



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

**ARQUITECTURA IOT ORIENTADA AL ANÁLISIS
BIOACÚSTICO Y CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE
SONIDOS RESPIRATORIOS PEDIÁTRICOS**

AUTOR

Morales Vera, Samantha Vanessa

PROYECTO DE UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**Previo a la obtención del grado académico en
INGENIERO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

TUTOR

Lsi. Daniel Quirumbay Yagual, Mgtr

Santa Elena, Ecuador

Año 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Ing. José Sánchez Aquino, Mgtr.
DIRECTOR DE LA CARRERA**

**Lsi. Daniel Quirumbay Yagual, Mgtr.
TUTOR**

**Ing. Iván Coronel Suárez, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA**

**Ing. Marjorie Coronel Suárez, Mgtr.
DOCENTE GUÍA UIC**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por Morales Vera Samantha Vanessa, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero en Tecnologías de la Información.

La Libertad, a los 20 días del mes de Julio del año 2026

TUTOR



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**DANIEL IVAN
QUIRUMBAY YAGUAL**

**Lsi. Daniel Quirumbay Yagual,
Mgtr.**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Morales Vera Samantha Vanessa

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Arquitectura IoT orientada al análisis bioacústico y clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos, previo a la obtención del título en Ingeniero en Tecnologías de la Información, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 20 días del mes de Julio del año 2026

EL AUTOR

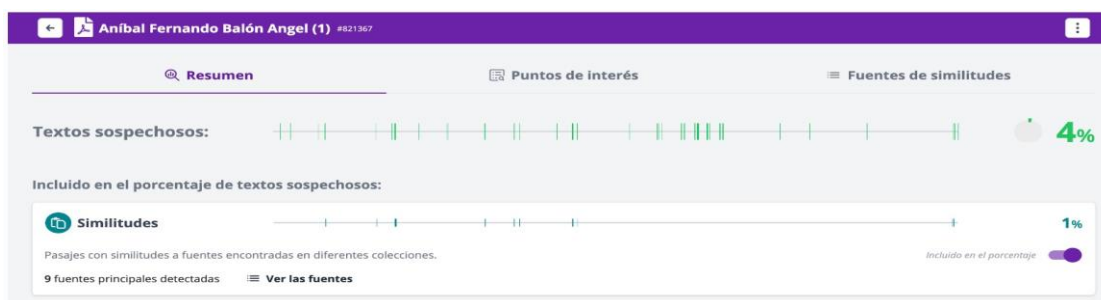
Samantha Vanessa Morales Vera



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Arquitectura IoT orientada al análisis bioacústico y clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos, presentando por el estudiante, Morales Vera Samantha Vanessa fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al **XX%**, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe el proceso de titulación.



TUTOR

Lsi. Daniel Quirumbay Yagual, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, Morales Vera Samantha Vanessa

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales del presente trabajo de titulación con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor

Santa Elena, a los 20 días del mes de Julio del año 2026

EL AUTOR

Samantha Vanessa Morales Vera

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres por acompañarme durante toda mi formación universitaria. Su apoyo constante, confianza y motivación fueron fundamentales para superar cada desafío y culminar este trabajo de titulación.

A mi tutor, **Lsi. Daniel Quirumbay Yagual, Mgtr.**, por su orientación, dedicación y disposición para compartir sus conocimientos durante el desarrollo de este trabajo. Sus recomendaciones y enseñanzas fueron fundamentales para fortalecer este proyecto y culminarlo satisfactoriamente.

A la **Universidad Estatal Península de Santa Elena** y a todos los docentes que formaron parte de mi formación profesional, por los conocimientos impartidos y por contribuir a mi crecimiento académico y personal.

A mis familiares, conocidos y amigos, por sus consejos, palabras de ánimo y por brindarme el apoyo necesario para continuar avanzando durante esta etapa.

De manera especial, agradezco a mi amiga Jennifer por compartir este camino, por su amistad, compañía y el apoyo mutuo que siempre nos hemos brindado; de igual manera, agradezco a Skaytier, una amiga muy querida que, a pesar de la distancia, siempre ha estado presente, acompañándome con su cariño, sus oraciones, bendiciones y buenos deseos.

Samantha Vanessa, Morales Vera

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la sabiduría y la fe necesarias para afrontar cada desafío que se presentó durante este camino y permitirme culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, quienes fueron el pilar fundamental de este sueño, gracias por creer siempre en mí, por impulsarme a seguir adelante y por recordarme, con cada palabra de aliento, que era capaz de alcanzar esta meta. Gracias por su amor incondicional, por cada consejo y por estar presentes en cada paso de este camino, todo lo que hoy he logrado también lleva una parte de ustedes, porque sin su apoyo constante nada de esto habría sido posible.

Finalmente, dedico este logro a todas las personas que, con una palabra de ánimo, un consejo o un gesto de apoyo, hicieron este camino más llevadero y me motivaron a no rendirme; y a mis mascotas, cuya compañía hizo más tranquilas las largas jornadas de estudio y trabajo.

Samantha Vanessa, Morales Vera

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
DECLARO QUE:	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
RESUMEN	XIX
ABSTRACT	XX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTACIÓN	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Descripción del proyecto	4
1.3 Objetivos del proyecto	8
1.4 Justificación	9
1.5 Alcance del proyecto	10
1.6 Metodología del proyecto	12
1.6.1 Metodología de investigación	12
1.6.1.1 Diseño y alcance de la investigación	12
1.6.1.2 Tipo y métodos de investigación	12

1.6.1.3 Beneficiarios del proyecto	13
1.6.1.4 Población y muestra	14
1.6.2 Idea a defender	14
1.6.2.1 Variable	14
1.6.3 Análisis de recolección de datos	16
1.6.3.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	16
1.7. Metodología de desarrollo	17
CAPÍTULO 2. PROPUESTA	20
2.1 Marco contextual	20
2.1.1 Fundación AVSI Ecuador	20
2.1.2 Entorno de atención	21
2.1.3 Limitaciones del entorno	21
2.1.4 Población objetivo y necesidades identificadas	21
2.1.5 Oportunidades de implementación tecnológica	22
2.2 Marco conceptual	22
2.2.1 Fundamentos clínicos	22
2.2.1.1 Sonidos respiratorios	22
2.2.2 Señales y análisis acústico	24
2.2.3 Procesamiento digital de señales	27
2.2.4 Aprendizaje automático	29
2.2.5 Arquitectura del sistema	30
2.2.6 Plataforma y almacenamiento	31
2.3.2 Bases del análisis acústico de sonidos respiratorios en el ámbito biomédico	33
2.3.3 Aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la clasificación de señales respiratorias	34
2.4.1 Requerimientos funcionales	35

2.4.2 Requerimientos no funcionales	39
2.5 Componentes de la propuesta	41
2.5.1 Arquitectura del sistema	41
2.5.2 Diagrama de casos de uso	42
2.5.3 Modelado de datos	53
2.5.4.1 Implementación del dispositivo IoT	60
2.5.4.3 Preparación del registro respiratorio	61
2.5.4.4 Comunicación inalámbrica y transmisión HTTP	61
2.5.4.5 Integración del flujo de adquisición de datos	62
2.5.4.6 Representación temporal de la señal respiratoria	63
2.5.4.7 Normalización y limpieza de señales acústicas	64
2.5.4.8 Análisis espectral mediante STFT	64
2.5.4.9 Generación del espectrograma Mel	65
2.5.4.10 Extracción de características bioacústicas	65
2.5.4.13 Integración del procesamiento bioacústico en el sistema	67
2.5.4.14 Flujo del procesamiento bioacústico implementado	68
2.5.4.15 Técnicas matemáticas y métricas bioacústicas implementadas	68
2.5.4.16 Carga inicial del conjunto de datos respiratorios	70
2.5.4.17 Verificación de calidad de señales respiratorias	70
2.5.4.19 Balanceo del conjunto de datos	72
2.5.4.20 Entrenamiento del modelo random forest	73
2.5.4.21 Evaluación del modelo mediante métricas de clasificación	74
2.5.4.22 Análisis del comportamiento del modelo	75
2.5.4.23 Generación e integración del modelo entrenado	76
2.5.4.24 Importancia de las características bioacústicas	77
2.5.4.27 Generación progresiva de registros respiratorios propios	79

2.5.4.28 Implementación de la aplicación web progresiva	80
2.5.4.29 Dashboard médico de seguimiento respiratorio	81
2.5.4.30 Gestión de pacientes y usuarios del sistema	83
2.5.4.32 Historial, reportes y seguimiento de mediciones	85
2.5.5 Levantamiento de datos reales con el dispositivo iot	87
2.5.5.1 Validación técnica de resultados	89
2.5.5.2 Comparación con estudios relacionados	91
2.6 Pruebas	92
2.6.1 Casos de prueba del prototipo iot y la aplicación web progresiva	92
2.7 Resultados	102
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS	108
ANEXOS	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables.	15
Tabla 2: Requerimientos Funcionales: Elaboración Propia	39
Tabla 3: Requerimientos no funcionales del sistema IoT.	41
Tabla 4: Especificaciones de caso de uso según roles.	43
Tabla 5: Especificación del caso de uso del módulo de gestión de usuarios y roles.	44
Tabla 6: Especificación del caso de uso gestión de pacientes y familiares.	45
Tabla 7: El paciente queda activo para la próxima medición respiratoria	46
Tabla 8: Especificación del caso de uso del módulo del prototipo IoT.	48
Tabla 9: Especificación del caso de uso del módulo de procesamiento y clasificación.	49
Tabla 10: Especificación del caso de uso del módulo de monitoreo respiratorio en tiempo real.	50
Tabla 11: Especificación del caso de uso del módulo de historial de mediciones respiratorias.	51
Tabla 12: Especificación del caso de uso del módulo de generación de reportes clínicos.	52
Tabla 13: Especificación del caso de uso del módulo de administración general del sistema.	53
Tabla 14: Técnicas matemáticas y métricas bioacústicas implementadas en el procesamiento respiratorio.	69
Tabla 15: Datos generales del levantamiento real con el dispositivo IoT.	88
Tabla 16: Validadores técnicos aplicados para comprobar el desempeño del modelo Random Forest.	90
Tabla 17: Comparación del desempeño del modelo con estudios relacionados.	92
Tabla 18: Prueba No.01 - Funcionamiento del prototipo IoT	93
Tabla 19: Prueba No.02 - Captura del sonido respiratorio.	94
Tabla 20: Prueba No.03 - Transmisión del audio respiratorio al servidor.	95
Tabla 21: Prueba No.04 - Procesamiento bioacústico.	96
Tabla 22: Prueba No.05 - Clasificación automática mediante Random Forest.	97
Tabla 23: Prueba No.06 - Monitoreo respiratorio en tiempo real.	98
Tabla 24: Prueba No.07 - Registro de mediciones respiratorias.	99

Tabla 25: No.08 - Consulta del historial respiratorio.	100
Tabla 26: No.09 - Generación del reporte clínico en PDF.	101
Tabla 27: Integración funcional del prototipo IoT y la aplicación web progresiva.	102
Tabla 28: Resultados - Solución del sistema IoT respiratorio.	104
Tabla 29: Resultados Medición - Clasificación respiratoria.	104
Tabla 30: Información general de la prueba	116
Tabla 31: Preparación del entorno y consentimiento.	117
Tabla 32: Configuración del dispositivo IoT.	118
Tabla 33: Registro del paciente en la PWA.	118
Tabla 34: Captura respiratoria.	119
Tabla 35: Procesamiento y clasificación.	119
Tabla 36: Criterios de aceptación.	120
Tabla 37: Resumen de colecciones verificadas en MongoDB Atlas.	121
Tabla 38: Matriz resumida de mediciones respiratorias.	122
Tabla 39: Cuestionario de percepción del sistema IoT.	123
Tabla 40: Autorización de representante para pruebas.	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Incrementos del desarrollo del sistema IoT: Elaboración propia.	19
Figura 2: Ubicación de la Fundación Avsi.	20
Figura 3: Arquitectura general del sistema IoT propuesto: Elaboración propia.	41
Figura 4: Diagrama de caso de uso de autenticación y acceso según rol.	42
Figura 5: Diagrama de caso de uso de gestión de usuarios y roles.	43
Figura 6: Diagrama de caso de uso de gestión de pacientes y asociación de familiares.	44
Figura 7: Diagrama de caso de uso de selección de paciente activo.	46
Figura 8: Diagrama de caso de uso de captura y envío del sonido respiratorio.	47
Figura 9: Diagrama de caso de uso de procesamiento bioacústico y clasificación automática.	48
Figura 10: Diagrama de caso de uso de monitoreo respiratorio en tiempo real.	49
Figura 11: Diagrama de caso de uso de consulta del historial respiratorio.	50
Figura 12: Diagrama de caso de uso de generación del reporte clínico en PDF.	51
Figura 13: Diagrama de caso de uso de administración general del sistema.	52
Figura 14: Flujo real de base de datos.	53
Figura 15: Colección informes en MongoDB Atlas.	54
Figura 16: Informe histórico almacenado en MongoDB Atlas.	57
Figura 17: Colección de informes generados en MongoDB Atlas.	57
Figura 18: Medición respiratoria almacenada.	58
Figura 19: Informe en tiempo real almacenado en MongoDB Atlas.	58
Figura 20: Configuración de pines I2S y parámetros de captura del ESP32.	60
Figura 21: Dispositivo IoT basado en ESP32 para captura de sonidos respiratorios.	60
Figura 22: Lectura de la señal respiratoria capturada mediante el micrófono INMP441.	61
Figura 23: Preparación del registro respiratorio mediante lectura I2S en el ESP32.	61
Figura 24: Transmisión del registro respiratorio desde el ESP32 hacia el backend mediante HTTP.	62
Figura 25: Recepción del registro respiratorio enviado desde el dispositivo IoT hacia el backend del sistema.	62
Figura 26: Representación temporal de la señal respiratoria capturada por el sistema.	64

Figura 27: Implementación de normalización y eliminación de silencios en señales respiratorias.	64
Figura 28: Implementación de STFT para el análisis espectral y cálculo de energía por bandas.	65
Figura 29: Espectrograma Mel generado a partir de la señal respiratoria.	65
Figura 30: Implementación de características acústicas temporales y espectrales extraídas de la señal respiratoria.	66
Figura 31: Implementación del cálculo de coeficientes MFCC a partir de la señal respiratoria.	66
Figura 32: Estructuración de características acústicas dentro del conjunto de datos bioacústico.	67
Figura 33: Subida de audio en Postman para extraer características acústicas.	67
Figura 34: Resumen de características acústicas generadas por el procesamiento bioacústico a partir de un registro respiratorio.	67
Figura 35: Flujo del procesamiento bioacústico implementado dentro del sistema.	68
Figura 36: Carga inicial del conjunto de datos respiratorios y distribución original de clases.	70
Figura 37: Implementación de la validación automática de duración mínima en señales respiratorias.	71
Figura 38: Resultado de la validación automática con descarte de un audio respiratorio de duración insuficiente.	71
Figura 39: Implementación de la generación automática del conjunto de datos bioacústico.	71
Figura 40: Generación del archivo dataset.csv a partir de características bioacústicas extraídas.	72
Figura 41: Visualización del conjunto de datos bioacústico generado en formato CSV.	72
Figura 42: Balanceo de clases aplicado al conjunto de entrenamiento respiratorio.	73
Figura 43: Ejecución del entrenamiento del modelo Random Forest con balanceo aplicado.	74
Figura 44: Métricas de desempeño obtenidas durante la evaluación del modelo Random Forest.	74

Figura 45: Matriz de confusión obtenida durante la evaluación del modelo Random Forest.	75
Figura 46: Validación cruzada estratificada aplicada al modelo Random Forest.	75
Figura 47: Curva ROC multiclase obtenida durante la evaluación del modelo Random Forest.	76
Figura 48: Archivos generados para la integración del modelo Random Forest dentro del sistema.	76
Figura 49: Importancia de características bioacústicas obtenida durante el entrenamiento del modelo Random Forest.	77
Figura 50: Importancia global de características mediante SHAP.	77
Figura 51: Interpretación SHAP para la clase bronquial.	78
Figura 52: Interpretación SHAP para la clase Healthy.	78
Figura 53: Interpretación SHAP para la clase asma.	78
Figura 54: Espectrograma Mel generado automáticamente a partir de una captura respiratoria.	79
Figura 55: Forma de onda generada automáticamente a partir de una captura respiratoria procesada por el sistema.	79
Figura 57: Inicio de sesión de la aplicación web progresiva.	81
Figura 56: Registro de cuentas para familiares mediante asociación automática.	81
Figura 58: Dashboard médico de seguimiento respiratorio en la PWA.	82
Figura 59: Visualización de métricas complementarias del dashboard médico.	82
Figura 60: Administración de usuarios desde el rol administrador.	83
Figura 61: Registro y gestión de pacientes desde el rol médico.	84
Figura 62: Selección del paciente para iniciar el monitoreo respiratorio.	84
Figura 63: Forma de onda y espectrograma Mel generados durante una medición respiratoria.	84
Figura 64: Pantalla de reportes clínicos de la pwa.	85
Figura 65: Tabla de mediciones totales.	85
Figura 66: Generación pdf detalles de mediciones.	86
Figura 67: Generación pdf datos generales.	86
Figura 69: Visualización de información respiratoria desde el perfil familiar.	86
Figura 68: Familiar pantalla tiempo real.	86

Figura 70: Familiar pantalla historial.	87
Figura 72: Registro antropométrico previo al levantamiento de datos respiratorios.	89
Figura 71: Captura respiratoria con el sensor ubicado en región dorsal.	89
Figura 73: Visualización del resultado obtenido en la PWA durante el levantamiento de datos.	89

RESUMEN

El proyecto desarrolla una arquitectura IoT orientada al análisis bioacústico y clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos como apoyo al monitoreo infantil, el sistema integra un dispositivo basado en ESP32, micrófono digital INMP441 acoplado a un estetoscopio, acelerómetro MPU6050, backend en Node.js y Express, servidor de Machine Learning en Flask, base de datos MongoDB Atlas y una aplicación web progresiva. La metodología se estructuró mediante incrementos funcionales que abarcan adquisición, transmisión, procesamiento, clasificación, almacenamiento y visualización de resultados. Para el modelo Random Forest se emplearon 511 registros y 46 variables bioacústicas, aplicando balanceo únicamente al conjunto de entrenamiento y conservando 103 muestras para prueba. El modelo alcanzó 88,35 % de exactitud y 92,18 % de validación cruzada, los resultados se visualizan mediante métricas, historial, espectrogramas, forma de onda e informes PDF, sin sustituir la valoración médica profesional.

