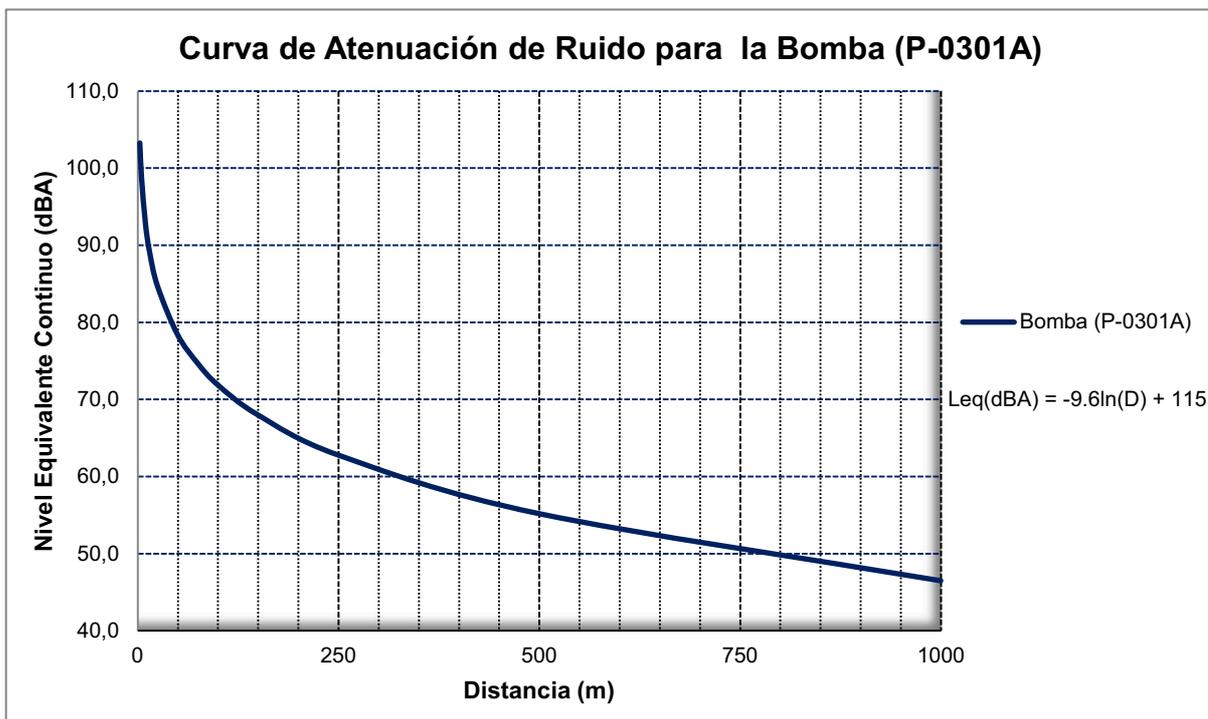
**Tabla 4-5: Nivel de Presión Sonora a varias distancias de las Fuentes.**

	FUENTE	DISTANCIA (m)							
		5	10	25	50	100	250	500	1000
Nivel de Presión Sonora (dBA)	Generador (G-0301)	96.9	90.9	82.8	76.6	70.2	61.3	54.0	45.6
	Bomba (P-0301A)	98.9	92.8	84.7	78.4	71.9	62.8	55.2	46.5

FUENTE: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

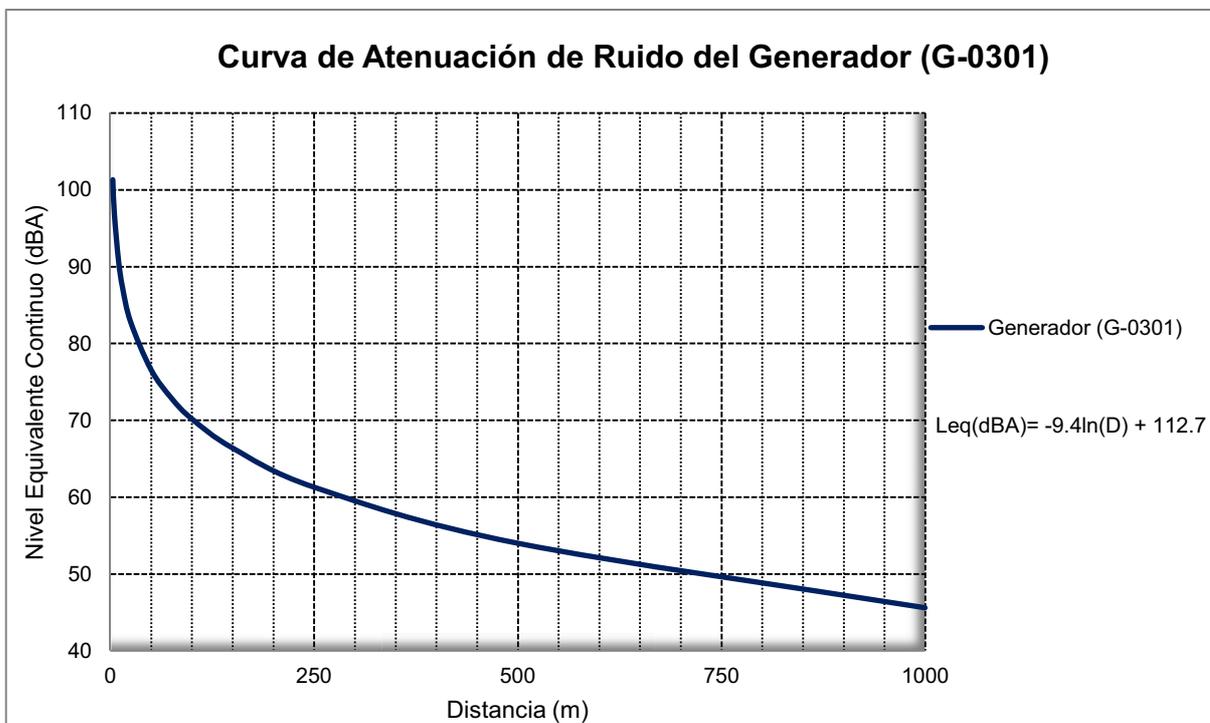
Estos resultados se ajustan estadísticamente a una ecuación logarítmica, la cual servirá para calcular la reducción del ruido desde la fuente hasta una distancia determinada.