Palabras clave: IoT, sonidos respiratorios, análisis bioacústico, Random Forest.

ABSTRACT

This work implemented an IoT architecture to acquire, process, and classify pediatric respiratory sounds to support monitoring. The system integrated an ESP32, an INMP441 microphone coupled to a stethoscope, bioacoustic processing, and a Random Forest model. 511 recordings with 46 variables were used; training was balanced without modifying the 103 test samples. The model achieved 88.35% accuracy and 92.18% cross-validation. The results were stored in MongoDB Atlas and visualized using a PWA with histories, spectrograms, and reports. The study concludes that the proposed system is technically viable as a monitoring tool, without replacing medical evaluation.

Keywords: Internet of Things, respiratory sounds, Random Forest.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades respiratorias en niños representan una problemática frecuente dentro del seguimiento de salud infantil, especialmente en edades tempranas donde los síntomas no siempre pueden ser comunicados con claridad. En estos casos, la revisión del estado respiratorio depende principalmente de la observación clínica, la auscultación y la experiencia del personal de salud. Sin embargo, factores como el ruido ambiental, el movimiento del paciente y la calidad del registro pueden dificultar la interpretación de los sonidos respiratorios.

En instituciones que brindan acompañamiento a niños y familias, el monitoreo respiratorio puede verse limitado por la falta de herramientas tecnológicas que permitan registrar y consultar información de manera organizada. Muchas veces los controles dependen únicamente de la valoración presencial, lo que dificulta llevar un seguimiento continuo de las mediciones realizadas. Esta situación evidencia la necesidad de contar con sistemas de apoyo que permitan obtener datos respiratorios y presentarlos de forma clara para el personal autorizado.

Los avances tecnológicos en Internet de las Cosas, procesamiento digital de señales y aprendizaje automático permiten crear soluciones orientadas al análisis de sonidos respiratorios. Mediante sensores acústicos, comunicación inalámbrica y modelos de clasificación, es posible capturar señales, extraer características bioacústicas y generar resultados automáticos que sirvan como apoyo al monitoreo. Estas tecnologías no reemplazan la valoración médica, pero permiten organizar la información y facilitar la revisión de patrones respiratorios dentro de un sistema digital.

Es aquí donde surge el presente proyecto, que propone una arquitectura IoT orientada al análisis bioacústico y clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos. El sistema integra un dispositivo basado en ESP32, micrófono INMP441 acoplado a un estetoscopio, backend, servidor de Machine Learning, MongoDB Atlas y una aplicación web progresiva. La propuesta permite capturar, procesar y clasificar sonidos respiratorios mediante Random Forest, visualizando los resultados en una plataforma con historial, métricas, espectrogramas, forma de onda e informes PDF.

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTACIÓN

1.1 Antecedentes

Las enfermedades provocadas por infecciones en el sistema respiratorio son las más frecuentes a lo largo de la vida y uno de los principales problemas de salud en niños menores a 5 años incidiendo más en la etapa de la edad pediátrica, estas infecciones afectan a las vías respiratorias superiores e inferiores lo que puede ocasionar fuertes infecciones y enfermedades que inciden en el desarrollo y la calidad de vida e incluso puede ocasionar problemas fatales, son por algunas de estas causas el gran número de consultas médicas y urgencias hospitalarias en los niños [1] [2].

De las enfermedades respiratorias más comunes tenemos el asma que ha afectado alrededor de 260 millones de personas mundialmente provocando más de 450.000 muertes por año, esta enfermedad es una de las más comunes en niños y adolescentes los cuales se ven afectados en un 15%, [3]. Por otro lado, la bronquitis se presenta como una inflamación de los bronquios que puede producir tos persistente, presencia de mucosidad y dificultad respiratoria; en el año 2022 registro 358 muertes siendo los niños con mayor probabilidad de contraerla [4]. Las cifras muestran que estas enfermedades son un peligro real para los menores lo que es alarmante y pone su salud en constante riesgo.

El analizar este tipo de enfermedades representa un desafío ya que existen limitaciones debido a la escasez de herramientas tecnológicas que sean especializadas para tratar estos casos, esta problemática se presenta sobre todo en entidades públicas que son las que tienen más demandas de pacientes y menos disponibilidad de herramientas, una de estas entidades es fundación AVSI que brinda ayuda humanitaria dándole seguimiento a los niños en el área de desnutrición, psicología y salud en general [5].

Los tiempos de espera en los centros de salud representan un inconveniente debido a la gran cantidad de pacientes en estado de espera y a la limitada capacidad de atención, lo que requiere hacer nuevos cambios como cambio de fecha o agendar una nueva cita implicando que los pacientes permanezcan sin una valoración oportuna por días e incluso por varios de los casos meses, lo que aumenta el riesgo de agravamiento y la intervención temprana [6].

Las limitaciones y retrasos en evaluaciones clínicas no solo afectan al paciente en particular ya que puede aumentar el riesgo de transmisión a más personas debido a que algunas de estas enfermedades e infecciones están vinculadas a las exposiciones ambientales de las cuales se exponen, además la falta de herramientas tecnológicas dificulta la identificación temprana de patrones anómalos, lo que retrasa el tiempo de evaluación y dificulta el control y seguimiento [7].

La falta de enfoque en la evaluación de enfermedades en pacientes pediátricos debido a su limitada capacidad para describir sus síntomas requiere de herramientas que ayuden a la interpretación de las señales respiratorias, en La Global Initiative for Asthma (GINA) señala la importancia de usar herramientas de salud acorde a la edad, dado lo contrario no se podría tener un control adecuado por la incorrecta respuesta lo cual podría complicar el manejo clínico [1] [2].

En las investigaciones realizadas por un conjunto de colaboradores de la revista Respiratory Research en el campo de neumología pediátrica indican los avances en el procesamiento de las señales acústicas haciendo uso de la ia, siendo herramientas muy útiles mostrando la detección de enfermedades respiratorias haciendo un análisis automático, esta innovación tecnológica ayuda a disminuir la dependencia que se tiene con los servicios de evaluación manual facilitando así la identificación de alteraciones respiratorias [8].

Con la investigación hecha por un departamento tecnológico en México se aborda un tema de gran relevancia para la actualidad, sobre todo para la seguridad de los niños en donde se propone un monitoreo en el que se almacenará la base de datos en la nube en donde se pueda acceder a la información tanto en aplicación web como aplicación móvil, este enfoque nos demuestra la facilidad del acceso continuo y en cualquier momento, junto con el almacenamiento remoto y la visualización de información [9].

En un estudio enfocado a la monitorización respiratoria nos resalta la importancia de tener a los pacientes un seguimiento continuo de las variables respiratorias ya que es de ayuda para la detección temprana de alteraciones que se puedan tener en el sistema respiratorio y para una mejor interpretación se habla de incorporar herramientas tecnológicas que ayuden a realizar un análisis más eficiente de las señales respiratorias que apoyen al seguimiento clínico de paciente [10].

Este presente trabajo está enfocado a la detección de dos tipos de enfermedades respiratorias comunes en niños como son el asma y la bronquitis por medio de la implementación de iot y una aplicación móvil, debido a los numerosos casos con este tipo de enfermedades es esencial implementar herramientas tecnológicas que permitan monitoreo continuo y que ayude a la detección de patrones respiratorios anómalos con un monitoreo continuo.

1.2 Descripción del proyecto

El presente proyecto consiste en el desarrollo de un prototipo IoT orientado a la clasificación automática de sonidos respiratorios infantiles mediante el análisis de señales bioacústicas, el sistema permite la captura no invasiva de sonidos respiratorios utilizando un dispositivo basado en ESP32, un micrófono digital MEMS integrado a un estetoscopio y un acelerómetro MPU6050 como sensor complementario para verificar la estabilidad del dispositivo durante la captura, con el fin de obtener registros acústicos adecuados para su posterior procesamiento y análisis automático, esta integración permite que la señal respiratoria sea obtenida de forma controlada reduciendo interferencias físicas durante la medición.

Los registros respiratorios son enviados mediante conectividad WiFi hacia un backend implementado con Node.js y Express, el cual actúa como intermediario entre el dispositivo IoT y el servidor de Machine Learning, luego el servidor desarrollado en Flask realiza el procesamiento bioacústico de las señales mediante técnicas de análisis espectral y extracción de características acústicas, incluyendo RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, energía por bandas y coeficientes MFCC, estas características son utilizadas por un modelo Random Forest para clasificar automáticamente los sonidos respiratorios en categorías compatibles con asma, bronquial o respiración saludable, este flujo permite separar la adquisición, el procesamiento y la clasificación, manteniendo una arquitectura organizada.

Los resultados obtenidos son almacenados en una base de datos MongoDB Atlas y posteriormente visualizados mediante una aplicación web progresiva (PWA), la cual permite gestionar pacientes, consultar mediciones respiratorias, monitorear resultados en tiempo real y acceder al historial clínico según el rol del usuario, de este modo el

prototipo constituye una herramienta tecnológica de apoyo para el monitoreo respiratorio infantil basada en tecnologías IoT, procesamiento bioacústico y aprendizaje automático.

Módulo de dispositivo iot

Submódulo de adquisición de datos

Captura de señales acústicas: La adquisición de los sonidos respiratorios se realiza mediante un micrófono digital MEMS INMP441 con interfaz I2S, integrado a un dispositivo basado en ESP32, adaptado a la manguera y campana de un estetoscopio. Esta configuración permite captar señales acústicas directamente desde el cuerpo del paciente de forma no invasiva, estos audios constituyen la entrada principal del sistema y son utilizados posteriormente para el procesamiento bioacústico.

Registro de movimiento: El dispositivo incorpora un acelerómetro MPU6050 que permite registrar datos de aceleración en tres ejes durante la captura de la señal respiratoria, esta información se utiliza como referencia complementaria para verificar la estabilidad del dispositivo y contextualizar posibles movimientos durante las pruebas, los valores obtenidos no intervienen directamente en el proceso de clasificación automática, ya que el análisis principal se realiza a partir del audio respiratorio capturado mediante el micrófono digital.

Submódulo de preparación del registro respiratorio

Captura y preparación del audio: El ESP32 realiza la captura del audio respiratorio mediante el micrófono digital MEMS INMP441 utilizando la interfaz I2S, durante esta etapa el firmware controla parámetros como la frecuencia de muestreo, la duración de captura y la lectura de las muestras obtenidas, la información adquirida se organiza en un registro de audio digital con el formato requerido para su transmisión al backend, donde se ejecutan las etapas posteriores de procesamiento bioacústico y análisis automático.

Submódulo de comunicación inalámbrica

Transmisión wifi: El ESP32 transmite el archivo de audio respiratorio capturado, junto con información complementaria como el nivel de ruido y los valores del acelerómetro,

hacia el backend mediante conectividad WiFi y solicitudes HTTP POST esta comunicación permite integrar el dispositivo IoT con la plataforma central del sistema, manteniendo un flujo de información entre la captura realizada por el prototipo y los servicios encargados de almacenar, procesar y visualizar los resultados respiratorios.

Comunicación con api rest: El backend recibe los registros respiratorios enviados por el dispositivo IoT y actúa como intermediario entre el prototipo, la base de datos y el servidor de Machine Learning, una vez recibido el audio, el sistema lo remite al servidor de análisis para ejecutar el procesamiento bioacústico y obtener el resultado correspondiente, esta comunicación mediante API REST permite separar las funciones de adquisición, almacenamiento, procesamiento y visualización dentro de la arquitectura implementada.

Sincronización remota: El sistema realiza el envío y registro de la información respiratoria para construir un historial de mediciones asociado a cada paciente, esta sincronización permite que los datos capturados por el dispositivo IoT queden disponibles para su consulta dentro de la aplicación web progresiva, facilitando la visualización de resultados, el seguimiento del comportamiento respiratorio y la organización cronológica de las mediciones generadas durante las pruebas del prototipo.

➤ **Módulo de aplicación web progresiva (PWA) y gestión de información**

Submódulo de backend y almacenamiento

Gestión de datos y comunicación: El backend del sistema está implementado mediante una API REST desarrollada con Node.js y Express.js, encargada de gestionar la comunicación entre el dispositivo IoT, el servidor de Machine Learning, la base de datos y la aplicación web progresiva, este componente recibe los registros respiratorios enviados por el prototipo, coordina su envío al servidor de análisis bioacústico, recibe los resultados generados y los almacena junto con la información correspondiente de pacientes y mediciones.

Base de datos (MongoDB Atlas): La información generada por el sistema es almacenada en una base de datos NoSQL implementada en MongoDB Atlas, lo que permite gestionar datos de manera flexible y organizada; esta base se almacenan usuarios, pacientes, mediciones respiratorias, resultados del análisis bioacústico, niveles

de confianza, audios y registros asociados al historial clínico. Este almacenamiento facilita la consulta de información histórica y permite mantener disponible la información para su visualización dentro de la aplicación web.

Submódulo de aplicación web progresiva (PWA)

Visualización de resultados respiratorios: La aplicación web progresiva permite visualizar los resultados del análisis bioacústico mediante interfaces claras y organizadas para cada tipo de usuario, los resultados se presentan mediante indicadores, métricas respiratorias, niveles de confianza, estado respiratorio, forma de onda y espectrogramas generados a partir de los audios procesados, esta visualización facilita la interpretación de la información obtenida, manteniendo el sistema como una herramienta tecnológica de apoyo y no como un medio de diagnóstico médico, permitiendo también que los médicos y familiares revisen la información de forma ordenada.

Gestión de usuarios y roles: La aplicación permite diferenciar el acceso según el tipo de usuario, considerando perfiles como administrador, médico y familiar, cada rol dispone de funciones específicas dentro del sistema, lo que permite organizar la información y controlar el acceso a los datos registrados, esta funcionalidad facilita la administración de usuarios, pacientes y responsables, permitiendo que cada perfil visualice únicamente la información correspondiente a su participación dentro del proceso de monitoreo respiratorio.

Monitoreo en tiempo real: El sistema permite visualizar información respiratoria en tiempo real a partir de los registros enviados por el dispositivo IoT y procesados por la plataforma, durante este proceso se muestran datos como frecuencia respiratoria estimada, resultado del análisis, nivel de confianza, estado de captura, forma de onda, espectrograma y características bioacústicas, esta interfaz permite verificar el funcionamiento del prototipo durante las pruebas técnicas controladas y observar el comportamiento de cada medición realizada.

Historial de mediciones: La aplicación web progresiva permite almacenar y consultar un historial de mediciones respiratorias organizadas de manera cronológica por paciente, cada registro incluye información generada durante el análisis, como métricas

respiratorias, resultado obtenido, confianza del modelo, fecha de medición y recursos visuales asociados, este historial permite observar la evolución del comportamiento respiratorio y facilita el seguimiento de los resultados obtenidos durante las evaluaciones realizadas con el prototipo.

Interpretación visual del estado respiratorio: El sistema presenta los resultados del análisis bioacústico mediante etiquetas, niveles de confianza y mensajes de interpretación que facilitan la comprensión del estado respiratorio del paciente, esta información se genera a partir del resultado producido por el modelo de clasificación y se muestra en la aplicación de forma organizada para médicos y familiares, su finalidad es apoyar el seguimiento del paciente y facilitar la lectura de los resultados obtenidos.

1.3 Objetivos del proyecto

Objetivo general

Implementar un prototipo IoT orientado a la adquisición y análisis bioacústico de sonidos respiratorios infantiles, mediante técnicas de procesamiento de señales y extracción de características espectrales, para la clasificación automática de señales respiratorias.

Objetivos específicos

Diseñar la arquitectura IoT, integrando un dispositivo basado en ESP32, sensores acústicos y módulos de conectividad, para la adquisición de sonidos respiratorios pediátricos.

Implementar técnicas de análisis bioacústico mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la extracción de características espectrales relevantes, para el procesamiento de señales respiratorias.

Procesar el conjunto de datos bioacústicos, aplicando técnicas de limpieza, segmentación y extracción de características, con el fin de apoyar la clasificación automática de sonidos respiratorios.

Desarrollar una aplicación web progresiva, mediante la implementación de interfaces de visualización y la evaluación del prototipo IoT a través de pruebas técnicas controladas, para presentar métricas respiratorias y resultados del análisis bioacústico.

1.4 Justificación

El avance de las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) ha permitido el desarrollo de sistemas inteligentes orientados al monitoreo mediante dispositivos conectados y procesamiento digital de datos, abriendo nuevas posibilidades para el apoyo al análisis del comportamiento respiratorio en contextos con acceso limitado a servicios especializados. El análisis de sonidos respiratorios infantiles representa un campo de interés relevante, ya que permite identificar y clasificar patrones acústicos asociados a afecciones respiratorias frecuentes, como el asma y la bronquitis, sin sustituir la evaluación médica profesional [11] [12].

El presente proyecto propone el desarrollo de un prototipo IoT para la clasificación automática de sonidos respiratorios en niños, basado en características bioacústicas objetivas, el prototipo emplea sensores no invasivos para la captura de señales respiratorias, las cuales son transmitidas vía conectividad WiFi hacia una plataforma digital para su procesamiento, análisis y clasificación automática, este enfoque permite la adquisición continua de información de forma accesible y segura, especialmente útil en entornos con recursos tecnológicos limitados [13].

El proyecto emplea el uso de técnicas de procesamiento digital de señales para el análisis de los sonidos respiratorios capturados, apoyándose en la extracción de características acústicas que permiten estructurar la información de manera sistemática, estas características facilitan la identificación de patrones respiratorios anómalos y constituyen la base para la clasificación automática de los sonidos respiratorios incorporando enfoques de análisis más avanzados para la mejor interpretación de datos obtenidos.

El desarrollo y validación del proyecto contará con el apoyo de un profesional médico, quien colaborará en la orientación técnica para la correcta interpretación de los sonidos respiratorios y la definición de criterios de clasificación, garantizando que el prototipo se mantenga como una herramienta de apoyo tecnológico y no como un medio de diagnóstico clínico. De esta manera el prototipo se enfoca en la clasificación automática de sonidos respiratorios, respetando los límites éticos y profesionales del ámbito de la salud, esta orientación permite que los resultados generados sean utilizados de manera complementaria para el monitoreo respiratorio.

La implementación de este proyecto busca beneficiar a niños de la fundación AVSI y a familias, especialmente en zonas con acceso limitado a herramientas de monitoreo respiratorio. La solución propuesta contribuye a reducir brechas tecnológicas al ofrecer información organizada y comprensible a través de una aplicación web progresiva (PWA), accesible desde navegadores web o dispositivos móviles, apoyando el seguimiento del estado respiratorio infantil y fortaleciendo el uso de tecnologías IoT en contextos de salud.

Este proyecto está alineado a los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2025- 2029 en los siguientes:

- Objetivo 1: Garantizar una vida digna con igualdad de oportunidades para todas las personas.

Política 1.3: Mejorar la prestación de los servicios de salud de manera integral y con calidad, enfatizando la atención a grupos prioritarios y todos aquellos en situación de vulnerabilidad [14].

- Objetivo 7: Impulsar el desarrollo digital y la conectividad para reducir brechas y promover la inclusión tecnológica en todo el territorio nacional

Política 7.1: Impulsar el desarrollo digital mejorando en la tecnología y la expansión de la conectividad en áreas geográficas no atendidas o con conectividad limitada [14].

1.5 Alcance del proyecto

La propuesta se centra en el diseño, desarrollo e integración de un prototipo IoT orientado al análisis bioacústico y clasificación de sonidos respiratorios, con enfoque en su aplicación en contextos pediátricos, mediante la combinación de un sistema de captura de audio, procesamiento de señales y una plataforma web para la visualización de resultados. El sistema busca ofrecer una alternativa tecnológica que permita registrar información respiratoria de manera organizada, facilitando su interpretación en entornos donde no se dispone de herramientas especializadas y apoyando el monitoreo del estado respiratorio.

El sistema incorpora un módulo basado en ESP32 que permite la captura no invasiva de sonidos respiratorios a través de un micrófono digital, complementado con un

acelerómetro para registrar el movimiento asociado al proceso respiratorio. Los datos capturados corresponden a señales acústicas que posteriormente son utilizadas para su análisis, constituyendo la base para la identificación de patrones respiratorios. Este tipo de adquisición resulta adecuado considerando su posible aplicación en entornos pediátricos, ya que permite obtener información sin generar incomodidad en el paciente.

Las señales capturadas son enviadas al servidor, donde son procesadas mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), lo que permite obtener características relevantes como energía, amplitud y distribución en diferentes rangos de frecuencia, estas características permiten estructurar la información respiratoria de forma organizada, facilitando su interpretación dentro del sistema. Con estos datos se realiza la clasificación de los sonidos respiratorios para identificar patrones asociados a afecciones como asma y bronquitis, considerando de manera complementaria el uso de técnicas de aprendizaje automático como apoyo en el análisis de las señales.

La información generada es transmitida mediante conectividad WiFi hacia un sistema backend, donde se almacenan los registros respiratorios junto con la información de los pacientes para el desarrollo de una aplicación web progresiva (PWA), accesible desde navegadores web y dispositivos móviles, que permite visualizar mediciones, consultar registros previos y acceder a los resultados generados por el sistema. La aplicación contempla diferentes tipos de usuario, incluyendo administrador, personal médico y familiar, cada uno con acceso a funciones específicas según su rol dentro del sistema del aplicativo y este acceso diferenciado contribuye a que cada usuario interactúe únicamente con las funciones necesarias para su participación en el proceso de monitoreo respiratorio.

El desarrollo contempla la integración funcional de los componentes principales del sistema, incluyendo la captura de datos, el procesamiento de señales y la visualización en la aplicación web, así como la validación técnica del prototipo mediante pruebas controladas en un entorno real. El proyecto se limita al desarrollo de una herramienta tecnológica de apoyo orientada al análisis y clasificación de sonidos respiratorios, por lo que no contempla la emisión de diagnósticos médicos ni su aplicación como herramienta clínica validada en entornos de atención médica, manteniéndose dentro de un enfoque tecnológico y experimental.

1.6 Metodología del proyecto

1.6.1 Metodología de investigación

Este proyecto se desarrollará en Fundación AVSI Ecuador, organización humanitaria internacional que cuenta con una sede en la provincia de Santa Elena que se encarga de brindar apoyo integral a poblaciones vulnerables tanto de sectores rurales como urbanos, centrándose en el seguimiento continuo de los beneficiarios que en su mayoría son niños, por medio de programas especializados en nutrición infantil, apoyo psicológico, y atención en salud general. Esta fundación cuenta con alrededor de 50 niños registrados de 0 a 5 años, se les brinda atención tanto en las instalaciones como también se realizan visitas domiciliarias para mantener un monitoreo continuo, atendiendo de lunes a viernes en horarios de 8:00 am a 5:00 pm, aunque cuentan con 3 áreas de atención, no cuentan con todas las herramientas necesarias para brindar atención en el área de salud. Esta institución favorece la adopción de soluciones tecnológicas que ayuden al fortalecimiento en sus servicios de atención lo cual motiva a la implementación del prototipo de clasificación de sonidos (asma y bronquitis) con IoT que se propone.

1.6.1.1 Diseño y alcance de la investigación

El proyecto adopta un diseño técnico-descriptivo, debido a que se centra en describir el desarrollo, funcionamiento e integración de un sistema tecnológico compuesto por hardware, firmware, backend, servidor de Machine Learning, base de datos y aplicación web progresiva. La investigación descriptiva permite caracterizar procesos, componentes y resultados observables de un fenómeno o sistema, mientras que la investigación aplicada se orienta a resolver una necesidad concreta mediante la creación o mejora de una solución funcional [15] [16]. El diseño se enfoca en validar el comportamiento técnico del prototipo IoT durante pruebas controladas y registros obtenidos en campo.

1.6.1.2 Tipo y métodos de investigación

Se optará por un enfoque técnico-descriptivo [17], debido a que el proyecto se centra en desarrollar y describir el funcionamiento de un prototipo IoT para la adquisición, procesamiento y clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos. Este enfoque permite documentar las características técnicas del dispositivo, la

comunicación con el backend, el procesamiento bioacústico, el comportamiento del modelo Random Forest y la visualización de resultados en la aplicación web progresiva, dentro de pruebas técnicas controladas y sin emitir diagnósticos médicos.

Sobre esta base se aplicará el método deductivo [18], partiendo de la idea de que el prototipo IoT será capaz de capturar sonidos respiratorios, procesarlos mediante características bioacústicas y generar una clasificación automática visible en la plataforma. A partir de esta idea se derivan comprobaciones observables, como el envío correcto de registros, la extracción de métricas acústicas, la generación de resultados por el modelo, el almacenamiento en MongoDB Atlas y la consulta posterior desde la PWA durante las pruebas realizadas.

De esta forma el enfoque técnico-descriptivo permite caracterizar el sistema desarrollado y el método deductivo orienta la comprobación de su funcionamiento a partir de resultados verificables [19]. La investigación no busca modificar el estado clínico de los participantes ni reemplazar la valoración profesional, sino validar técnicamente el flujo del prototipo, desde la captura del sonido respiratorio hasta la presentación de resultados automáticos como apoyo al monitoreo respiratorio infantil.

1.6.1.3 Beneficiarios del proyecto

Este proyecto se desarrollará en Fundación AVSI Ecuador, organización humanitaria internacional que cuenta con una sede en la provincia de Santa Elena que se encarga de brindar apoyo integral a poblaciones vulnerables tanto de sectores rurales como urbanos, centrándose en el seguimiento continuo de los beneficiarios que en su mayoría son niños, por medio de programas especializados en nutrición infantil, apoyo psicológico, y atención en salud general.

Esta fundación cuenta con alrededor de 50 niños registrados de 0 a 5 años, se les brinda atención tanto en las instalaciones como también se realizan visitas domiciliarias para mantener un monitoreo continuo, atendiendo de lunes a viernes en horarios de 8:00 am a 5:00 pm, aunque cuentan con 3 áreas de atención, no cuentan con todas las herramientas necesarias para brindar atención en el área de salud. Esta institución favorece la adopción de soluciones tecnológicas que ayuden al fortalecimiento en sus

Mservicios de atención lo cual motiva a la implementación del prototipo de clasificación de sonidos (asma y bronquitis) con IoT que se propone.

1.6.1.4 Población y muestra

La población cuenta con aproximadamente 50 niños de 0 a 5 años, quienes reciben acompañamiento en salud, nutrición y desarrollo integral, esta población resulta pertinente para el proyecto porque pertenece al grupo pediátrico hacia el cual se orienta el prototipo IoT de monitoreo respiratorio. La muestra se plantea con 5 niños seleccionados de forma no probabilística por conveniencia, considerando disponibilidad, autorización del representante y condiciones adecuadas para realizar la prueba con supervisión, la muestra permite ejecutar mediciones controladas, observar el comportamiento del dispositivo y registrar información suficiente para evaluar la adquisición, procesamiento y clasificación automática de los sonidos respiratorios.

1.6.2 Idea a defender

Este trabajo será capaz de realizar la clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos, mediante un prototipo IoT que puede apoyar el monitoreo respiratorio infantil en un entorno real controlado. Su cumplimiento se verificará mediante la captura efectiva de audios respiratorios, el procesamiento bioacústico de las señales, la generación de una etiqueta de clasificación, el registro de la medición en la base de datos y la visualización del resultado en la PWA, la evaluación se realizará desde una perspectiva técnica, sin sustituir el criterio de un profesional de salud.

1.6.2.1 Variable

Evaluación de la variable "Clasificación automática de sonidos respiratorios pediátricos"

Fase de medición	Herramienta utilizada	Tipo de datos que entrega	Variable observada
Pre-test	Prototipo IoT con ESP32 e INMP441	Mediciones respiratorias enviadas y registradas	Mediciones iniciales

Fase de medición	Herramienta utilizada	Tipo de datos que entrega	Variable observada
Intervención	Procesamiento bioacústico y modelo Random Forest	Características acústicas, clase predicha y confianza	Clasificación automática
Post-test	PWA, MongoDB Atlas y reportes	Clasificaciones visibles, almacenadas y reportadas	Clasificaciones finales
Resultado	Análisis comparativo automatizado	Comparativa entre mediciones enviadas y clasificadas	Porcentaje de clasificación efectiva

Tabla 1: Variables.

Unidad de medida: Porcentaje de mediciones respiratorias clasificadas automáticamente.

Mediciones enviadas

- Corresponde al número total de registros respiratorios capturados por el dispositivo IoT y enviados al backend durante las pruebas técnicas o mediciones reales.
- Este dato permite establecer la base de entrada del sistema, considerando los audios o fragmentos respiratorios que ingresan al flujo de procesamiento.

Mediciones clasificadas

- Representa la cantidad de registros que generaron una salida válida del modelo, incluyendo clase predicha, nivel de confianza y almacenamiento en la base de datos.
- Este valor permite verificar que el sistema no solo recibió información, sino que logró procesarla, clasificarla y presentarla dentro de la aplicación web progresiva.

Porcentaje de clasificación efectiva

Se calcula como:

$$Pc = (Mc / Me) \times 100$$

Donde Pc representa el porcentaje de clasificación efectiva, Mc corresponde al número de mediciones clasificadas automáticamente y Me corresponde al número total de mediciones enviadas por el dispositivo IoT.

1.6.3 Análisis de recolección de datos

1.6.3.1 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas seleccionadas corresponden a observación directa estructurada, instrumentación automática y encuesta. La observación directa permite registrar las condiciones de captura, estabilidad del paciente, colocación del sensor y comportamiento del dispositivo durante la medición, la instrumentación automática permite obtener registros generados por el sistema, como audios, características bioacústicas, resultados del modelo, confianza, historial y reportes, la encuesta se orienta a conocer la percepción de los usuarios autorizados sobre la claridad de la información y la utilidad del prototipo como apoyo al monitoreo respiratorio [20] [21].

Instrumentos	Descripción
Protocolo de pruebas respiratorias (Anexo 1)	Guía que define condiciones de captura, ubicación del sensor en región dorsal, tiempo de medición, segmentación del audio y criterios de repetición.
Registro automático del sistema IoT (Anexo 2)	Estructura de datos generada por el backend y MongoDB Atlas con audio, características acústicas, clase predicha, confianza y fecha de medición.

Instrumentos	Descripción
Matriz de mediciones respiratorias (Anexo 3)	Tabla consolidada con código de participante, edad, mediciones realizadas, resultado obtenido, confianza y observaciones técnicas.
Cuestionario de percepción del sistema (Anexo 4)	Instrumento dirigido a usuarios autorizados para valorar facilidad de uso, comprensión de resultados y utilidad percibida del prototipo.
Formato de consentimiento informado (Anexo 5)	Documento de autorización del representante legal para el uso académico de la información y protección de identidad de los menores.

1.7. Metodología de desarrollo

La metodología de desarrollo incremental se adopta para el desarrollo de este proyecto ya que permite dividirlo en incrementos funcionales o incrementos que se desarrollan, se prueban e integran de forma incremental [22]. Esta técnica es adecuada a los proyectos de IoT que, como el propuesto, integra múltiples componentes (hardware, firmware, backend y frontend) y permite separarlos uno de otro, este enfoque facilita la verificación individual de cada módulo, permitiendo comprobar primero la captura del sonido respiratorio, luego la comunicación con el backend, el procesamiento bioacústico, el almacenamiento de datos y finalmente la visualización de resultados en la aplicación web progresiva.

Incrementos

Incremento 1: Adquisición de datos

Módulo 1: Dispositivo iot

Captura de señales acústicas respiratorias mediante micrófono digital MEMS con interfaz I2S.

Registro de movimiento mediante el acelerómetro MPU6050 como apoyo para verificar la estabilidad del dispositivo durante la captura.

Validación funcional del hardware del dispositivo IoT durante pruebas experimentales.

Incremento 2: Preparación del registro respiratorio

Módulo 1: Dispositivo iot

Aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a las señales respiratorias capturadas.

Extracción de características bioacústicas como RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, spectral rolloff, energía por bandas y coeficientes MFCC.

Organización y estructuración de las características bioacústicas obtenidas para su posterior utilización durante la clasificación automática.

Incremento 3: Comunicación inalámbrica

Módulo 1: Dispositivo iot

Configuración de la conexión WiFi.

Transmisión del audio respiratorio mediante HTTP.

Integración del dispositivo IoT con el backend mediante API REST.

Incremento 4: Backend, almacenamiento

Módulo 2: Aplicación Web Progresiva y gestión de información

Desarrollo de la API REST para la recepción y gestión de las mediciones respiratorias.

Comunicación con el servidor de procesamiento bioacústico.

Almacenamiento de usuarios, pacientes y mediciones en MongoDB Atlas.

Gestión de autenticación y control de acceso.

Incremento 5: Aplicación web progresiva

Módulo 2: Aplicación web progresiva y gestión de información

Desarrollo de las interfaces para administradores, médicos y familiares.

Monitoreo respiratorio en tiempo real.

Visualización del historial clínico y métricas respiratorias.

Generación de reportes.

Gestión del perfil de usuario.

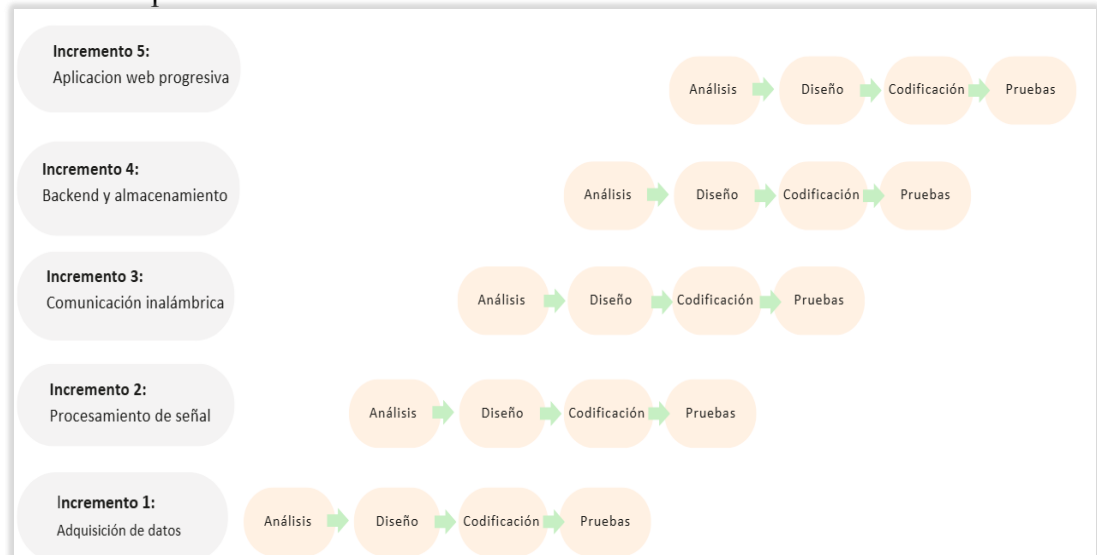


Figura 1: Incrementos del desarrollo del sistema IoT: Elaboración propia.