**Figura 4-5: Curva de Atenuación de Ruido para las Bombas**



FUENTE: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Figura 4-6: Curva de Atenuación de Ruido para los Generadores G-0301 y G-0302**



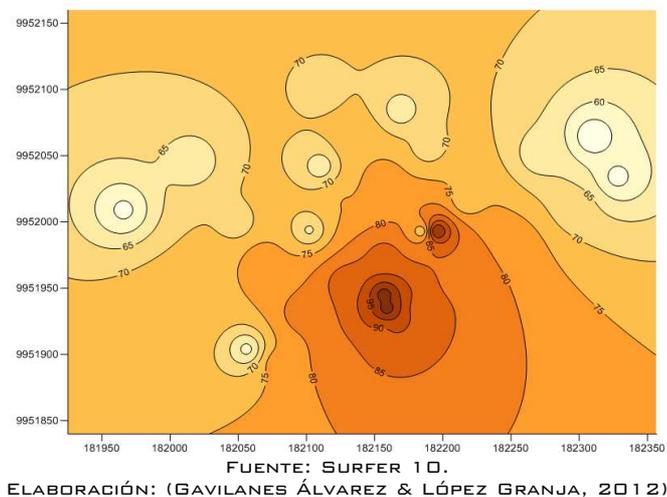
FUENTE: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

#### 4.6 INTERPOLACION DE LOS PUNTOS DE RUIDO (RESULTADOS)

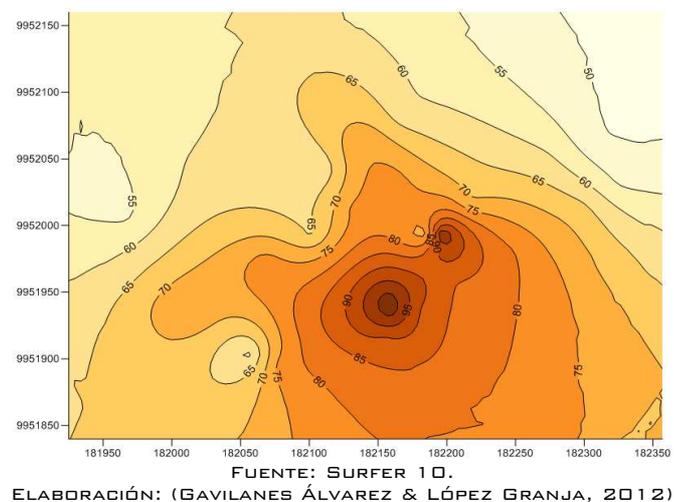
Previo a realizar la interpolación de los resultados, primero se determinó cuál es el método que mejor se ajusta a la propagación del sonido, si el de Kriging o el IDW, para lo cual se trabajó en el programa Surfer 10.

Se introdujo la información de los Niveles de Presión Sonora arrojados por el modelo y se realizó la interpolación, las figuras que se obtuvieron son las siguientes:

**Figura 4-7: Interpolación de los resultados del Modelo con el método IDW.**



**Figura 4-8: Interpolación de los resultados del Modelo con el método Kriging.**

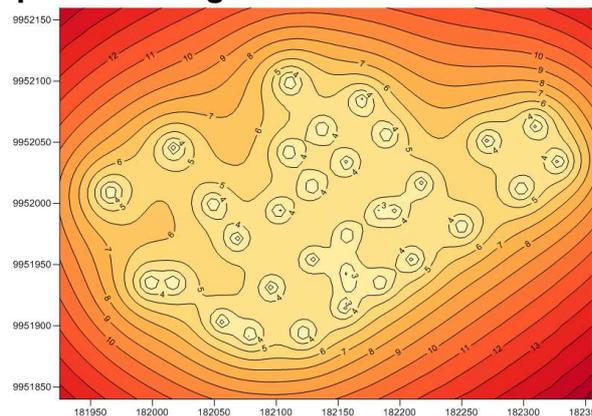


Al comparar las figuras anteriores se puede apreciar que la interpolación con el método IDW presenta seis zonas con cambio en el comportamiento normal de la atenuación del sonido en medio atmosférico, mientras que con la interpolación Kriging tan solo se presenta una zona en donde ocurre este fenómeno. Por lo cual se utilizara el segundo método.

Sin embargo se debe determinar cuál es la función del variograma que mejor se ajuste a nuestro modelo. Se esperaría que fuera una función logarítmica, ya que así es el comportamiento de la atenuación del sonido en medio atmosférico.

Representar las desviaciones estándares de las distintas funciones del método, ayuda a eliminar las funciones que no tienen relación con el caso de estudio. Se realiza las representaciones para una función lineal, logarítmica y exponencial.

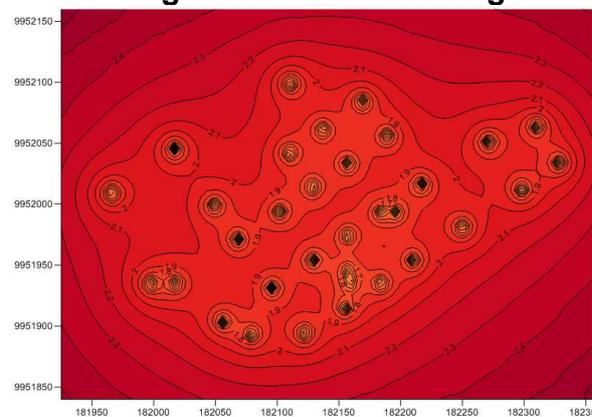
**Figura 4-9: Representación de la desviación estándar con el método kriging para el variograma con función lineal.**



FUENTE: SURFER 10.

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

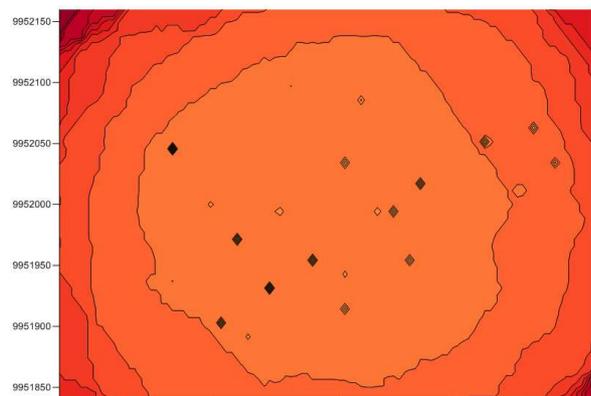
**Figura 4-10: Representación de la desviación estándar con el método kriging para el variograma con función logarítmica.**



FUENTE: SURFER 10.

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

**Figura 4-11: Representación de la desviación estándar con el método kriging para el variograma con función exponencial.**



FUENTE: SURFER 10.

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Es importante mencionar que las figuras anteriores muestran las isolíneas de los valores de desviaciones estándares para la interpolación de los datos con diferentes funciones. Estas representaciones no son susceptibles de comparación ya que sus valores están en diferentes escalas, pero se observa que los métodos que más se ajustan al fenómeno de propagación del sonido son el lineal y el logarítmico.

Para saber cuál es el mejor método de interpolación, se extrae ciertos parámetros estadísticos que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4-6: Datos estadísticos de la interpolación con Kriging para una función lineal y logarítmica.**

<i>FUNCIÓN DEL VARIOGRAMA</i>	<i>VARIANZA</i>	<i>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</i>	<i>ERROR ESTÁNDAR</i>	<i>VALOR MÍNIMO DE DESVIACIÓN</i>	<i>VALOR MÁXIMO DE DESVIACIÓN</i>
Lineal	9.9024	3.1470	0.0417	1.3	17.3
Logarítmico	0.0572	0.2392	0.0032	1.0	14.0

FUENTE: SURFER 10.

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Como se puede apreciar en la Tabla 4-6, el método logarítmico presenta menores valores, por lo tanto es el método que más se ajusta a nuestro caso, como se asumió con anterioridad.

Por todo lo antes mencionado la interpolación de los resultados se realizará utilizando el método Kriging con una función logarítmica.