CAPÍTULO 2. PROPUESTA

2.1 Marco contextual

2.1.1 Fundación AVSI Ecuador

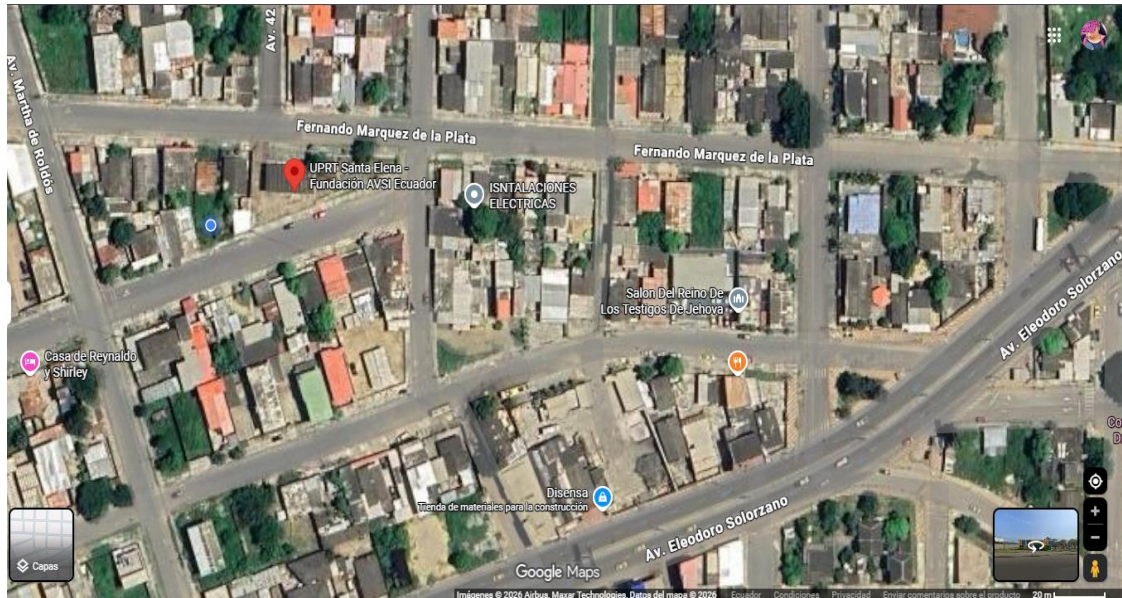


Figura 2: Ubicación de la Fundación Avsi.

La Fundación AVSI Ecuador es una organización internacional sin fines de lucro que trabaja en diferentes áreas sociales, como salud, educación, nutrición y acompañamiento familiar, enfocándose principalmente en apoyar a poblaciones en situación de vulnerabilidad. Su trabajo se basa en brindar atención directa a las personas, especialmente a niños, mediante programas que buscan mejorar sus condiciones de vida y su desarrollo desde edades tempranas.

La fundación se encuentra ubicada en la provincia de Santa Elena, cantón Santa Elena, Ecuador, donde desarrolla actividades dirigidas principalmente a la población infantil, dentro de sus programas, se realiza el seguimiento del estado de salud y desarrollo de niños en edades comprendidas entre 0 y 5 años, quienes requieren atención constante debido a su etapa de crecimiento y a las condiciones de su entorno. Las actividades que realiza la fundación se llevan a cabo bajo un enfoque cercano a la comunidad, involucrando tanto a los niños como a sus familias, esto permite tener un mejor conocimiento de la situación de cada beneficiario y facilita el acompañamiento en su proceso de desarrollo, manteniendo un contacto continuo con su entorno.

2.1.2 Entorno de atención

El horario de atención establecido por la fundación es de lunes a viernes, en jornadas comprendidas entre las 08:00 y las 17:00, durante las cuales se realizan controles básicos, evaluaciones generales y actividades de seguimiento. Este esquema permite organizar la atención de los beneficiarios de manera continua, facilitando el monitoreo de su estado de salud. Las actividades de atención se desarrollan mediante un modelo que combina la atención en sede con visitas domiciliarias, que permiten tener un seguimiento más cercano de los niños, ya que no solo se los evalúa en un espacio físico, sino también dentro de su entorno familiar, lo cual ayuda a entender mejor su situación.

2.1.3 Limitaciones del entorno

En la Fundación el seguimiento de la salud infantil se realiza mediante actividades propias de la atención diaria, como la observación y las revisiones generales de los beneficiarios, que permiten mantener un control básico del estado de salud de los niños y dar continuidad a su seguimiento dentro de las actividades que se desarrollan en la institución. Durante las evaluaciones, la revisión del estado de salud se apoya en procedimientos habituales utilizados en la atención infantil, los cuales permiten identificar posibles cambios en la condición de los niños.

La forma en que se realizan estas evaluaciones puede variar dependiendo del entorno en el que se desarrollen, especialmente cuando se alterna entre la sede y las visitas domiciliarias, además al llevarse a cabo en distintos espacios, el seguimiento puede depender de las condiciones disponibles en cada caso. La infraestructura actual no contempla el uso de sistemas tecnológicos de apoyo orientados al monitoreo respiratorio, como herramientas digitales que permitan registrar y analizar información de forma continua, esto abre la posibilidad de incorporar soluciones que puedan complementar las actividades que se desarrollan dentro de la fundación.

2.1.4 Población objetivo y necesidades identificadas

La población está conformada por niños de entre 0 y 5 años que forman parte de los programas de atención de la Fundación AVSI, estos niños requieren un seguimiento constante debido a que se encuentran en una etapa importante de desarrollo, en la cual es necesario mantener un control periódico de su estado de salud y bienestar general,

dentro de este grupo, se observa la necesidad de contar con herramientas que apoyen el monitoreo del estado de salud, especialmente en lo relacionado con el sistema respiratorio, en muchos casos la evaluación se basa en la experiencia del personal, lo que puede hacer que ciertos aspectos dependan de la interpretación durante la revisión realizada en cada control.

2.1.5 Oportunidades de implementación tecnológica

En entornos como la Fundación AVSI, la implementación de herramientas tecnológicas como IoT puede servir como apoyo a las actividades que ya se realizan, permitiendo complementar el seguimiento del estado de salud de los beneficiarios, la incorporación de dispositivos que faciliten el registro y análisis de datos puede contribuir a una mejor organización y seguimiento de la información obtenida durante las evaluaciones.

Este tipo de entorno presenta condiciones que permiten integrar estas soluciones sin modificar la dinámica de trabajo existente, la atención continua a los niños y la necesidad de llevar un control de su evolución hacen posible el uso de herramientas que apoyen el monitoreo, especialmente en aspectos relacionados con el estado respiratorio, el uso de estas tecnologías puede facilitar el seguimiento de los beneficiarios, permitiendo contar con una referencia adicional que complemente la revisión realizada por el personal de atención.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Fundamentos clínicos

2.2.1.1 Sonidos respiratorios

Los sonidos respiratorios son señales acústicas producidas por el desplazamiento del aire a través de las vías respiratorias durante la inspiración y la espiración. Su comportamiento puede describirse mediante propiedades como intensidad, duración, continuidad y contenido frecuencial. La auscultación digital permite registrar estas señales y convertirlas en información procesable, lo que favorece la identificación objetiva de patrones normales y adventicios. En el presente proyecto, los sonidos respiratorios constituyen la entrada principal del sistema, debido a que son capturados

mediante el micrófono INMP441 adaptado al estetoscopio y posteriormente analizados mediante técnicas bioacústicas [23].

2.2.1.2 Tipos de sonidos respiratorios

Los sonidos respiratorios pueden clasificarse en normales y adventicios, los sonidos normales se producen por el paso regular del aire y varían según la región anatómica donde se realiza la auscultación. Los adventicios aparecen cuando existe una alteración del flujo aéreo e incluyen, entre otros, sibilancias, roncus y crepitantes, las sibilancias son sonidos continuos de tono relativamente alto asociados con estrechamiento de las vías respiratorias, mientras que los roncus presentan un tono más bajo y suelen relacionarse con secreciones o vibraciones en vías aéreas de mayor calibre. Esta diferenciación resulta pertinente para el proyecto, ya que las variaciones temporales y espectrales de la señal son utilizadas como información para la clasificación automática [24].

2.2.1.3 Asma y bronquitis

El asma es una enfermedad respiratoria crónica y heterogénea caracterizada por síntomas variables, como sibilancias, dificultad respiratoria, opresión torácica y tos, junto con una limitación variable del flujo espiratorio, debido a que sus manifestaciones pueden cambiar con el tiempo y la intensidad, el análisis de sonidos respiratorios puede aportar información complementaria durante el monitoreo, sin sustituir la valoración médica [25], la presencia de sibilancias resulta relevante porque puede reflejar variaciones acústicas asociadas al estrechamiento de las vías respiratorias..

La bronquitis aguda corresponde a un proceso inflamatorio de las vías respiratorias inferiores que se manifiesta principalmente mediante tos, con o sin producción de esputo, y suele presentarse como una condición autolimitada de origen viral, la denominación bronquial se utiliza como una categoría del conjunto de datos y del modelo de clasificación, por lo que los resultados deben interpretarse como patrones acústicos compatibles con dicha clase y no como un diagnóstico clínico de bronquitis [26]. Esta aclaración permite mantener el enfoque del sistema como apoyo tecnológico para el análisis respiratorio, evitando atribuir valor diagnóstico directo a la clasificación generada.

2.2.2 Señales y análisis acústico

2.2.2.1 Señales bioacústicas respiratorias

Las señales bioacústicas son manifestaciones sonoras originadas por procesos biológicos y fisiológicos que pueden capturarse, representarse y analizarse mediante sistemas digitales, en el sistema respiratorio, estas señales contienen variaciones producidas por el flujo de aire, la interacción con las vías respiratorias y la presencia de eventos adventicios. Su análisis computacional permite extraer descriptores temporales, espectrales y cepstrales que resumen el comportamiento del audio y sirven como entrada para modelos de clasificación. En el prototipo desarrollado, la señal bioacústica se obtiene de manera no invasiva y se procesa para generar métricas, visualizaciones y una categoría automática de apoyo al monitoreo [27] [28].

2.2.2.2 Señal de audio digital

Una señal de audio digital es la representación numérica de una señal sonora continua. Su obtención comprende el muestreo, mediante el cual se registran valores de amplitud en instantes discretos, y la cuantificación, que asigna cada muestra a uno de los niveles disponibles según la resolución empleada, esta representación permite almacenar, transmitir y procesar el sonido mediante sistemas digitales. En el prototipo desarrollado, el micrófono INMP441 entrega muestras digitales a través de la interfaz I2S y el ESP32 organiza el registro respiratorio a una frecuencia de muestreo de 16 kHz antes de enviarlo al backend para su análisis bioacústico [29]. Esta conversión digital permite conservar la señal en un formato compatible con las etapas de procesamiento, extracción de características y clasificación automática.

2.2.2.3 Características bioacústicas respiratorias

Las características bioacústicas son descriptores numéricos obtenidos a partir de una señal respiratoria para resumir su comportamiento temporal, energético y espectral. En los sistemas de análisis automático, estas variables permiten transformar el audio en una estructura adecuada para el entrenamiento y uso de modelos de clasificación, las revisiones recientes sobre análisis respiratorio señalan el empleo frecuente de MFCC, tasa de cruces por cero, centroide espectral, ancho de banda, spectral rolloff y energías por bandas como entradas de algoritmos de aprendizaje automático [30].

Energía RMS (Root mean square)

Es una característica utilizada en el procesamiento digital de señales para estimar la energía promedio contenida en una señal acústica, esta medida permite cuantificar la intensidad del sonido respiratorio durante cada ciclo de inspiración y espiración, proporcionando información sobre la amplitud efectiva de la señal capturada. Valores elevados de RMS indican sonidos con mayor contenido energético, mientras que valores bajos corresponden a señales de menor intensidad [31]. Esta métrica permite comparar la fuerza acústica de las capturas respiratorias y apoyar la identificación de registros con baja amplitud o posible interferencia durante la medición.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

x_i representa cada muestra de la señal respiratoria y N corresponde al número total de muestras analizadas. Esta medida proporciona una representación global de la energía presente en la señal acústica capturada, permitiendo cuantificar la intensidad del sonido respiratorio antes de la etapa de clasificación automática.

Tasa de cruces por cero (Zero Crossing Rate - ZCR)

La tasa de cruces por cero representa el número de veces que una señal cambia de signo durante un intervalo determinado, esta característica permite describir la variabilidad temporal de la señal y aporta información sobre el contenido frecuencial presente en los sonidos respiratorios. Cuando se combina con otras características espectrales facilita la diferenciación entre distintos patrones acústicos, mejorando el desempeño de los algoritmos de clasificación; en el sistema desarrollado esta métrica forma parte del conjunto de variables empleadas durante el entrenamiento y la predicción realizada por el modelo de aprendizaje automático [32].

$$ZCR = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} |sign(x_i) - sign(x_{i+1})|$$

y x_{i+1} representan dos muestras consecutivas de la señal respiratoria, mientras que N corresponde al número total de muestras analizadas. La función **sign()** determina el signo de cada muestra y permite contabilizar los cambios de polaridad presentes en la señal, proporcionando una medida de su variabilidad temporal.

Centroide espectral

El centroide espectral es una característica que determina la frecuencia alrededor de la cual se concentra la mayor parte de la energía de una señal acústica, esta medida permite describir la distribución energética del espectro y proporciona información sobre el contenido frecuencial predominante del sonido respiratorio. Debido a que las patologías respiratorias producen modificaciones en la distribución de frecuencias, el centroide espectral constituye una característica útil para diferenciar distintos patrones respiratorios. En el presente proyecto fue calculado durante la extracción de características y utilizado como variable de entrada del modelo Random Forest [33].

$$c = \frac{\sum_{k=1}^N f(k) \cdot x(k)}{\sum_{k=1}^N x(k)}$$

$f(k)$ representa la frecuencia correspondiente a cada componente espectral, $X(k)$ corresponde a la magnitud del espectro y N indica el número total de componentes analizados. Esta medida permite determinar la frecuencia alrededor de la cual se concentra la mayor parte de la energía de la señal respiratoria.

Ancho de banda espectral

El ancho de banda espectral describe la dispersión de las frecuencias alrededor del centroide espectral, permitiendo conocer qué tan distribuida se encuentra la energía dentro del espectro de una señal acústica, esta característica complementa la información proporcionada por el centroide espectral y facilita la identificación de diferencias entre sonidos respiratorios con distintas distribuciones frecuenciales. En el sistema desarrollado el ancho de banda espectral fue empleado como una característica adicional durante la extracción de variables bioacústicas, mejorando la representación de las señales respiratorias utilizadas por el modelo de clasificación automática [34].

$$BW = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N (f(k) - C)^2 X(k)}}{\sum_{k=1}^N X(k)}$$

$f(k)$ representa la frecuencia de cada componente espectral, C corresponde al centroide espectral, $X(k)$ indica la magnitud de cada componente y N representa el número total de frecuencias analizadas. Esta característica cuantifica la dispersión de la energía alrededor del centroide espectral, permitiendo describir la distribución frecuencial de la señal respiratoria.

Spectral rolloff

Es una característica espectral que determina la frecuencia por debajo de la cual se concentra un porcentaje determinado de la energía total de la señal, generalmente entre el 85 % y el 95 %. Esta característica permite identificar el límite superior del contenido energético del espectro y contribuye a diferenciar señales con distinta distribución frecuencial. En el presente proyecto fue utilizada como una característica complementaria durante la etapa de extracción de variables bioacústicas, proporcionando información adicional para mejorar la clasificación automática realizada mediante el modelo Random Forest [35].

Energía por bandas

La energía por bandas corresponde a la cantidad de energía contenida dentro de intervalos específicos de frecuencia previamente definidos, esta característica permite analizar la distribución energética del sonido respiratorio en diferentes regiones del espectro, facilitando la identificación de patrones asociados a sonidos normales y adventicios. En el sistema desarrollado se calcularon diferentes bandas espectrales como variables de entrada del modelo Random Forest, permitiendo representar con mayor precisión el comportamiento frecuencial de cada señal respiratoria y fortalecer el proceso de clasificación automática [36].

2.2.3 Procesamiento digital de señales

2.2.3.1 Transformada rápida de fourier (FFT)

Es un algoritmo utilizado para transformar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, permitiendo identificar las diferentes componentes frecuenciales que conforman una señal acústica. Esta transformación facilita el análisis del contenido espectral de los sonidos respiratorios, permitiendo observar cómo se distribuye la energía en cada frecuencia presente durante la respiración. En el presente proyecto la FFT constituye la primera etapa del procesamiento espectral, proporcionando la información necesaria para calcular características bioacústicas y generar representaciones utilizadas durante la clasificación automática de los sonidos respiratorios [37].

$$X(K) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

$x(n)$ representa la amplitud de la señal respiratoria en el dominio temporal, N corresponde al número total de muestras analizadas y $X(k)$ representa la magnitud obtenida para cada componente de frecuencia.

2.2.3.2 Transformada de fourier de tiempo corto (STFT)

Es una extensión de la FFT que permite analizar la evolución temporal del contenido frecuencial de una señal mediante ventanas de corta duración. A diferencia de la FFT convencional, la STFT conserva simultáneamente información del tiempo y de la frecuencia, lo que resulta especialmente útil para estudiar señales no estacionarias como los sonidos respiratorios. En el presente proyecto esta técnica permitió generar representaciones tiempo-frecuencia utilizadas para construir espectrogramas y facilitar la extracción de características relevantes para el modelo de clasificación por medio de gráficas [38].

$$STFT\{x(t)\}(m, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x[n] w[n - m] e^{-j\omega n} dn$$

$x[n]$ representa la señal respiratoria digital, $w[n - m]$ corresponde a la ventana de análisis centrada en el instante m , mientras que ω representa la frecuencia angular analizada.

2.2.3.3 Espectrograma mel

El espectrograma Mel corresponde a una representación tiempo-frecuencia obtenida a partir de la STFT mediante la aplicación de un banco de filtros distribuido según la escala Mel, diseñada para aproximar la percepción auditiva humana, esta representación concentra la energía de la señal en bandas perceptualmente relevantes, facilitando la identificación de patrones acústicos presentes en los sonidos respiratorios. En el presente proyecto el espectrograma Mel fue utilizado como una etapa previa al cálculo de los coeficientes MFCC, permitiendo mejorar la representación espectral utilizada durante el procesamiento bioacústico [39].

$$Mel(f) = 2595 \log_{10}(1 + 700f)$$

F representa la frecuencia expresada en Hertz y $Mel(f)$ corresponde a la frecuencia equivalente en la escala Mel. Esta conversión aproxima la respuesta auditiva del oído humano.

2.2.3.4 Coeficientes cepstrales en las frecuencias de mel (MFCC)

Constituyen uno de los descriptores más utilizados para representar señales acústicas debido a su capacidad para resumir la información espectral de forma compacta, estos coeficientes se obtienen aplicando la Transformada Discreta del Coseno sobre el logaritmo de la energía calculada en la escala Mel, permitiendo describir patrones acústicos relevantes para tareas de reconocimiento y clasificación. En el presente proyecto los MFCC fueron empleados como una de las principales características de entrada del modelo Random Forest debido a su capacidad para representar adecuadamente los sonidos respiratorios [40].

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log(M_n) \cos[N\pi k(n - 0.5)]$$

M_n representa la energía correspondiente a cada filtro de la escala Mel, N corresponde al número total de filtros utilizados y C_k representa el coeficiente cepstral obtenido para cada componente.

2.2.4 Aprendizaje automático

2.2.4.1 Machine learning

El Machine Learning o aprendizaje automático es una rama de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender patrones a partir de datos y realizar tareas como clasificación o predicción sin ser programados explícitamente para cada caso, en el ámbito del procesamiento de audio, el Machine Learning se utiliza ampliamente para el reconocimiento y clasificación de señales acústicas, debido a su capacidad para adaptarse a diferentes patrones. [41].

2.2.4.2 Modelo de machine learning (Random Forest)

Random Forest es un modelo de aprendizaje automático basado en conjuntos (ensemble) que construye múltiples árboles de decisión durante el entrenamiento y combina sus resultados para mejorar la precisión y reducir el sobreajuste, un modelo es Random Forest, empleado para la clasificación automática de los sonidos respiratorios, utilizando como entrada las características extraídas de las señales acústicas, lo que permite identificar patrones y asignar categorías dentro del sistema desarrollado y al manejar múltiples [42].

2.2.5 Arquitectura del sistema

2.2.5.1 Internet de las cosas (IoT)

El Internet de las Cosas (IoT) es un paradigma tecnológico que permite la interconexión de dispositivos físicos mediante redes de comunicación, facilitando la captura, transmisión y procesamiento de datos en tiempo real, estos dispositivos, equipados con sensores, pueden recolectar información del entorno y enviarla a sistemas digitales para su análisis, en el área de la salud, el IoT ha permitido el desarrollo de soluciones orientadas al monitoreo de variables fisiológicas de manera remota y no invasiva [43].

2.2.5.2 Sensores acústicos

Los sensores acústicos son dispositivos capaces de captar ondas sonoras del entorno y convertirlas en señales eléctricas o digitales para su posterior procesamiento, su funcionamiento permite registrar variaciones de presión producidas por el sonido, lo que los hace útiles en aplicaciones de monitoreo, reconocimiento y análisis de señales acústicas, los sensores acústicos constituyen el medio principal para la adquisición de los sonidos respiratorios, ya que permiten captar la señal de audio que luego es procesada mediante técnicas de análisis espectral y utilizada en la clasificación automática dentro del sistema IoT desarrollado [44].

2.2.5.3 Sistemas embebidos

Los sistemas embebidos combinan hardware y software diseñados para realizar tareas específicas dentro de un dispositivo electrónico [45]. Un ejemplo es el ESP32 que es capaz de capturar, analizar y enviar señales de manera local, también a través de la nube ya que cuenta con bluetooth y wifi incluido por lo que es usado para dispositivos portátiles que requieren energía de manera autónoma, su capacidad de procesamiento local permite reducir la latencia y mantener el funcionamiento del dispositivo [46].

2.2.5.4 Acelerómetro mpu6050

El MPU6050 integra un acelerómetro y un giroscopio de tres ejes para registrar aceleración y velocidad angular. En el prototipo se utiliza para verificar la estabilidad del dispositivo IoT durante la captura respiratoria, sus datos permiten detectar desplazamientos que podrían introducir ruido o afectar la calidad del audio. Por tanto,

no mide directamente el movimiento corporal ni la frecuencia respiratoria del paciente, sino las variaciones físicas del dispositivo durante la medición [47].

2.2.5.5 Micrófono digital inpm441

El INMP441 es un micrófono MEMS digital que convierte las ondas acústicas en muestras digitales y las transmite mediante la interfaz I2S. En el prototipo se adapta a la campana y manguera del estetoscopio para captar los sonidos respiratorios de forma no invasiva. Su salida digital permite enviar el audio directamente al ESP32, reduciendo la necesidad de circuitos analógicos adicionales y facilitando su posterior procesamiento bioacústico [48].

2.2.6 Plataforma y almacenamiento

2.2.6.1 Base de datos

Una base de datos es un sistema organizado que permite almacenar, gestionar y recuperar información de manera estructurada, facilitando su acceso y análisis, estas herramientas son fundamentales en sistemas informáticos, ya que permiten mantener grandes volúmenes de datos de forma segura y eficiente, su uso facilita la consulta y visualización de datos en tiempo real, esto resulta clave en sistemas de monitoreo, donde la disponibilidad y consistencia de la información es esencial para garantizar la integridad de los datos y apoyar la toma de decisiones durante el funcionamiento del sistema, además de permitir el almacenamiento continuo de las mediciones respiratorias para su posterior consulta, análisis y seguimiento clínico [49].

2.2.6.2 Base de datos NoSQL

Las bases de datos NoSQL son sistemas de almacenamiento diseñados para manejar datos no estructurados o semi estructurados, ofreciendo mayor flexibilidad en comparación con las bases de datos relacionales, estas bases permiten almacenar información en formatos como documentos, clave-valor o grafos, adaptándose a diferentes tipos de aplicaciones modernas, permiten escalar horizontalmente, lo que mejora el rendimiento en aplicaciones que requieren alta disponibilidad y procesamiento en tiempo real y facilitan la integración con arquitecturas distribuidas utilizadas en soluciones basadas en Internet de las Cosas (IoT) [50].

2.2.6.3 MongoDB

MongoDB es una base de datos NoSQL orientada a documentos que almacena información en formato JSON, permitiendo una estructura flexible y dinámica, esta característica facilita la gestión de datos complejos, como las mediciones respiratorias generadas en el proyecto, ya que no requieren un esquema fijo, MongoDB permite consultas rápidas y eficientes, lo que es esencial para aplicaciones en tiempo real, su implementación en la nube mediante MongoDB Atlas garantiza la disponibilidad de los datos y permite su acceso desde diferentes dispositivos, facilitando la integración con el backend y la aplicación web del sistema para asegurar el almacenamiento y consulta eficiente de las mediciones respiratorias registradas durante el monitoreo [51].

2.2.6.4 Api rest

Una API REST es un tipo de arquitectura que utiliza el protocolo HTTP para facilitar la comunicación entre sistemas mediante solicitudes estructuradas, permite el uso de métodos como GET, POST, PUT y DELETE para gestionar recursos de manera eficiente y facilita la recuperación de información para su visualización en la aplicación web, garantizando una comunicación clara y organizada entre todos los componentes del sistema [52]. Esta arquitectura favorece la integración del sistema con servicios externos y permite ampliar sus funcionalidades de manera escalable y el uso de formatos estandarizados, como JSON, facilita el intercambio de datos entre el servidor y la interfaz de la aplicación.

2.2.6.5 Aplicaciones web progresivas (PWA)

Son aplicaciones desarrolladas mediante tecnologías web que integran características propias de aplicaciones móviles y sitios web, permitiendo ofrecer una experiencia más eficiente, accesible y adaptable a distintos dispositivos, estas aplicaciones destacan por su capacidad de mejorar el rendimiento, la interacción con el usuario y la disponibilidad de los servicios, respondiendo a las necesidades actuales en el uso de tecnologías digitales, la PWA se emplea como la interfaz principal del sistema, permitiendo a médicos, familiares y administradores visualizar los datos respiratorios, consultar registros y acceder a los resultados de la clasificación generada por el sistema IoT desarrollado [53].

2.3 Marco teórico

2.3.1 Fundamentos del procesamiento digital de señales para el análisis espectral de audio

El procesamiento digital de señales (DSP) es una disciplina que permite analizar, transformar y manipular señales mediante técnicas matemáticas aplicadas en sistemas digitales, uno de los aspectos fundamentales del DSP es la posibilidad de convertir una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que permite identificar las componentes frecuenciales presentes en el sonido [54]. Este enfoque resulta esencial en el análisis de señales complejas, ya que facilita la comprensión de su comportamiento interno y la identificación de patrones no evidentes a simple observación [55].

La Transformada de Fourier y sus variantes, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT), desempeñan un papel fundamental al permitir descomponer una señal en sus componentes sinusoidales, este proceso posibilita obtener el espectro de frecuencias, el cual describe cómo se distribuye la energía de la señal en distintas bandas frecuenciales [56] [57]. En aplicaciones de audio, el análisis espectral es ampliamente utilizado para caracterizar sonidos, detectar variaciones y analizar fenómenos acústicos, la eficiencia computacional de la FFT permite su implementación en sistemas embebidos y en tiempo real, lo que la convierte en una herramienta clave para el procesamiento de señales digitales [58].

El procesamiento digital de señales permite transformar la señal acústica capturada en información estructurada que puede ser interpretada por sistemas computacionales, mediante este análisis espectral, es posible identificar patrones asociados a diferentes tipos de sonidos respiratorios, como variaciones en la energía o en la distribución de frecuencias, estas técnicas pueden ser aplicadas en dispositivos IoT para procesar localmente las señales de audio capturadas, permitiendo la extracción de características relevantes que posteriormente son utilizadas en el proceso de clasificación automática dentro del sistema desarrollado [59].

2.3.2 Bases del análisis acústico de sonidos respiratorios en el ámbito biomédico

El análisis acústico de los sonidos respiratorios constituye una herramienta fundamental en la evaluación del sistema respiratorio, ya que permite estudiar las características

sonoras generadas por el flujo de aire en las vías respiratorias, estos sonidos contienen información relevante sobre el estado funcional de los pulmones, pudiendo reflejar alteraciones asociadas a distintas patologías. A través de la auscultación tradicional o mediante sistemas digitales, es posible identificar variaciones en la intensidad, duración y frecuencia de los sonidos, lo que contribuye a la detección de anomalías en el proceso respiratorio, el análisis digital permite conservar los registros acústicos y facilita una interpretación más objetiva de los patrones respiratorios capturados [33].

En el ámbito clínico los sonidos respiratorios se clasifican en normales y adventicios, que son indicadores de afecciones respiratorias, las sibilancias se caracterizan por sonidos de alta frecuencia asociados a la obstrucción de las vías respiratorias y los roncus presentan frecuencias más bajas vinculadas a la presencia de secreciones o vibraciones en las vías aéreas, estas diferencias acústicas permiten establecer criterios de análisis que facilitan la interpretación de los sonidos respiratorios, convirtiéndose en un elemento clave para la evaluación médica y el seguimiento de enfermedades respiratorias [60].

El análisis acústico de los sonidos respiratorios se integra como base para la interpretación de las señales capturadas por el sistema IoT, a partir de las características acústicas obtenidas, es posible identificar patrones asociados a condiciones como el asma y la bronquitis, este enfoque permite complementar el análisis técnico de las señales con una interpretación orientada al ámbito biomédico, fortaleciendo la utilidad del sistema como herramienta de apoyo en el monitoreo respiratorio.

2.3.3 Aplicación de técnicas de aprendizaje automático para la clasificación de señales respiratorias

El aprendizaje automático, conocido como Machine Learning, es una disciplina de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender a partir de datos y mejorar su desempeño en tareas específicas sin ser programados de manera explícita para cada caso, este enfoque se basa en el uso de algoritmos capaces de identificar patrones dentro de los datos, en el análisis de señales, el Machine Learning se ha convertido en una herramienta fundamental para procesar información compleja, como señales acústicas, permitiendo su interpretación automática mediante modelos computacionales [35].

Dentro de las aplicaciones del Machine Learning, la clasificación supervisada es una de las técnicas más utilizadas, ya que permite asignar etiquetas a los datos en función de características previamente extraídas, en el análisis de audio, este tipo de modelos es capaz de diferenciar entre distintos patrones sonoros a partir de variables como la frecuencia, la energía o la forma espectral de la señal, en el ámbito biomédico, estas técnicas han sido empleadas para la identificación de sonidos respiratorios anómalos, facilitando la detección de condiciones como sibilancias o roncus mediante el análisis automatizado de señales acústicas [36].

El aprendizaje automático se utiliza como base para la clasificación automática de los sonidos respiratorios, empleando como entrada las características extraídas del análisis de la señal, que permite que el sistema sea capaz de identificar patrones asociados a diferentes condiciones respiratorias, permitiendo categorizar los sonidos en función de su comportamiento acústico, esto convierte al Machine Learning en un componente clave dentro del sistema desarrollado, ya que permite transformar los datos procesados en información interpretable para el monitoreo del estado respiratorio.

2.4 Requerimientos

2.4.1 Requerimientos funcionales

Tipo	Código	Requerimiento
Requisitos de actores	RF-001	El sistema deberá permitir el inicio de sesión mediante credenciales válidas.
Requisitos de actores	RF-002	El sistema deberá identificar el rol del usuario autenticado como administrador, médico o familiar.
Requisitos de actores	RF-003	El sistema deberá habilitar las funcionalidades correspondientes según el rol asignado.
Requisitos de actores	RF-004	El sistema deberá permitir cerrar la sesión del usuario autenticado.

Tipo	Código	Requerimiento
Requisitos de usuarios	RF-005	El administrador deberá poder registrar, consultar, actualizar y desactivar usuarios.
Requisitos de usuarios	RF-006	El administrador deberá poder asignar o modificar roles y permisos de acceso.
Requisitos de validación	RF-007	El sistema deberá validar los campos obligatorios antes de registrar información.
Requisitos de validación	RF-008	El sistema deberá validar que la cédula y el teléfono contengan únicamente valores numéricos y un máximo de diez dígitos.
Requisitos de pacientes	RF-009	El médico deberá poder registrar, consultar, buscar y actualizar pacientes.
Requisitos de pacientes	RF-010	El sistema deberá permitir asociar o desvincular un familiar responsable de un paciente.
Requisitos de pacientes	RF-011	El médico deberá poder seleccionar un paciente activo antes de iniciar una medición.
Requisitos de pacientes	RF-012	El sistema deberá asociar automáticamente cada medición respiratoria con el paciente activo.
Requisitos del dispositivo IoT	RF-013	El dispositivo deberá inicializar el ESP32, el micrófono INMP441, el MPU6050 y la pantalla LCD antes de iniciar la captura.
Requisitos del dispositivo IoT	RF-014	El dispositivo deberá capturar sonidos respiratorios mediante el micrófono digital INMP441 utilizando la interfaz I2S.
Requisitos del dispositivo IoT	RF-015	El dispositivo deberá configurar la captura de audio a una frecuencia de muestreo de 16 kHz.

Tipo	Código	Requerimiento
Requisitos del dispositivo IoT	RF-016	El dispositivo deberá registrar los valores de aceleración en los ejes X, Y y Z mediante el MPU6050 durante la medición.
Requisitos del dispositivo IoT	RF-017	El sistema deberá utilizar los datos del MPU6050 únicamente como referencia de movimiento y estabilidad del dispositivo.
Requisitos del dispositivo IoT	RF-018	El dispositivo deberá mostrar en la pantalla LCD los estados de inicialización, captura, envío, confirmación o error.
Requisitos de comunicación	RF-019	El dispositivo deberá conectarse a una red WiFi configurada antes de transmitir una medición.
Requisitos de comunicación	RF-020	El dispositivo deberá enviar el audio respiratorio y los datos complementarios al backend mediante solicitudes HTTP POST.
Requisitos de comunicación	RF-021	El backend deberá recibir y validar los registros enviados por el dispositivo IoT.
Requisitos de integración	RF-022	El backend deberá enviar el audio respiratorio al servidor Flask ML mediante una API REST segura.
Requisitos de procesamiento	RF-023	El servidor Flask deberá normalizar y preparar la señal respiratoria antes del análisis bioacústico.
Requisitos de procesamiento	RF-024	El sistema deberá obtener representaciones temporales, espectrales y cepstrales mediante FFT, STFT, escala Mel, espectrograma Mel y MFCC.