En la Figura 5-4, se puede apreciar los resultados de la interpolación del modelo de atenuación de ruido en medio atmosférico, para el caso de la estación Sardinias.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 5.1 REPRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MONITOREO DE RUIDO EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

La consultora ambiental Cardno Entrix realizó un monitoreo de ruido en la estación Sardinas el 04 y 05 de diciembre de 2010, donde se obtuvieron los siguientes resultados:

**TABLA 5-1: Resultados de ruido industrial en la Estación Sardinas.**

ID	UBICACIÓN		Leq (dBA)	OBSERVACIONES
	ESTE	NORTE		
I1	182328	9952034	55,0	Ruido de la estación, aves, anfibios
I7	182310	9952064	51,4	Ruido de la estación, aves, anfibios, ruido del estero
PN	182250	9951981	70,6	Ruido de la estación, vehículos a lo lejos, aves, piscinas API
G1	182298	9952012	68,2	Ruido de las bombas principales, vehículos, aves, anfibios, piscina API
G2	182271	9952051	65,2	Ruido de las bombas principales, aves, piscina API
F2	182217	9952016	73,3	Ruido de las bombas principales, aves, piscina API
F3	182189	9952056	71,9	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
F4	182169	9952084	69,4	Ruido de las bombas principales, aves, generadores

ID	UBICACIÓN		Leq (dBA)	OBSERVACIONES
	ESTE	NORTE		
E5	182111	9952099	66,2	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
E4	182137	9952061	66,0	Ruido de las bombas principales, ruido intenso de aves, generadores
D4	182110	9952042	66,6	Ruido de las bombas principales, aves, generadores, insectos y anfibios
B5	182017	9952045	57,0	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
A5	181966	9952009	55,9	Ruido de generadores, aves, vehículos e insectos
B4	182049	9951999	65,9	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
A4	181998	9951935	59,7	Ruido de las bombas principales, aves, generadores, vehículos en la carretera
A3	182017	9951935	71,1	Ruido de las bombas principales, aves, generadores, vehículos en la carretera
B3	182068	9951971	72,0	Ruido de bombas auxiliares y principales, generadores, aves
C3	182102	9951994	71,4	Ruido de bombas auxiliares y principales, generadores, aves, vehículos
D3	182129	9952014	75,1	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
E3	182157	9952033	73,4	Ruido de bombas principales y generadores
E2	182184	9951993	83,9	Ruido de los generadores

ID	UBICACIÓN		Leq (dBA)	OBSERVACIONES
	ESTE	NORTE		
G-0301	182298	9952012	100,2	Ruido del generador G-0301
E1	182210	9951954	79,3	Ruido de los generadores y aves
D1	182184	9951935	88,3	Ruido de bombas principales y aves
C1	182155	9951915	88,8	Ruido de las Bombas principales, aves
B1	182122	9951894	78,6	Ruido de las Bombas principales, aves, anfibios
PE5	182079	9951893	76,6	Ruido de las Bombas principales, aves
A2	182056	9951904	62,1	Ruido de las Bombas principales, aves, vehículos en la carretera
B2	182096	9951931	77,2	Ruido de las Bombas principales, aves
C2	182129	9951954	92,3	Ruido de las Bombas principales
D2	182157	9951974	89,3	Ruido de las Bombas principales y generadores
BPB	182157	9951945	105,8	Ruido de las Bombas principales BPA y BPB
BPA	182159	9951935	104,4	Ruido de las Bombas principales BPA y BPB

FUENTE:(CARDNO ENTRIX, 2010)

En la Figura 5-3 se presenta la ubicación de los puntos de monitoreo de ruido dentro del área industrial de la Estación de bombeo Sardinias y la interpolación de estos datos se presenta en la Figura 5-5.

### 5.1.1 VALIDEZ DE LOS RESULTADOS DEL MONITOREO DE RUIDO

El monitoreo de ruido está sujeto a varias condiciones instantáneas durante la medición del nivel de presión sonora, que resulta en una inexactitud del valor real.

Entre los aspectos que más influyen en la precisión de la medición del nivel de presión sonora están los siguientes.

- Calibración del sonómetro. Con el fin de tener un grado de certeza en la medición, se debe realizar la calibración del instrumento utilizando un calibrador externo, previo al monitoreo.
- Exactitud en la ubicación geográfica de los puntos monitoreados. La propagación del sonido en función de la distancia se ajusta bastante a una ecuación logarítmica, por lo cual la posición exacta de los puntos de monitoreo es muy importante para tener un valor real.
- Ruidos externos. En un monitoreo de ruido es prácticamente inevitable tener la influencia de ruidos externos, porque durante cada medición entra de manera ineludible productores de ruido ocasionales (como ejemplo el paso de vehículos, animales, conversaciones, entre otros). De tal forma que la medición del nivel de presión sonora no es exacta.
- Fenómeno de Turbulencia. Cuando se realiza el monitoreo de las fuentes fijas se debe considerar que la distancia apropiada para caracterizarlas debe ser el doble de la longitud mayor de la fuente, de esta manera se evita el fenómeno de turbulencia que se presenta cerca del emisor de ruido.

Durante el monitoreo realizado por la consultora Cardno Entrix en diciembre del 2010, se determinó el nivel de presión sonora de las fuentes de ruido a tres metros de estas, por lo que los resultados probablemente presentan errores por este fenómeno.

- Reflexión por objetos. Cuando se realiza un monitoreo del nivel de ruido producido por una fuente fija es importante recordar el fenómeno de

reflexión de las ondas sonoras, pues la medida final puede verse afectada por un rebote de la onda.

- La dinámica en las condiciones operativas de la industria. Los resultados de un monitoreo de ruido pueden variar en función de las condiciones operativas de la industria, por eso es importante considerar la bitácora de operación, ya que no es lo mismo tener un monitoreo con una fuente operativa a tener varias simultáneamente.
- Las condiciones del medio, varían durante el tiempo que demande el monitoreo de toda el área industrial, en consecuencia los resultados de cada punto no responden a las mismas condiciones externas. Igualmente la temperatura ambiente puede variar, ya que monitorear una facilidad puede tomar varias horas del día, e incluso varios días.
- A lo largo del día puede variar tanto la temperatura como la humedad relativa, asociada a la presencia de viento e insolación.

En conclusión los valores reportados por el monitoreo, no pueden ser consideradas como óptimos o las características del área industrial.

## **5.2 MAPAS TEMÁTICOS**

A continuación se presentan Los mapas temáticos como resultado del presente proyecto de titulación.

Figura 5-1. Mapa de Ubicación Geográfica.

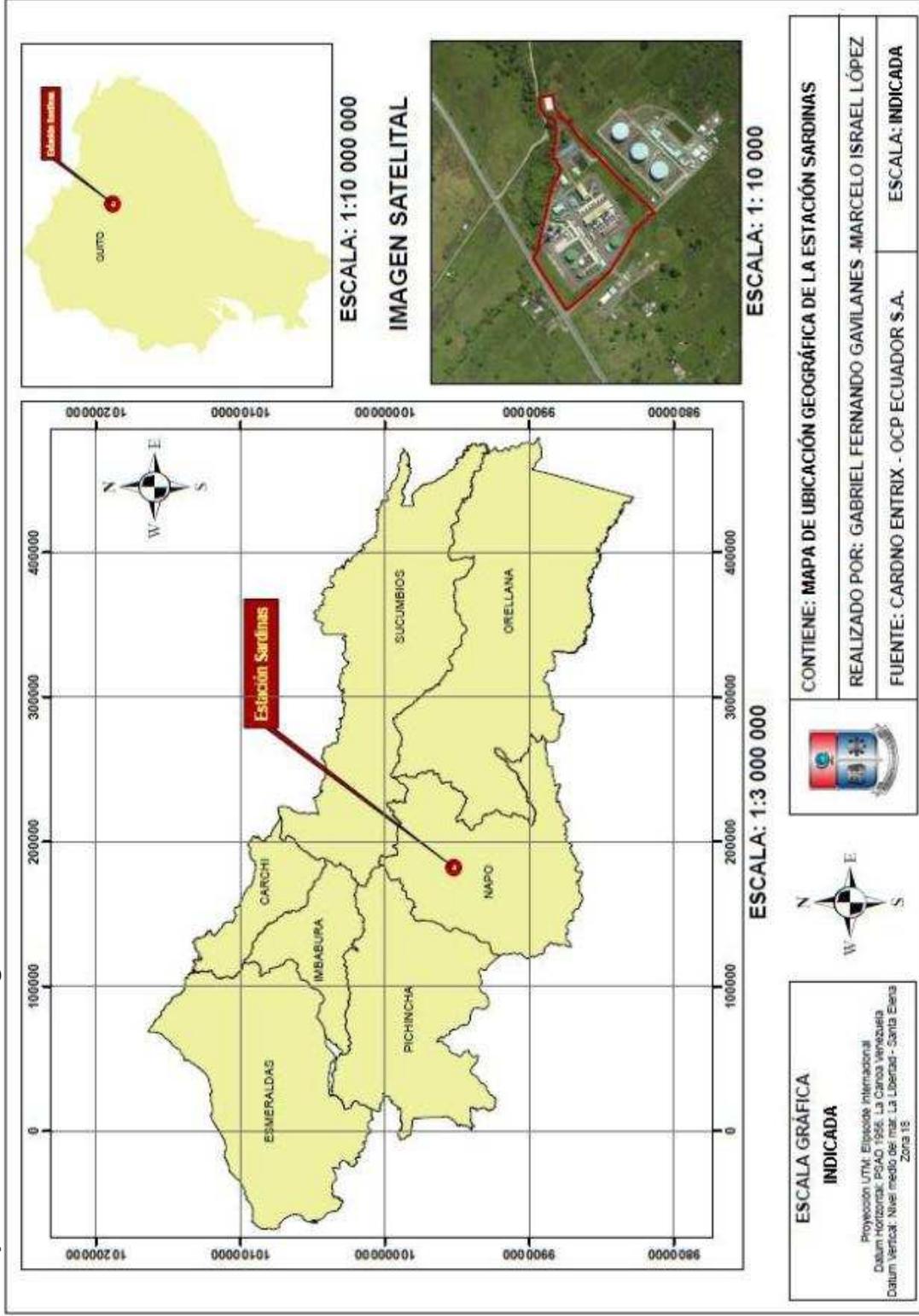


Figura 5-2. Mapa de Uso de Suelo.