Tipo	Código	Requerimiento
Requisitos de procesamiento	RF-025	El sistema deberá calcular características bioacústicas como RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, spectral rolloff y energía por bandas.
Requisitos de clasificación	RF-026	El sistema deberá clasificar los sonidos respiratorios mediante el modelo Random Forest.
Requisitos de clasificación	RF-027	El sistema deberá generar como resultado una categoría compatible con respiración saludable, asma o bronquial.
Requisitos de clasificación	RF-028	El sistema deberá generar un nivel de confianza asociado a cada clasificación.
Requisitos de integración	RF-029	El servidor Flask deberá devolver al backend la clasificación, confianza y características obtenidas.
Requisitos de almacenamiento	RF-030	El sistema deberá almacenar usuarios, pacientes, mediciones, resultados y características bioacústicas en MongoDB Atlas.
Requisitos de almacenamiento	RF-031	El sistema deberá mantener un historial cronológico de mediciones por paciente.
Requisitos de visualización	RF-032	La PWA deberá mostrar los resultados respiratorios en tiempo real.
Requisitos de visualización	RF-033	La PWA deberá mostrar la forma de onda, el espectrograma Mel, las métricas bioacústicas, la clasificación y el nivel de confianza.

Tipo	Código	Requerimiento
Requisitos de visualización	RF-034	La PWA deberá presentar mensajes e indicadores comprensibles para médicos y familiares sin emitir diagnósticos médicos.
Requisitos de historial	RF-035	El médico deberá poder consultar el historial de mediciones de los pacientes registrados.
Requisitos de historial	RF-036	El familiar deberá poder consultar únicamente la información del paciente asociado.
Requisitos de reportes	RF-037	El médico deberá poder generar reportes en formato PDF a partir de las mediciones almacenadas.
Requisitos de reportes	RF-038	El sistema deberá permitir filtrar los reportes por paciente y rango de fechas.
Requisitos de reportes	RF-039	El sistema deberá permitir visualizar o descargar los reportes generados.
Requisitos de administración	RF-040	El administrador deberá poder supervisar usuarios, roles, pacientes y registros generales del sistema

Tabla 2: Requerimientos Funcionales: Elaboración Propia

2.4.2 Requerimientos no funcionales

Tipo	Código	Requerimiento
Rendimiento	RNF-001	El sistema deberá procesar y presentar los resultados de las mediciones respiratorias en un tiempo de respuesta adecuado para apoyar.
Rendimiento	RNF-002	El sistema deberá mantener un desempeño estable durante la captura, procesamiento y visualización de las mediciones respiratorias.

Tipo	Código	Requerimiento
Disponibilidad	RNF-003	El sistema deberá permanecer disponible mientras los servicios desplegados se encuentren operativos.
Seguridad	RNF-004	Las contraseñas deberán almacenarse mediante mecanismos de cifrado y no en texto plano.
Seguridad	RNF-005	La comunicación entre el dispositivo IoT, el backend, el servidor de Machine Learning y la PWA deberá realizarse mediante protocolos de comunicación seguros.
Compatibilidad	RNF-006	La aplicación deberá ser compatible con los principales navegadores web modernos.
Compatibilidad	RNF-007	La interfaz deberá adaptarse correctamente a computadoras, tabletas y dispositivos móviles.
Integridad	RNF-008	El sistema deberá preservar la integridad de la información durante la captura, transmisión, procesamiento y almacenamiento de las mediciones respiratorias.
Escalabilidad	RNF-009	La arquitectura deberá permitir incorporar nuevas funcionalidades o categorías respiratorias sin requerir un rediseño completo del sistema.
Mantenibilidad	RNF-010	El sistema deberá mantener una arquitectura modular que facilite su mantenimiento y futuras actualizaciones.
Portabilidad	RNF-011	El prototipo IoT deberá conservar un diseño compacto y fácilmente transportable para su utilización durante las pruebas respiratorias.

Tipo	Código	Requerimiento
Sincronización	RNF-012	El sistema deberá mantener la sincronización entre el dispositivo IoT, el backend, el servidor de procesamiento y la PWA durante el flujo de adquisición, procesamiento y consulta de las mediciones respiratorias.

Tabla 3: Requerimientos no funcionales del sistema IoT.

2.5 Componentes de la propuesta

2.5.1 Arquitectura del sistema

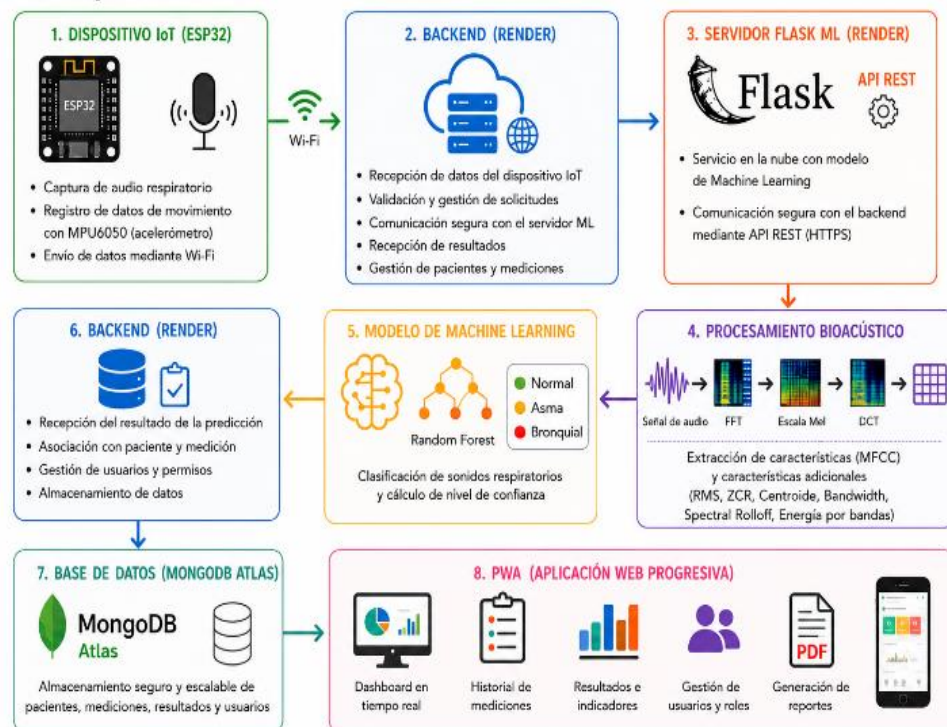


Figura 3: Arquitectura general del sistema IoT propuesto: Elaboración propia.

En la arquitectura, el dispositivo IoT constituye el punto de entrada del sistema, ya que permite la obtención de los datos respiratorios mediante un micrófono digital adaptado a un estetoscopio, lo que mejora la calidad de la señal capturada. Estos datos son enviados al backend desplegado en Render, el cual actúa como eje central de la comunicación, gestionando el flujo de información y coordinando la interacción con el módulo de Machine Learning.

El procesamiento de los datos se realiza en el módulo de Machine Learning implementado en Flask, el cual se ejecuta localmente durante la fase de pruebas y es expuesto mediante ngrok para permitir la comunicación con el backend, una vez obtenidos los resultados, estos son enviados nuevamente al backend, donde se almacenan en la base de datos MongoDB y quedan disponibles para su consulta. La aplicación web progresiva permite acceder a la información generada, visualizar los resultados y dar seguimiento al estado del paciente, completando así el flujo de funcionamiento del sistema.

2.5.2 Diagrama de casos de uso

Caso de Uso N.º 1: Autenticación y acceso según rol

Administrador, médico y familiar. (Aplicación web progresiva)

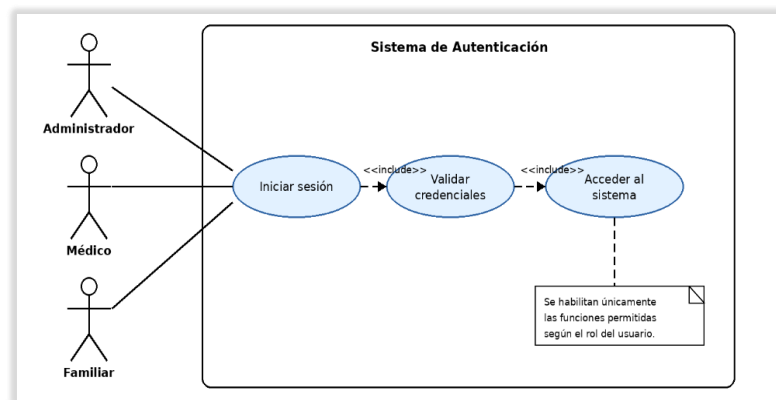


Figura 4: Diagrama de caso de uso de autenticación y acceso según rol.

Actor	Administrador, médico y familiar.
Definición	Permite a los usuarios autenticarse mediante credenciales registradas para acceder al sistema de acuerdo con el rol asignado. Durante el proceso se validan las credenciales y se habilitan únicamente las funcionalidades correspondientes a cada tipo de usuario.
Propósito	Garantizar un acceso seguro al sistema, controlando los permisos disponibles según el rol del usuario autenticado.

Procedimiento	1. El usuario accede a la pantalla de inicio de sesión. 2. Ingresa su correo electrónico y contraseña. 3. El sistema valida las credenciales registradas. 4. Se identifica el rol del usuario. 5. Se habilita la interfaz correspondiente al perfil autenticado.
Precondiciones	El usuario debe encontrarse registrado en el sistema y disponer de credenciales válidas, el servidor y la base de datos deben encontrarse disponibles
Postcondiciones	El usuario accede correctamente al sistema y puede utilizar únicamente las funcionalidades autorizadas para su rol.

Tabla 4: Especificaciones de caso de uso según roles.

Caso de Uso 2: Gestión de usuarios y roles

Administrador (Aplicación web progresiva)

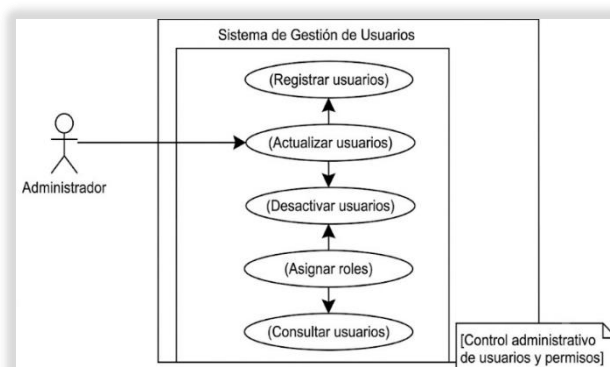


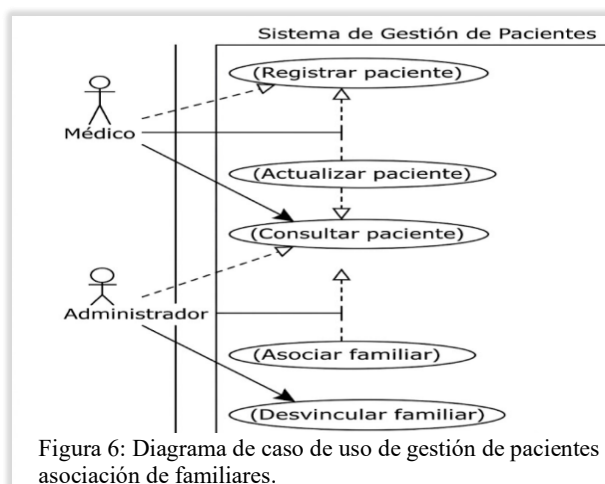
Figura 5: Diagrama de caso de uso de gestión de usuarios y roles.

Actor	Administrador
Definición	Permite al administrador gestionar la información de los usuarios registrados dentro de la aplicación web progresiva, incluyendo el registro, actualización, desactivación y asignación de roles para controlar el

	acceso a las funcionalidades del sistema, para mantener un control centralizado.
Propósito	Administrar los usuarios y sus permisos, garantizando un acceso seguro y organizado de acuerdo con las responsabilidades de cada perfil dentro del sistema.
Procedimiento	1. El administrador inicia sesión en la aplicación. 2. Accede al módulo de gestión de usuarios. 3. Registra un nuevo usuario o selecciona uno existente. 4. Actualiza la información o asigna el rol correspondiente. 5. Guarda los cambios realizados y verifica que la información haya sido actualizada correctamente.
Precondiciones	El administrador debe encontrarse autenticado en el sistema y disponer de permisos para administrar usuarios, la base de datos y el servidor backend deben estar disponibles.
Postcondiciones	La información del usuario queda registrada o actualizada correctamente, permitiendo que el sistema aplique los permisos correspondientes según el rol asignado.

Tabla 5: Especificación del caso de uso del módulo de gestión de usuarios y roles.

Caso de Uso 3: Gestión de pacientes y asociación de familiares Médico / administrador (Aplicación web progresiva)



Actor	Médico y administrador.
Definición	Permite registrar, consultar y actualizar la información de los pacientes dentro de la aplicación web progresiva, además de asociar o desvincular familiares responsables para que puedan acceder a la información respiratoria correspondiente.
Propósito	Organizar la información de los pacientes y establecer la relación con sus familiares responsables, garantizando que cada medición respiratoria quede vinculada correctamente al paciente evaluado.
Procedimiento	1. El usuario autorizado ingresa al módulo de pacientes según corresponda. 2. Registra un nuevo paciente o selecciona uno existente. 3. Completa o actualiza los datos personales requeridos. 4. Asocia el familiar responsable cuando corresponda. 5. Guarda los cambios y verifica la información registrada.
Precondiciones	El médico o administrador debe encontrarse autenticado. El paciente o familiar debe contar con la información necesaria para su registro dentro del sistema.
Postcondiciones	El paciente queda registrado o actualizado correctamente, y puede ser seleccionado posteriormente para realizar mediciones respiratorias o consultar su historial.

Tabla 6: Especificación del caso de uso gestión de pacientes y familiares.

Caso de Uso 4: Selección de paciente activo para monitoreo

Médico (Aplicación web progresiva)

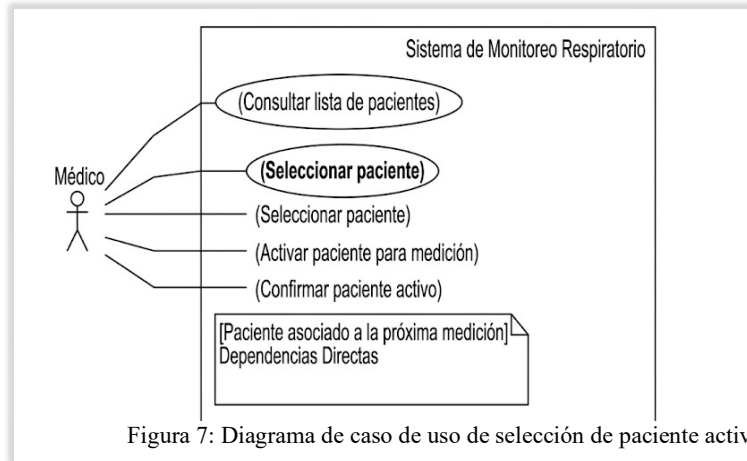


Figura 7: Diagrama de caso de uso de selección de paciente activo.

Actor	Médico.
Definición	Permite seleccionar un paciente previamente registrado antes de iniciar una medición respiratoria, con el fin de asociar correctamente los datos capturados por el dispositivo IoT al historial correspondiente.
Propósito	Garantizar que cada registro respiratorio generado por el prototipo quede vinculado al paciente correcto dentro de la base de datos.
Procedimiento	1. El médico accede al módulo de pacientes o tiempo real. 2. Consulta la lista de pacientes registrados. 3. Selecciona el paciente que será evaluado. 4. Activa el paciente para la medición respiratoria. 5. El sistema confirma el paciente activo antes de iniciar la captura.
Precondiciones	El médico debe estar autenticado y el paciente debe encontrarse registrado en el sistema.
Postcondiciones	El paciente queda activo para la próxima medición respiratoria y los resultados generados se asocian a su historial.

Tabla 7: El paciente queda activo para la próxima medición respiratoria

Caso de Uso 5: Captura y envío del sonido respiratorio

Dispositivo iot

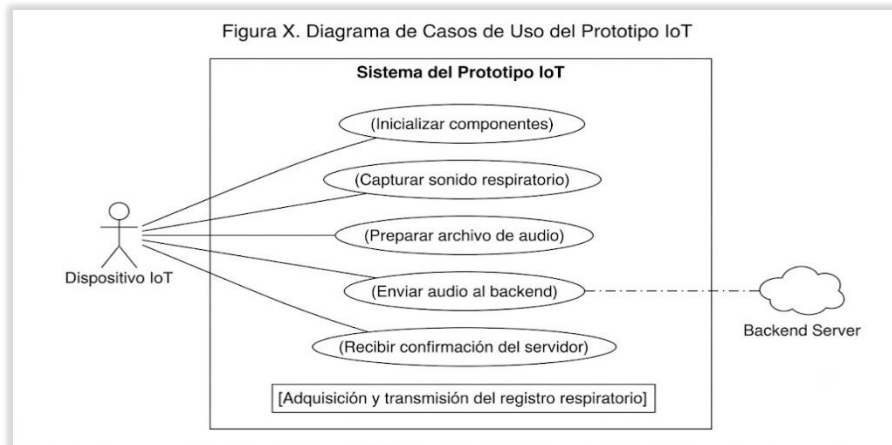


Figura 8: Diagrama de caso de uso de captura y envío del sonido respiratorio.

Actor	Dispositivo iot.
Definición	Permite capturar sonidos respiratorios mediante el micrófono digital INMP441 adaptado al estetoscopio y enviar el registro obtenido hacia el backend mediante conexión WiFi y solicitudes HTTP.
Propósito	Obtener y transmitir registros respiratorios digitales para que puedan ser procesados, clasificados y almacenados dentro del sistema.
Procedimiento	1. El dispositivo inicializa el ESP32 y los componentes conectados. 2. El micrófono INMP441 captura el sonido respiratorio. 3. El firmware prepara el registro de audio. 4. El dispositivo establece conexión WiFi. 5. El audio respiratorio se envía al backend mediante HTTP Post 6. El sistema recibe la respuesta del servidor.
Precondiciones	El prototipo debe estar ensamblado, alimentado y conectado a una red WiFi disponible. El backend debe encontrarse activo para recibir los registros.

Postcondiciones	El audio respiratorio queda enviado al backend y disponible para iniciar el procesamiento bioacústico.
------------------------	--

Tabla 8: Especificación del caso de uso del módulo del prototipo IoT.

Caso de Uso 6: Procesamiento bioacústico y clasificación automática

Servidor de machine learning (Servidor de procesamiento bioacústico)

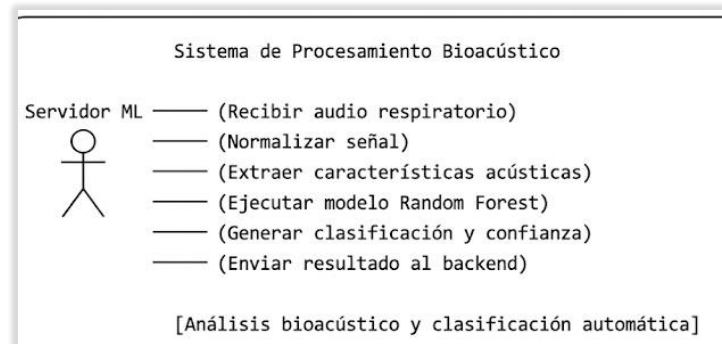


Figura 9: Diagrama de caso de uso de procesamiento bioacústico y clasificación automática.

Actor	Servidor de Machine Learning.
Definición	Permite procesar el audio respiratorio recibido mediante técnicas bioacústicas, extraer características temporales y espectrales, ejecutar el modelo Random Forest para generar una clasificación automática y organizar las variables obtenidas para que puedan ser enviadas al flujo de predicción del sistema.
Propósito	Transformar el sonido respiratorio capturado en información numérica y producir un resultado automático con su respectivo nivel de confianza.
Procedimiento	1. El servidor recibe el archivo de audio respiratorio. 2. Se normaliza la señal y se eliminan silencios. 3. Se extraen características como RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, energía por bandas y MFCC.

	4. Las características se envían al modelo Random Forest. 5. El modelo genera la clasificación respiratoria. 6. El resultado y la confianza se retornan al backend.
Precondiciones	El audio respiratorio debe haberse recibido correctamente y el modelo entrenado debe encontrarse cargado en el servidor.
Postcondiciones	El sistema obtiene la clasificación automática y el nivel de confianza, quedando listos para su almacenamiento y visualización.

Tabla 9: Especificación del caso de uso del módulo de procesamiento y clasificación.

Caso de Uso 7: Monitoreo respiratorio en tiempo real

MÉDICO (Aplicación Web Progresiva)

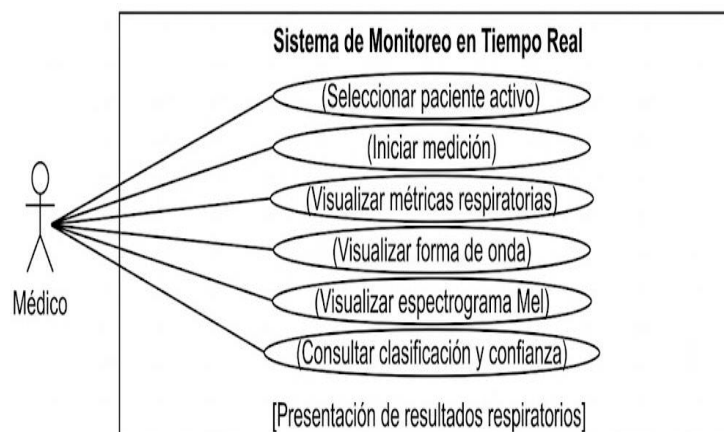


Figura 10: Diagrama de caso de uso de monitoreo respiratorio en tiempo real.

Actor	Médico
Definición	Permite visualizar en la aplicación web progresiva los resultados generados durante una medición respiratoria, incluyendo métricas, forma de onda, espectrograma Mel, clasificación automática y nivel de confianza.

Propósito	Presentar la información respiratoria procesada de manera clara y organizada para apoyar el seguimiento del paciente durante las pruebas técnicas controladas.
Procedimiento	1. El médico accede al módulo de tiempo real. 2. Selecciona o confirma el paciente activo. 3. Inicia una medición respiratoria. 4. El sistema recibe los resultados procesados. 5. La aplicación muestra las métricas respiratorias. 6. Se visualizan la forma de onda, el espectrograma Mel, la clasificación y la confianza.
Precondiciones	El paciente debe estar activo, el prototipo debe enviar el audio y el servidor debe procesar correctamente la señal.
Postcondiciones	El médico visualiza los resultados respiratorios en tiempo real y puede continuar con el seguimiento del paciente.

Tabla 10: Especificación del caso de uso del módulo de monitoreo respiratorio en tiempo real.

Caso de Uso 8: Consulta del historial respiratorio.

Médico y familiar (Aplicación web progresiva)

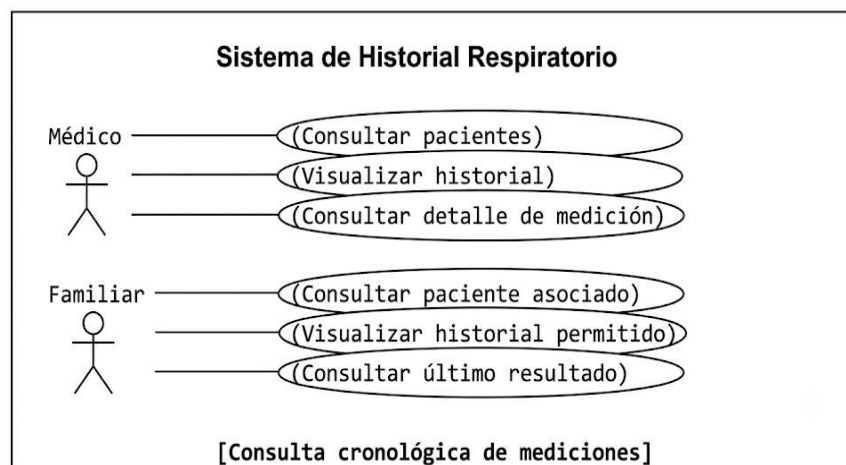


Figura 11: Diagrama de caso de uso de consulta del historial respiratorio.

Actor	Médico y familiar
Definición	Permite consultar las mediciones respiratorias almacenadas para cada paciente, mostrando los resultados obtenidos, fecha de registro, clasificación, confianza y métricas asociadas.
Propósito	Facilitar el seguimiento cronológico de las mediciones respiratorias realizadas y permitir que médicos y familiares consulten la evolución del paciente.
Procedimiento	1. El usuario accede al módulo de historial. 2. El médico selecciona un paciente o el familiar accede al paciente asociado. 3. El sistema consulta las mediciones registradas. 4. Se muestra el listado cronológico de resultados. 5. El usuario revisa el detalle de una medición específica.
Precondiciones	El paciente debe contar con mediciones almacenadas y el usuario debe tener permisos para consultarlas
Postcondiciones	El historial respiratorio queda disponible para su revisión, permitiendo observar los registros generados durante el monitoreo.

Tabla 11: Especificación del caso de uso del módulo de historial de mediciones respiratorias.

Caso de Uso 9: Generación del reporte clínico en PDF

Médico (Aplicación web progresiva)

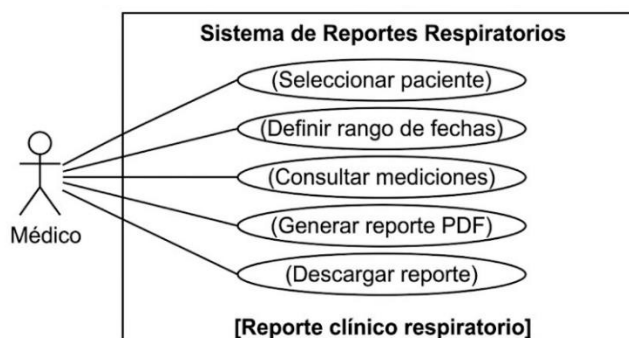


Figura 12: Diagrama de caso de uso de generación del reporte clínico en PDF.

Actor	Médico.
Definición	Permite generar un reporte clínico en formato PDF a partir de las mediciones respiratorias almacenadas en el sistema, incluyendo resultados, métricas y resumen del periodo seleccionado.
Propósito	Consolidar la información respiratoria del paciente en un documento descargable que facilite la revisión y seguimiento de las mediciones realizadas.
Procedimiento	1. El médico accede al módulo de reportes. 2. Selecciona el paciente correspondiente. 3. Define el rango de fechas para la consulta. 4. El sistema obtiene las mediciones registradas. 5. Se genera el reporte en formato PDF. 6. El médico visualiza o descarga el documento.
Precondiciones	El paciente debe contar con mediciones respiratorias registradas dentro del sistema.
Postcondiciones	El reporte clínico queda generado y disponible para su descarga o revisión posterior.

Tabla 12: Especificación del caso de uso del módulo de generación de reportes clínicos.

Caso de Uso 10: Administración general del sistema

Administrador (Aplicación web progresiva)

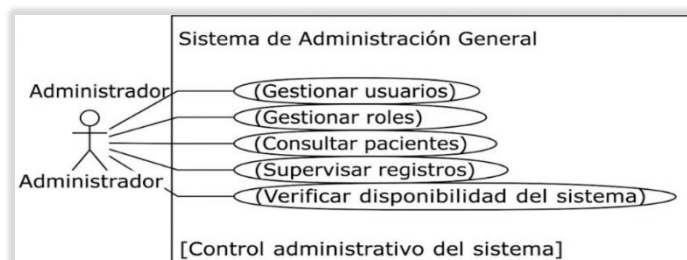


Figura 13: Diagrama de caso de uso de administración general del sistema.

Actor	Administrador.
Definición	Permite al administrador supervisar el funcionamiento general de la aplicación web progresiva, gestionar

	usuarios, verificar roles y consultar la información registrada dentro del sistema.
Propósito	Mantener el control administrativo de la plataforma, asegurando que los usuarios, permisos y registros se encuentren organizados correctamente.
Procedimiento	1. El administrador inicia sesión en la aplicación. 2. Accede al panel administrativo. 3. Consulta usuarios, roles y registros disponibles. 4. Realiza ajustes administrativos cuando sea necesario. 5. Verifica que la información del sistema se encuentre actualizada.
Precondiciones	El administrador debe encontrarse autenticado y contar con permisos de administración.
Postcondiciones	La información administrativa queda actualizada y los cambios realizados por el administrador son almacenados correctamente en la base de datos.

Tabla 13: Especificación del caso de uso del módulo de administración general del sistema.

2.5.3 Modelado de datos

2.5.3.1 Arquitectura MongoDB Atlas implementada

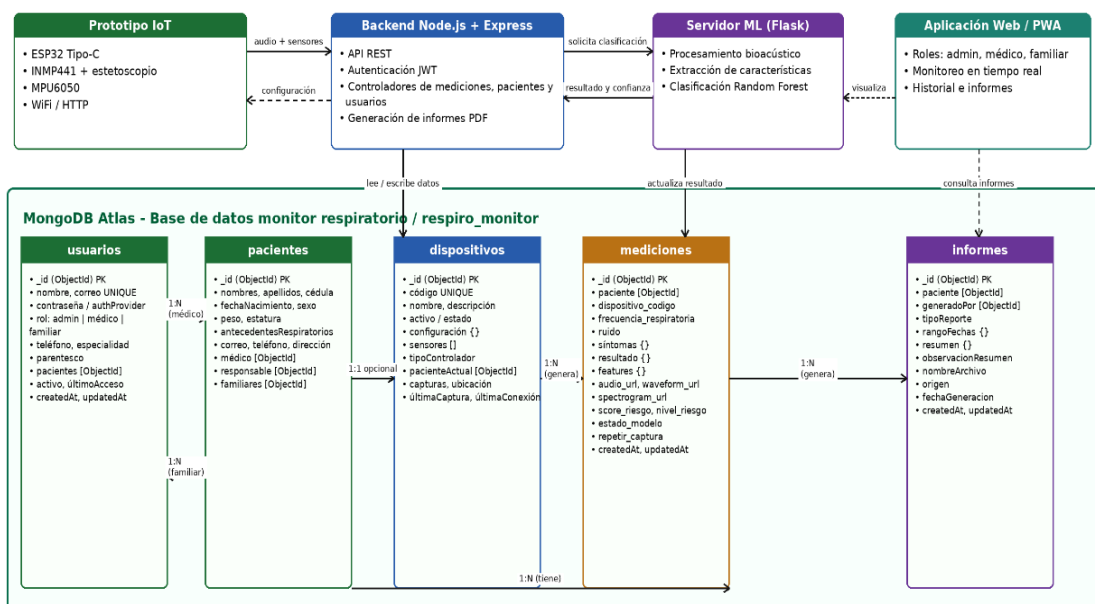


Figura 14: Flujo real de base de datos.

El modelado de datos del sistema se organizó en MongoDB Atlas, debido a que la información generada por el prototipo IoT no mantiene una estructura completamente fija. Cada medición respiratoria integra datos del paciente, resultado del modelo, características bioacústicas, archivos de audio, enlaces visuales y marcas de tiempo. Por esta razón, el almacenamiento orientado a documentos permite conservar registros completos sin separar excesivamente la información técnica.

La ilustración anterior representa el flujo real entre el dispositivo IoT, el backend, el servidor de Machine Learning, la aplicación web progresiva y la base de datos, el backend recibe los audios respiratorios enviados por el ESP32, consulta el servidor Flask para obtener la clasificación y registra el resultado en MongoDB Atlas. La PWA consulta las mediciones, pacientes e informes según el rol del usuario, esta estructura permite que el sistema almacene la evidencia técnica de cada captura y conserve el historial respiratorio del paciente de forma organizada.

2.5.3.2 Base de datos MongoDB Atlas implementada

La base de datos implementada corresponde al entorno de MongoDB Atlas utilizado durante las pruebas del sistema, en este entorno se verificaron las colecciones principales del prototipo, entre ellas usuarios, pacientes, dispositivos, mediciones e informes. Las capturas reales muestran que la información no solo fue modelada de forma conceptual, sino también registrada dentro del explorador de datos. Esta evidencia permite comprobar que el flujo de captura, procesamiento, almacenamiento y generación de informes se encuentra vinculado con la base utilizada por la aplicación.

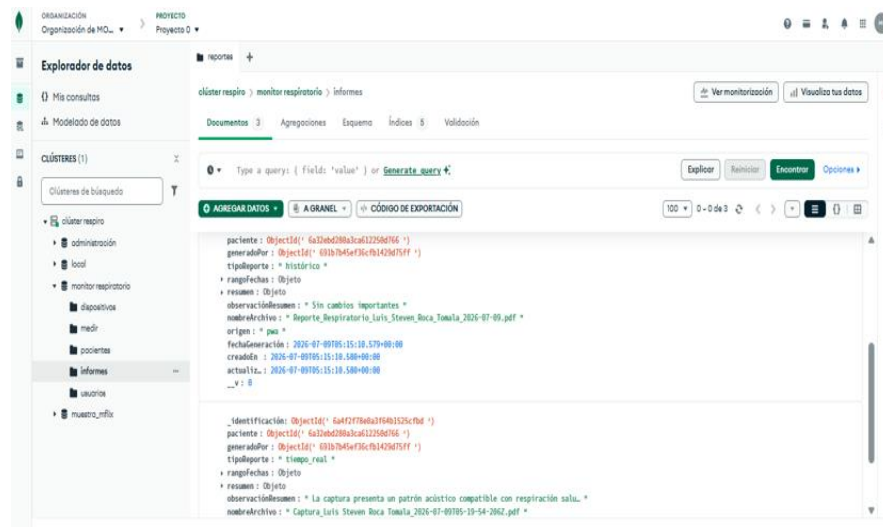


Figura 15: Colección informes en MongoDB Atlas.

2.5.3.3 Colecciones principales del sistema

Las colecciones se definieron de acuerdo con las funciones reales del sistema y no como tablas rígidas, usuarios almacena los datos de acceso y rol, pacientes conserva la información pediátrica asociada al monitoreo, dispositivos registra la configuración del prototipo y mediciones guarda los resultados respiratorios generados por cada captura. La colección informes almacena los resúmenes emitidos desde la PWA, diferenciando informes históricos y en tiempo real. Esta organización mantiene el modelo flexible de MongoDB y permite consultar la información según el paciente, usuario generador o fecha de registro.

Colección	Propósito	Campos principales	Relación dentro del sistema
usuarios	Gestiona el acceso al sistema y diferencia los roles administrador, médico y familiar.	nombre, correo, contraseña, rol, teléfono, especialidad, pacientes, activo, últimoAcceso.	Un médico puede asociarse a varios pacientes; un familiar visualiza los pacientes vinculados.
pacientes	Registra la información del niño y datos de contacto necesarios para el seguimiento respiratorio.	nombres, apellidos, cédula, fechaNacimiento, sexo, peso, estatura, antecedentesRespiratorios, médico, responsable.	Cada paciente puede tener múltiples mediciones y puede estar relacionado con médico y responsable.
dispositivos	Describe el prototipo IoT utilizado para	código, nombre, descripción, configuración,	El dispositivo genera mediciones y puede registrar el paciente

Colección	Propósito	Campos principales	Relación dentro del sistema
	capturar los sonidos respiratorios.	sensores, tipoControlador, capturas, ubicación, últimaCaptura.	activo durante la captura.
mediciones	Almacena cada captura respiratoria procesada por el backend y el servidor ML.	paciente, dispositivo_codigo, frecuencia_respiratoria, ruido, síntomas, resultado, features, audio_url, spectrogram_url.	Cada medición pertenece a un paciente y sirve como base para el historial y los informes.
informes	Guarda los resúmenes PDF generados desde la PWA en modo histórico o tiempo real.	paciente, generadoPor, tipoReporte, rangoFechas, resumen, observacionResumen, nombreArchivo, origen, fechaGeneracion.	Cada informe se genera a partir de mediciones, datos del paciente y usuario que lo emite.