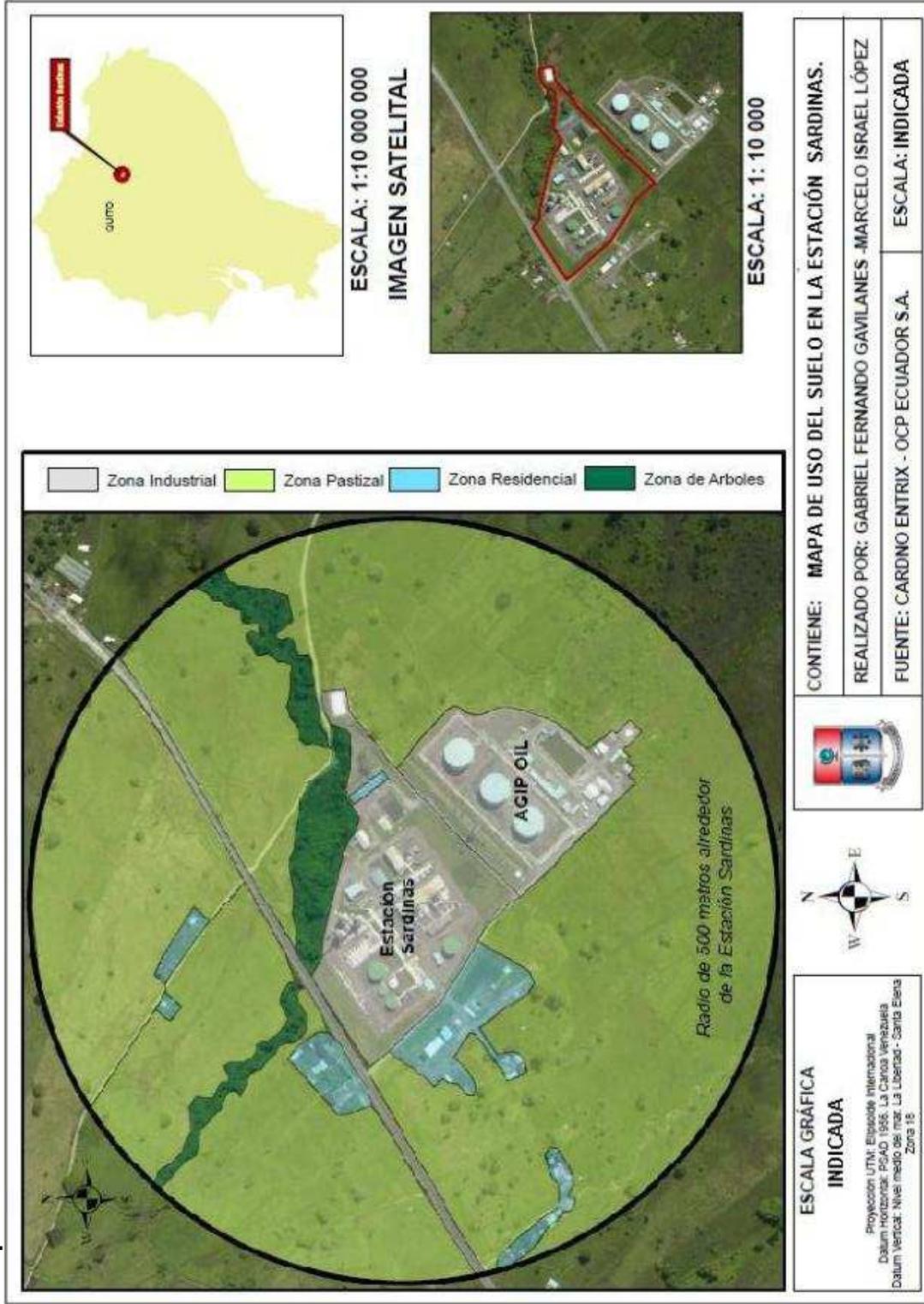
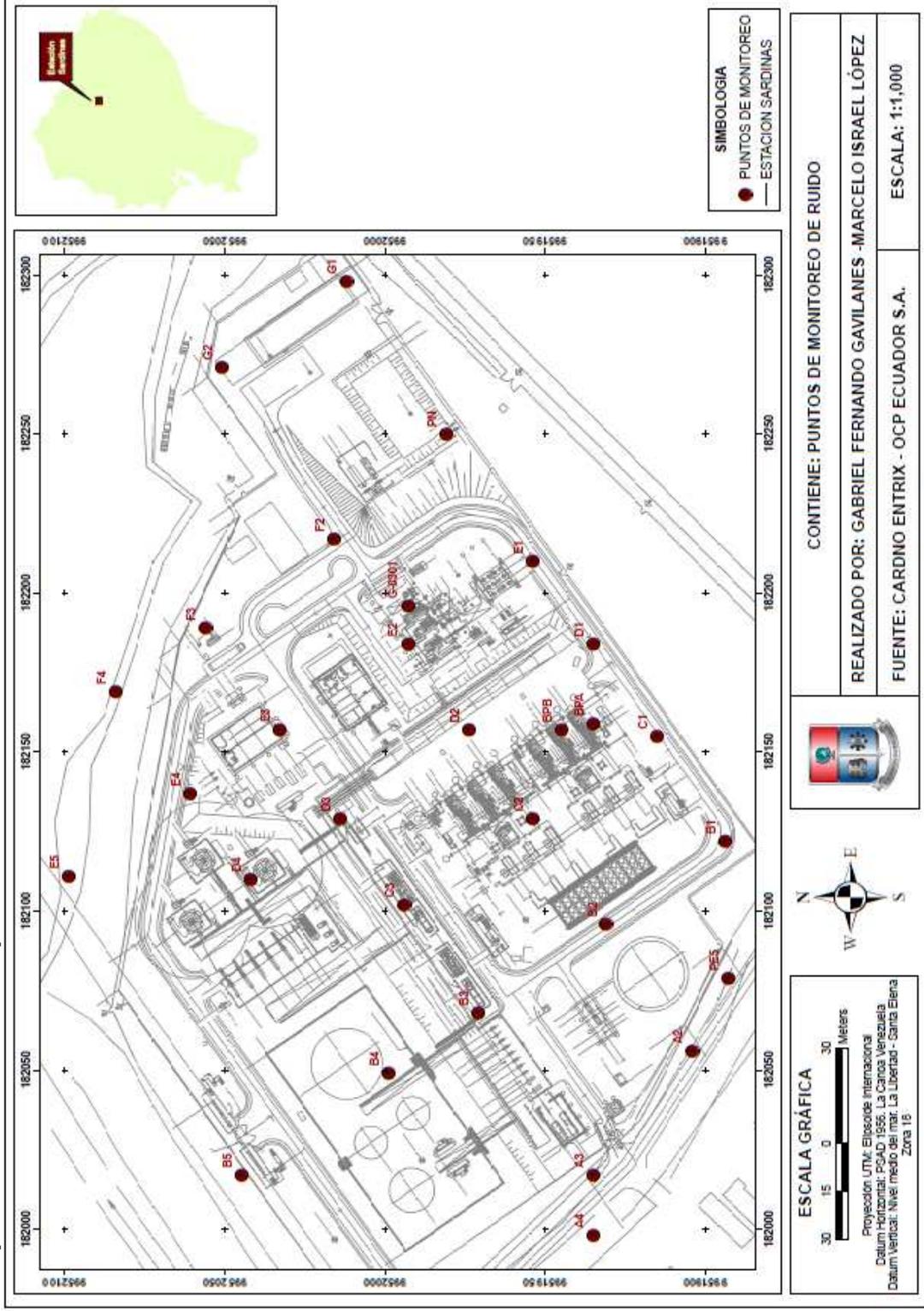


Figura 5-3. Mapa de Ubicación de los puntos de monitoreo de ruido en la estación Sardinias



FUENTE: (CARDINO ENTRIX, 2010) Y OCP ECUADOR  
 ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

Figura 5-4. Mapa de Isófonas de la Modelación de Ruido en la Estación Sardinias.

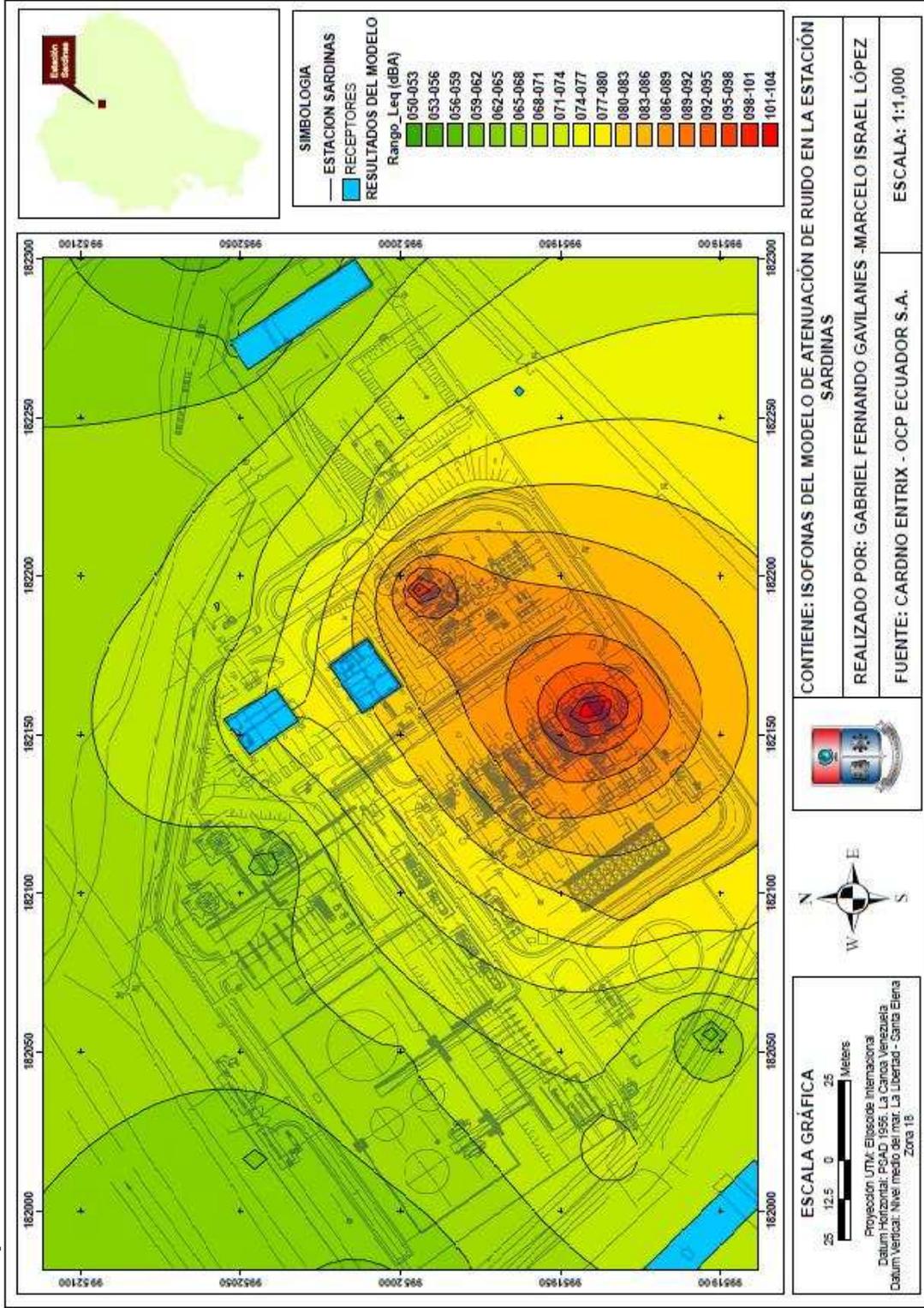
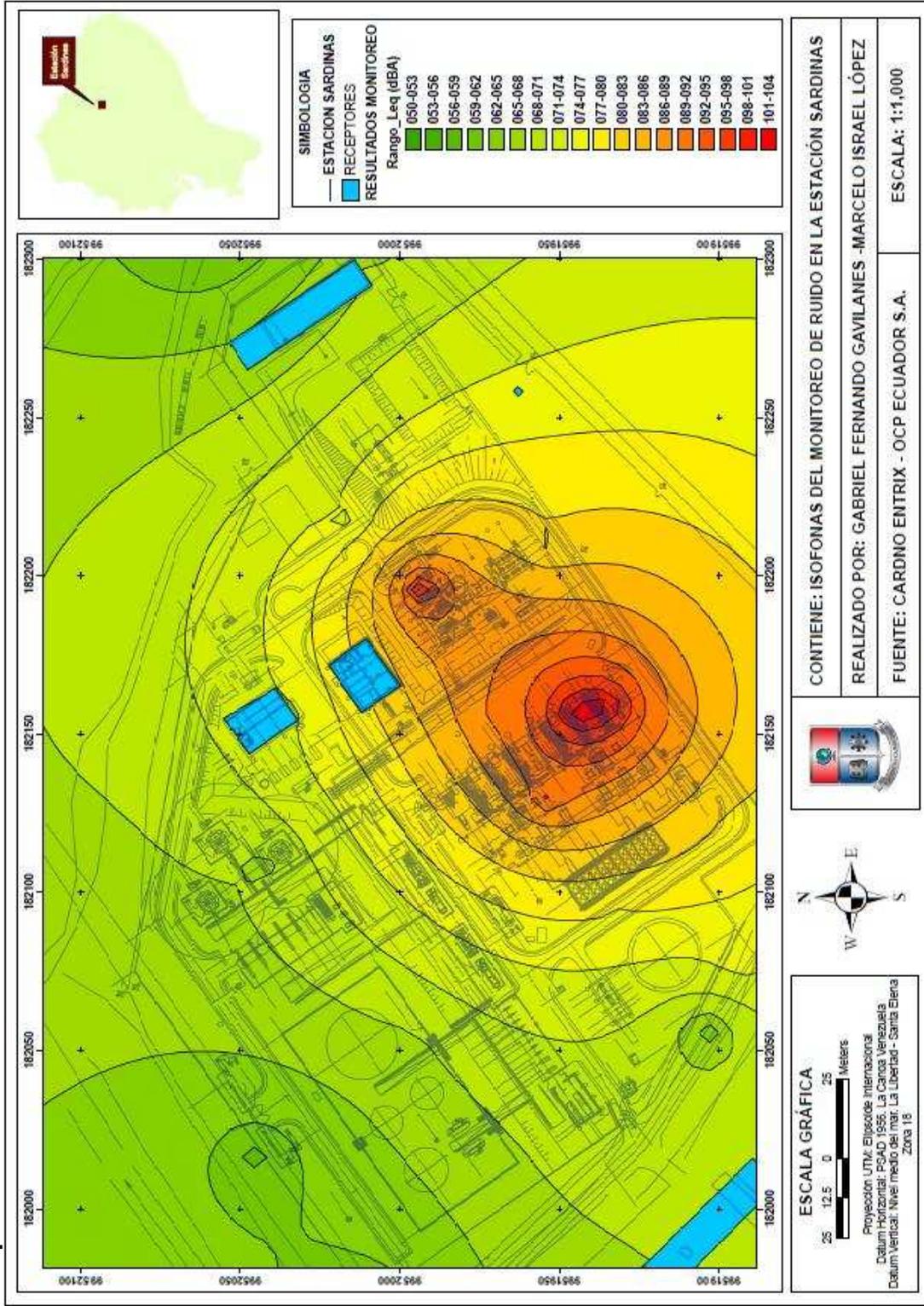


Figura 5-5. Mapa de Isófonas del Monitoreo de ruido de la Estación Sardinias.



### 5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ARROJADOS POR EL MODELO CON EL MONITOREO DE RUIDO.

Los resultados obtenidos en el modelo se comparan con los del monitoreo realizado por la consultora Cardno Entrix:

**Tabla 5-2: Resultados del Modelo y de la campaña del Monitoreo de Ruido.**

ID	Leq (dBA)		DIFERENCIA (%)	OBSERVACIONES	CONDICIONES AL MOMENTO DEL MONITOREO DE CARDO ENTRIX
	Modelo	Monitoreo			
I1	53.5	55	2.73	Presenta una variación aceptable.	Ruido de la estación, aves, anfibios
I7	50.8	51.4	1.17	Presenta una variación aceptable.	Ruido de la estación, aves, anfibios, ruido del estero
PN	79.8	70.6	13.03	La variación considerable posiblemente se tiene por: El detalle en la topografía del terreno y en la directividad de las fuentes. La infraestructura presente en el punto monitoreado y que no se considero en el modelo.	Ruido de la estación, vehículos a lo lejos, aves, piscinas API
G1	66.9	68.2	1.91	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, vehículos, aves, anfibios, piscina API
G2	61.2	65.2	6.13	Presenta una variación	Ruido de las bombas

ID	Leq (dBA)		DIFERENCIA (%)	OBSERVACIONES	CONDICIONES AL MOMENTO DEL MONITOREO DE CARDO ENTRIX
	Modelo	Monitoreo			
				aceptable.	principales, aves, piscina API
F2	71	73.3	3.14	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, piscina API
F3	67.1	71.9	6.68	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
F4	61.5	69.4	11.38	La variación considerable posiblemente se tiene por: El detalle en la topografía del terreno y en la directividad de las fuentes La influencia de aves presentes en el monitoreo.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
E5	67.6	66.2	2.11	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
E4	74.9	66	13.48	La variación considerable posiblemente se tiene por: El detalle en la topografía del terreno y en la directividad de las fuentes. La infraestructura presente	Ruido de las bombas principales, ruido intenso de aves, generadores

ID	Leq (dBA)		DIFERENCIA (%)	OBSERVACIONES	CONDICIONES AL MOMENTO DEL MONITOREO DE CARDO ENTRIX
	Modelo	Monitoreo			
				en el punto monitoreado y que no se considero en el modelo.	
D4	61.5	66.6	7.66	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores, insectos y anfibios
B5	61	57	7.02	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
A5	53.8	55.9	3.76	Presenta una variación aceptable.	Ruido de generadores, aves, vehículos e insectos
B4	67.4	65.9	2.28	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
A4	72.9	59.7	22.11	La variación considerable posiblemente se tiene por: El detalle en la topografía del terreno y en la directividad de las fuentes La infraestructura presente en el punto monitoreado y que no se considero en el	Ruido de las bombas principales, aves, generadores, vehículos en la carretera

ID	Leq (dBA)		DIFERENCIA (%)	OBSERVACIONES	CONDICIONES AL MOMENTO DEL MONITOREO DE CARDO ENTRIX
	Modelo	Monitoreo			
				modelo.	
A3	74	71.1	4.08	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores, vehículos
B3	78.1	72	8.47	<p>La variación considerable posiblemente se tiene por: El detalle en la directividad de las fuentes</p> <p>La infraestructura presente en el punto monitoreado y que no se considero en el modelo.</p>	Ruido de bombas auxiliares y principales, generadores, aves
C3	64.3	71.4	9.94	<p>La variación considerable posiblemente se tiene por: El detalle en la topografía del terreno y en la directividad de las fuentes.</p> <p>La influencia de aves y vehículos presentes en el</p>	Ruido de bombas auxiliares y principales, generadores, aves, vehículos

ID	Leq (dBA)		DIFERENCIA (%)	OBSERVACIONES	CONDICIONES AL MOMENTO DEL MONITOREO DE CARDO ENTRIX
	Modelo	Monitoreo			
				monitoreo.	
D3	75.1	75.1	0.00	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las bombas principales, aves, generadores
E3	77.9	73.4	6.13	Presenta una variación aceptable.	Ruido de bombas principales y generadores
E2	72.4	83.9	13.71	La variación considerable posiblemente se tiene por:  El detalle en la topografía del terreno y en la directividad de las fuentes.  La influencia de aves y vehículos presentes en el monitoreo.	Ruido de los generadores
G-0301	100.3	100.2	0.10	Presenta una variación aceptable.	Ruido del generador G-0301
E1	84	79.3	5.93	Presenta una variación aceptable.	Ruido de los generadores y aves

ID	Leq (dBA)		DIFERENCIA (%)	OBSERVACIONES	CONDICIONES AL MOMENTO DEL MONITOREO DE CARDO ENTRIX
	Modelo	Monitoreo			
D1	88	88.3	0.34	Presenta una variación aceptable.	Ruido de bombas principales y aves
C1	89	88.8	0.23	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales, aves
B1	81.9	78.6	4.20	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales, aves, anfibios
PE5	77.5	76.6	1.17	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales, aves
A2	58.7	62.1	5.48	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales, aves, vehículos en la carretera
B2	82.4	77.2	6.74	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales, aves
C2	88.8	92.3	3.79	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales
D2	87.7	89.3	1.79	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales y generadores
BPB	102.6	105.8	3.02	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales BPA y BPB
BPA	102.3	104.4	2.01	Presenta una variación aceptable.	Ruido de las Bombas principales BPA y BPB

FUENTE: (CARDNO ENTRIX, 2010)

ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ &amp; LÓPEZ GRANJA, 2012)

La mayoría de los puntos monitoreados por la consultora Cardno Entrix presentan una diferencia aceptable al compararlos con los resultados del modelo (menor a 8% o 6 dBA). Sin embargo en siete puntos se tiene una diferencia considerable (mayor al 8% o 6 dBA), lo cual se debe principalmente a los factores que influyen en la validez del monitoreo de ruido, así como también a la precisión en la topografía del terreno, en la directividad de las fuentes y al detalle en la infraestructura considerada en el modelo.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

La metodología utilizada para aplicar el modelo matemático de atenuación de ruido en medio atmosférico en base a las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996, proporciona una excelente herramienta para predecir y representar la real propagación del sonido, ya que al comparar los resultados obtenidos con la campaña de monitoreo realizada por la consultora Cardno ENTRIX, se tiene una diferencia promedio de 5.51%. Diferencia que se atribuye a las variables propias e inherentes del monitoreo de ruido.

Las diferencias que se obtuvieron en los resultados responde principalmente a interferencias durante el monitoreo de ruido; producido por: la calibración del sonómetro, la exactitud en la ubicación geográfica de los puntos monitoreados, la influencia por ruidos externos, el fenómeno de turbulencia, la reflexión por objetos, la dinámica en las condiciones operativas de la industria y la variación de las condiciones del medio durante el tiempo de monitoreo.

La metodología propuesta es útil para modelar la propagación de ruido industrial y predecir la cantidad de energía acústica que llegará a cada punto de interés, en diferentes escenarios; es decir, se podrá determinar el nivel de ruido al incluir medidas de insonorización y variar el número de fuentes de ruido.

La aplicación de la metodología propuesta permitirá conocer con un excelente detalle, el nivel de ruido a ser generado por una industrial, de forma previa a su instalación y operación, permitiendo de esta manera implementar las medidas necesarias para reducir las afectaciones o impactos a potenciales receptores sensibles; ubicados dentro de su área de influencia. Así mismo permitirá evaluar el posible cumplimiento o incumplimiento de la normativa ambiental, en lo que respecta al nivel de ruido.

La metodología propuesta permite el diseño de soluciones a potenciales impactos sobre los receptores sensibles, así como garantizar el cumplimiento de la normativa de ruido, pues facilita la incorporación de barreras o reflectores virtuales dentro del modelo, que luego pueden ser materializados in situ.

De manera similar a lo indicado en el párrafo anterior, en el caso de una industria en operación, y que esté incumpliendo la normativa técnica, a través de la metodología se puede diseñar alternativas de solución o mitigación, previa a su construcción o implementación.

Para el caso de industrias ubicadas dentro de un complejo o parque industrial, la aplicación de la metodología permite evaluar o tener una idea, muy cercana a la realidad, del aporte individual, de cada industria, a los niveles de presión sonora existentes en dicha zona.

El método de interpolación de Kriging con función logarítmica es el que mejor se ajusta a la propagación del ruido en medio atmosférico con una desviación estándar de 0.2392.

Los resultados del modelo y de la campaña de monitoreo presentan valores que sobrepasan los límites máximos permisibles para ruido establecidos en la normativa ambiental como se puede apreciar a continuación:

**Tabla 6-1: Comparación de los resultados de ruido con la normativa ambiental**

<i>RECEPTOR</i>	<i>ZONA SEGÚN EL USO DEL SUELO</i>	<i>Normativa Leq (dBA)</i>	<i>Rango Leq (dBA)</i>	
		<i>06H00–20H00</i>	<i>Monitoreo</i>	<i>Modelo</i>
Cuarto de Control	Industrial	70	77-83	77-83
Mecánica	Industrial	70	71-74	71-77
Garita de Control	Industrial	70	74-77	74-77

<i>RECEPTOR</i>	<i>ZONA SEGÚN EL USO DEL SUELO</i>	<i>Normativa Leq (dBA)</i>	
		<i>06H00–20H00</i>	<i>Rango Leq (dBA)</i> <i>Monitoreo      Modelo</i>
Campamento	Residencial	50	65-68      62-68
Campamento Militar	Residencial	50	65-71      68-71
Vivienda	Residencial	50	62-65      62-65

FUENTES: TULAS & (CARDNO ENTRIX, 2010)  
ELABORACIÓN: (GAVILANES ÁLVAREZ & LÓPEZ GRANJA, 2012)

La intensidad acústica de ruido disminuye sustancialmente en los primeros metros de propagación, como se observa en las curvas de atenuación para las fuentes de ruido.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Se podría obtener un mejor resultado en la modelación de atenuación de ruido en base a las normas ISO 9613-1:1993 y 9613-2:1996 para el presente caso de estudio, con una mejora en la calidad de la información; por ejemplo referente a directividad de las fuentes y la topografía de la zona.

Si bien no es un objetivo de la metodología presentada, el realizar el monitoreo; durante la aplicación se identificó que para el caso de caracterizar y determinar la potencia acústica de las fuentes, se debió realizar una medición in situ para lo cual se deben considerarse las siguientes recomendaciones:

- Se debe realizar una planificación adecuada, previo al levantamiento de la información con ayuda de mapas, tablas de registros, fotos, entre otras. Para considerar todos los elementos que influirán en la modelación.
- De ser el caso, en la cuantificación sonora de las fuentes es importante evitar la influencia de otros emisores de ruido deteniendo su operación momentáneamente hasta establecer los valores de la fuente de análisis.

- Para realizar la cuantificación sonora de las fuentes se debe considerar una distancia del doble de la longitud mayor del emisor para eludir el fenómeno de turbulencia que genera valores poco confiables.
- No se debe realizar la cuantificación sonora de las fuentes con presencia de lluvia porque esta influye en la medida.
- Con el objetivo de minimizar interferencias en las actividades normales dentro de la zona industria y cumplir con las políticas de salud y seguridad industrial se recomienda la utilización de un clinómetro y una cinta métrica para determinar las alturas de los equipos e infraestructura.
- Es importante que se utilice el equipo de protección personal y sobre todo el auditivo en el momento del levantamiento de la información dentro del área industrial.

## CAPÍTULO 7

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arce Mesén, R. (Junio de 2001). *Interpolación Espacial*. Recuperado el 2011, de [http://www.gisits.com/docs/Interpolacion\\_espacial.PDF](http://www.gisits.com/docs/Interpolacion_espacial.PDF)
- Arregui, B. (2008). Modelo de Atenuación acustica. Quito.
- Botanical-online SL. (1999). Efectos del Ruido en la Salud. Recuperado el 15 de Abril de 2011, de <http://www.botanical-online.com/ruidosalud.htm>
- Cancino, E. D. (2002). Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Acústica. Recuperado el 5 de octubre de 2011, de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2002/bmficio.51e/doc/bmficio.51e.pdf>
- Cardno Entrix. (2010). Campaña de Monitoreo de Ruido en las Estaciones de Bombeo del OCP. Quito.
- Cardno Entrix. (2001). Estudio Ambiental para el Transporte, Almacenamiento y Obras Civiles del OCP (Línea Base). Quito.
- Chávez, M. A. (2010). Medición de Potencia Acústica. Quito.
- Comunidad de Madrid. (s.f.). Guía metodológica para la realización de estudios acústicos requeridos por el decreto 78/99 de la comunidad de Madrid. Madrid, Madrid, España.
- Entrix Inc. (2008). Modelo de Atenuación Acustica "BASIC ENERGY". Quito.
- Entrix Inc. (2006). Monitoreo de Ruido de las estaciones de bombeo Cayagama y Sardinias. Quito.

- FAO. (Mayo de 2003). Manual curso de análisis espacial arcview 8.2. Obtenido de <http://www.rlc.fao.org/proyecto/139jpn/document/2ordenam/talleres/tafoae/doctae/mmae.pdf>
- Franco García, A. (7 de julio de 2010). Velocidad del sonido. Recuperado el 13 de abril de 2011, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad\\_del\\_sonido](http://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_del_sonido)
- Gobierno de Chile CONAMA. (Octubre de 2008). Levantamiento de información de entrada de modelo de predicción de ruido y aplicación en caso piloto. Recuperado el 2 de Septiembre de 2011, de Levantamiento de información de entrada de modelo de predicción de ruido y aplicación en caso piloto: [http://www.sinia.cl/1292/articles-46174\\_recurso\\_1.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-46174_recurso_1.pdf)
- Gómez, S., & Narvaéz, M. (Mayo de 2008). Elaboración de un manual de procedimientos para la medición de parámetros acústicos y vibraciones mecánicas. Elaboración de un manual de procedimientos para la medición de parámetros acústicos y vibraciones mecánicas . Quito, Pichincha, Ecuador: Escuela Politecnica Nacional Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- International Standard ISO 9613 part 1. (01 de junio de 1993). Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. ISO 9613-1 .
- International Standard ISO 9613 part 2. (15 de diciembre de 1996). Acoustics Attenuation of sound during propagation outdoors . ISO 9613-2 .
- López, M. (2000). Ingeniería Acústica. En M. R. López, Ingeniería Acústica (pág. 69). Madrid: Paraninfo.
- MAE. (2008). Límites permisibles de niveles de ruido ambiente para fuentes fijas y fuentes móviles y para vibraciones. Quito.
- Marín, A. (Septiembre de 2001). Aplicación informática orientada a la formación y evaluación de riesgos derivados de la exposición al ruido en ambientes industriales. Recuperado el 25 de marzo de 2011, de

<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/presentaci%C3%B3n.htm>

Miyara, F. (1999). Control de Ruido.

Muñoz, F. (2005). Aplicaciones Técnicas de SIG II Interpolación Espacial. Obtenido de

[https://www.ucursos.cl/fau/2008/2/GEO604/1/material\\_alumnos/bajar?id\\_material=3844](https://www.ucursos.cl/fau/2008/2/GEO604/1/material_alumnos/bajar?id_material=3844)

Novacero . (s.f.). Soluciones de acero (Duratecho). Recuperado el 29 de septiembre de

2011, <http://www.novacero.com/ws/novacero/novacero.nsf/paginas/56183406A14601558825715D00837E75?OpenDocument>

OCP. (s.f.). Portal de internet de OCP. Recuperado el 15 de Junio de 2011, de

[http://www.ocpecuador.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=65&Itemid=60&lang=es](http://www.ocpecuador.com/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=60&lang=es)

Ortiz, G. (s.f.). Guía rápida de herramientas del ARCTOOLBOX. Recuperado el

Septiembre de 2011,

[http://www.gabrielortiz.com/descargas/3D\\_Analyst\\_9\\_2.pdf](http://www.gabrielortiz.com/descargas/3D_Analyst_9_2.pdf)

Parrondo, J., Velarde, S., González, J., Ballesteros, R., & Santolaria, C. (2006)

Acústica Ambiental. Oviedo: Ediciones de la Universidad de Oviedo.

PCPfiles. (s.f.). Ondas Sonoras. Recuperado el 15 de Junio de 2011, de

[http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc\\_altavoces/ondas\\_sonoras/ondas\\_sonoras.html#inicio](http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/ondas_sonoras/ondas_sonoras.html#inicio)

Pecorelli, S. (s.f.). Manual Laboratorio de Higiene Industrial I. Recuperado el 20 de

Mayo de 2011, de <http://es.scribd.com/doc/50824663/11/ANALISIS-DE-FRECUENCIA>

Power Acoustic Inc. (s.f.). Recuperado el 9 de septiembre de 2011, de

<http://poweracoustics.com/Software.html>

Rodríguez, J., & Susevich, G. (s.f.). Contaminación Acústica. Recuperado el 25 de

Mayo de 2011, de <http://es.scribd.com/doc/6663019/TP-ContaminacionAcustica>

SIGMUR. (Junio de 2006). SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia.

Recuperado el 2011, de <http://www.um.es/geograf/sigmur/index.html>

YIO. (s.f.). Curso de Sonido. Recuperado el 31 de Mayo de 2011, de

<http://www.yio.com.ar/imprimir.php?aid=5>

Zúñiga, M., Blanco, J., & García, J. (s.f.). Publicaciones Aula Verde. Recuperado el

Abril de 2011, de <http://www.um.es/gtiweb/allmetadata/ruido.htm>