2.5.3.4 Evidencia de documentos almacenados

Durante las pruebas se almacenaron documentos reales en las colecciones del sistema. En mediciones se registran los audios capturados, las características extraídas, el resultado obtenido por el modelo y los enlaces a recursos generados, como forma de onda o espectrograma. En informes se almacenan los resúmenes asociados al paciente, el tipo de reporte, el usuario que lo generó y el nombre del archivo PDF. Estas evidencias muestran que MongoDB Atlas funciona como repositorio central del historial respiratorio y de los documentos generados desde la aplicación.

La siguiente ilustración muestra un documento correspondiente a un informe histórico almacenado en la colección informes de MongoDB Atlas. En este registro se conservan los datos consolidados de una evaluación respiratoria, incluyendo el resumen de resultados, la cantidad de mediciones analizadas, la clasificación predominante y otros indicadores generados automáticamente por el sistema, permitiendo mantener un historial organizado para consultas posteriores.

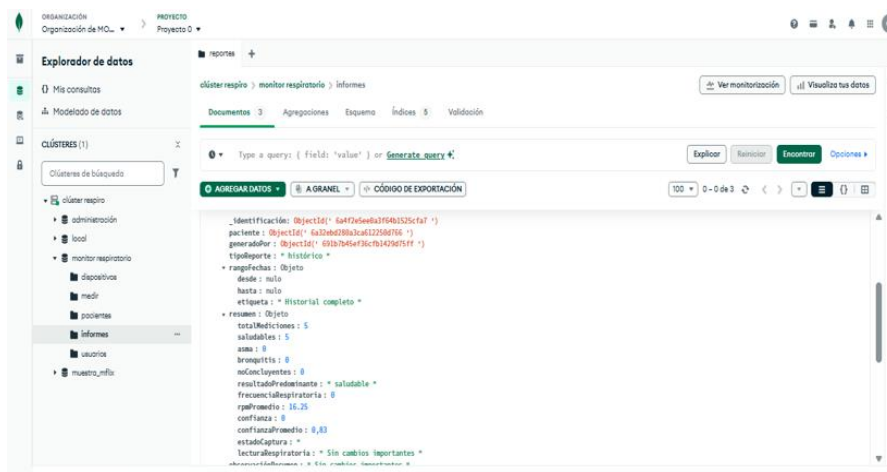


Figura 16: Informe histórico almacenado en MongoDB Atlas.

La siguiente ilustración presenta la colección de informes con los diferentes documentos generados durante las pruebas del sistema. Cada registro corresponde a un reporte emitido para un paciente e incluye información como el tipo de informe, el usuario que lo generó, la fecha de creación y el archivo PDF asociado, evidenciando el almacenamiento centralizado de los reportes clínicos.

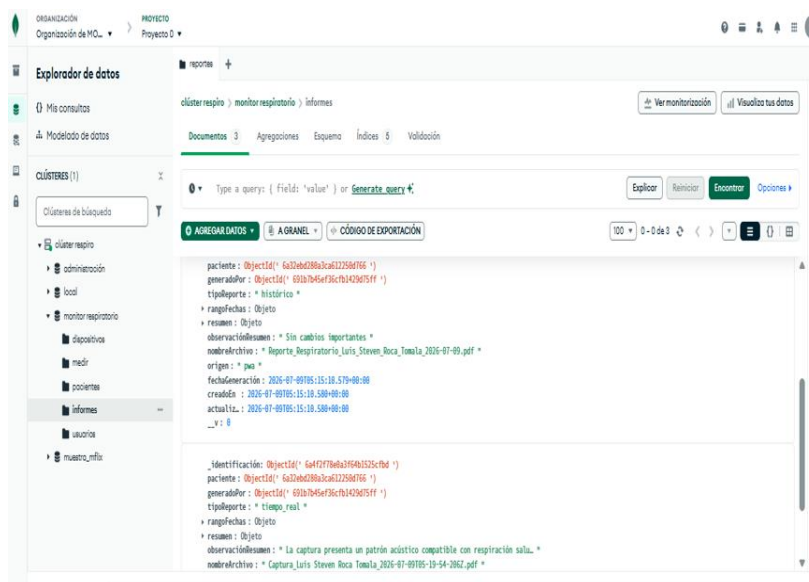


Figura 17: Colección de informes generados en MongoDB Atlas.

La siguiente ilustración muestra un documento almacenado en la colección mediciones, donde se registra la información obtenida durante una captura respiratoria. Además de los datos del paciente, se almacenan las características extraídas del audio, el resultado de la clasificación realizada por el modelo de Machine Learning y los enlaces a los archivos generados, como la forma de onda y el espectrograma.

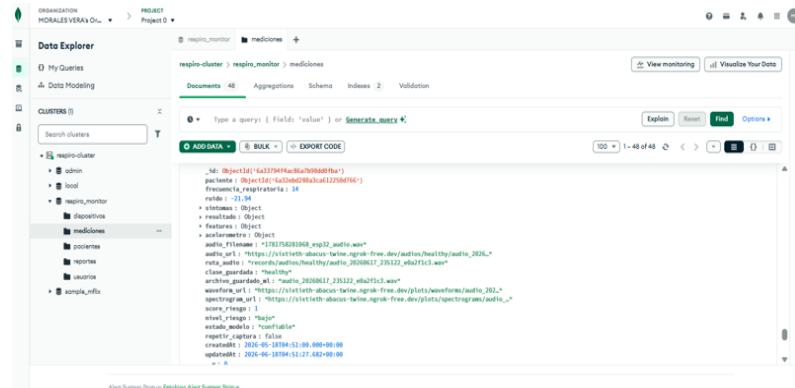


Figura 18: Medición respiratoria almacenada.

La siguiente ilustración presenta un informe generado en tiempo real y almacenado en la colección informes de MongoDB Atlas, este documento registra el resultado inmediato de una medición respiratoria, incorporando el resumen de la evaluación, la frecuencia respiratoria estimada, el nivel de confianza del modelo y la interpretación generada automáticamente, permitiendo la consulta inmediata de la información desde la aplicación.

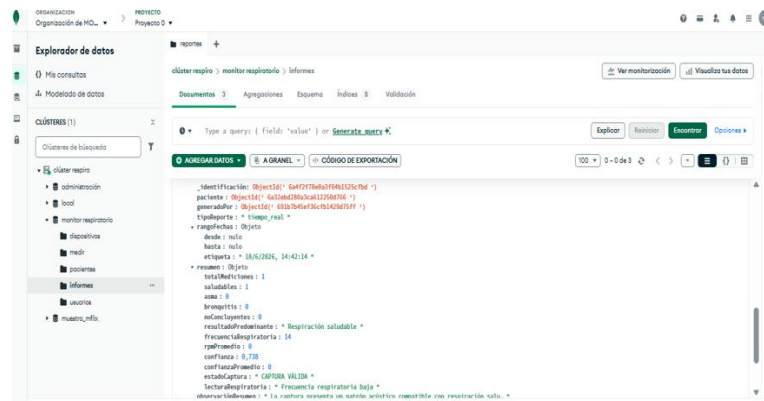


Figura 19: Informe en tiempo real almacenado en MongoDB Atlas.

2.5.3.5 Relaciones e índices de consulta

Las relaciones entre colecciones se manejan mediante referencias ObjectId y campos de apoyo, manteniendo la flexibilidad propia de MongoDB, la colección pacientes se relaciona con usuarios mediante los campos médico, responsable y familiares, mientras que mediciones se vincula con pacientes y dispositivos. A partir de estas mediciones se

generan informes de tipo histórico o tiempo real, los cuales conservan la referencia del paciente y del usuario que los emitió. En la colección usuarios se verificó el índice correo_1, configurado como único, lo que permite optimizar la búsqueda por correo y evitar cuentas duplicadas.

Relación	Tipo	Uso dentro del sistema
usuarios → pacientes	1:N	Un médico puede tener varios pacientes asociados y un familiar puede consultar los pacientes vinculados.
pacientes → mediciones	1:N	Un paciente puede acumular varias mediciones respiratorias durante el seguimiento.
dispositivos → mediciones	1:N	Un dispositivo puede generar múltiples capturas identificadas por código o paciente activo.
mediciones → informes	1:N	Las mediciones alimentan los informes históricos y de tiempo real generados desde la PWA.
usuarios → informes	1:N	El campo generadoPor identifica al usuario que emitió el informe desde la aplicación.

2.5.3. Resumen del modelado implementado

El modelado implementado permite integrar los datos generados por el prototipo IoT con la información administrada desde la PWA a la base MongoDB Atlas conserva usuarios, pacientes, dispositivos, mediciones e informes, permitiendo reconstruir el flujo completo de cada captura respiratoria. El diseño evita depender de una estructura relacional rígida, pero mantiene referencias suficientes para consultar historiales, generar informes y visualizar resultados por rol, así el almacenamiento respalda la operación del sistema y demuestra la trazabilidad entre captura, procesamiento, clasificación y consulta final.

2.5.4 Diseño de interfaces

2.5.4.1 Implementación del dispositivo IoT

Se implementó un dispositivo IoT basado en el microcontrolador ESP32, integrando un micrófono digital MEMS INMP441 adaptado a la campana y la manguera de un estetoscopio para mejorar la captación de los sonidos respiratorios, esta configuración permitió obtener registros acústicos directamente desde el paciente, reduciendo interferencias externas y proporcionando una señal adecuada para las etapas posteriores de procesamiento bioacústico.

Las principales características implementadas fueron:

- Microcontrolador ESP32 como unidad de adquisición.
- Micrófono digital MEMS INMP441 mediante interfaz I2S.
- Adaptación física al estetoscopio.
- Captura no invasiva de sonidos respiratorios.



Figura 21: Dispositivo IoT basado en ESP32 para captura de sonidos respiratorios.



Figura 20: Configuración de pines I2S y parámetros de captura del ESP32.

2.5.4.2 Configuración del sistema de adquisición

Se configuró la comunicación entre el ESP32 y el micrófono digital utilizando la interfaz I2S, definiendo parámetros como frecuencia de muestreo, tamaño del buffer y lectura continua de datos, esta configuración permitió digitalizar las señales respiratorias manteniendo la estabilidad durante el proceso de captura. Durante la ejecución del sistema fue posible verificar el comportamiento de la adquisición mediante el monitor serial, donde se visualizaron indicadores como:

- duración de la captura;

- nivel de ruido (dB);
- frecuencia respiratoria estimada;
- estado del proceso de adquisición.



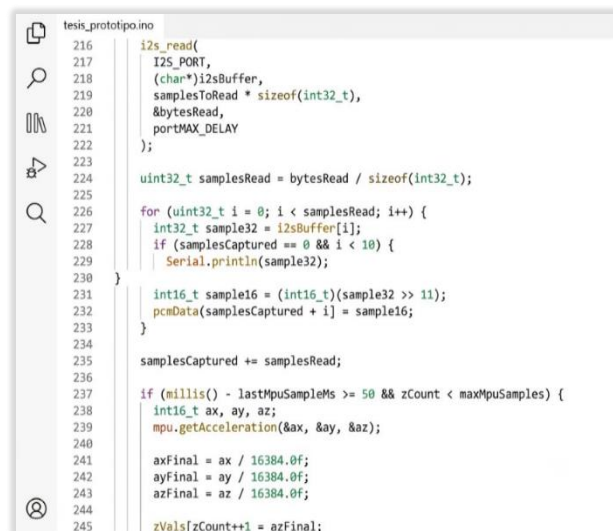
```

202 // Captura audio real
203 int32_t i2sBuffer[I2S_READ_SAMPLES];
204 size_t bytesRead = 0;
205 uint32_t samplesCaptured = 0;
206
207 unsigned long startMs = millis();
208 unsigned long lastMpuSampleMs = 0;
209
210 while (samplesCaptured < totalSamples) {
211   uint32_t samplesToRead = I2S_READ_SAMPLES;
212   if ((totalSamples - samplesCaptured) < I2S_READ_SAMPLES) {
213     samplesToRead = totalSamples - samplesCaptured;
214   }
215
216   I2S_read(
217     I2S_PORT,
218     (char*)i2sBuffer,
219     samplesToRead * sizeof(int32_t),
220     &bytesRead,
221     portMAX_DELAY
  
```

Figura 22: Lectura de la señal respiratoria capturada mediante el micrófono INMP441.

2.5.4.3 Preparación del registro respiratorio

Una vez adquirida la señal respiratoria, el firmware genera un archivo de audio digital que conserva los parámetros definidos durante la captura, en esta etapa el ESP32 controla automáticamente la duración del registro, la frecuencia de muestreo y la organización de las muestras obtenidas por el micrófono. El resultado es un archivo respiratorio preparado para ser transmitido al backend, donde posteriormente se ejecutan las etapas de procesamiento bioacústico y clasificación automática.



```

216 I2S_read(
217   I2S_PORT,
218   (char*)i2sBuffer,
219   samplesToRead * sizeof(int32_t),
220   &bytesRead,
221   portMAX_DELAY
222 );
223
224 uint32_t samplesRead = bytesRead / sizeof(int32_t);
225
226 for (uint32_t i = 0; i < samplesRead; i++) {
227   int32_t sample32 = i2sBuffer[i];
228   if (samplesCaptured == 0 && i < 10) {
229     Serial.println(sample32);
230   }
231   int16_t sample16 = (int16_t)(sample32 >> 11);
232   pcmData[samplesCaptured + i] = sample16;
233 }
234
235 samplesCaptured += samplesRead;
236
237 if (millis() - lastMpuSampleMs >= 50 && zCount < maxMpuSamples) {
238   int16_t ax, ay, az;
239   mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
240
241   axFinal = ax / 16384.0f;
242   ayFinal = ay / 16384.0f;
243   azFinal = az / 16384.0f;
244
245   zVals[zCount+1] = azFinal;
  
```

Figura 23: Preparación del registro respiratorio mediante lectura I2S en el ESP32.

2.5.4.4 Comunicación inalámbrica y transmisión HTTP

Después de generar el registro respiratorio, el dispositivo establece comunicación con el backend mediante conectividad WiFi utilizando solicitudes HTTP POST. Esta

comunicación permite transmitir tanto el archivo de audio como la información complementaria generada durante la captura.

Durante esta etapa se verificó:

- conexión correcta a la red inalámbrica;
- envío del audio respiratorio;
- recepción satisfactoria por parte del backend;
- Respuesta exitosa del servidor

```
WiFi OK
----- METRICAS CAPTURADAS -----
Duracion: 4.80 s
Ruido dB: -18.48
Frecuencia respiratoria estimada: 0.00 rpm
MPU X: 0.00 Y: 0.00 Z: 0.00
-----
----- RESPUESTA BACKEND -----
HTTP/1.1 201 Created
Date: Tue, 05 May 2026 14:00:47 GMT
Content-Type: application/json; charset=utf-8
Transfer-Encoding: chunked
Connection: close
access-control-allow-origin: *
cf-cache-status: DYNAMIC
cross-origin-opener-policy: same-origin
etag: W/"451-PezlaTnMY7kimkYOOi3zxUAN8vY"
```

Figura 24: Transmisión del registro respiratorio desde el ESP32 hacia el backend mediante HTTP.

2.5.4.5 Integración del flujo de adquisición de datos

Se verificó la integración funcional entre el dispositivo IoT, el backend y el servidor encargado del procesamiento bioacústico. La comunicación establecida permitió completar el flujo de adquisición, transmisión y recepción de los registros respiratorios dentro de la arquitectura propuesta.

Como resultado de esta integración fue posible:

- capturar sonidos respiratorios;
- transmitir los registros al backend;
- recibir correctamente la información;
- mantener un flujo continuo entre los componentes del sistema.

```
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
(.venv) PS D:\UICI\respiracion-ml-api> python api_ml.py
* Running on all addresses (0.0.0.0)
* Running on http://127.0.0.1:5001
* Running on http://192.168.18.14:5001
Press CTRL+C to quit
127.0.0.1 - - [05/May/2026 08:57:16] "GET /audios/bronchial/audio_20260505_011927_f5581e41.wav HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 08:57:16] "GET /plots/waveforms/audio_20260505_011927_f5581e41_waveform.png HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 08:57:16] "GET /plots/spectrograms/audio_20260505_011927_f5581e41_spectrogram.png HTTP/1.1" 200 -
Features resumen: {'duration': 4.5047, 'rms_mean': 0.06954, 'zcr_mean': 0.084675, 'centroid_mean': 1574.1189, 'bandwidth_mean': 1196.7673}
127.0.0.1 - - [05/May/2026 08:58:45] "POST /predict-audio HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 08:59:31] "GET /plots/spectrograms/audio_20260505_085808_13ed8bb3_spectrogram.png HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 08:59:31] "GET /plots/waveforms/audio_20260505_085808_13ed8bb3_waveform.png HTTP/1.1" 200 -
Features resumen: {'duration': 2.0666, 'rms_mean': 0.087457, 'zcr_mean': 0.044797, 'centroid_mean': 1150.3045, 'bandwidth_mean': 1101.8983}
127.0.0.1 - - [05/May/2026 09:00:47] "POST /predict-audio HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 09:01:31] "GET /plots/waveforms/audio_20260505_090046_ff284251_waveform.png HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 09:01:31] "GET /plots/spectrograms/audio_20260505_090046_ff284251_spectrogram.png HTTP/1.1" 200 -
127.0.0.1 - - [05/May/2026 09:06:13] "GET /audios/bronchial/audio_20260505_090046_ff284251.wav HTTP/1.1" 200 -
```

Figura 25: Recepción del registro respiratorio enviado desde el dispositivo IoT hacia el backend del sistema.

Cumplimiento del objetivo específico 1

Diseñar la arquitectura IoT, integrando un dispositivo basado en ESP32, sensores acústicos y módulos de conectividad, para la adquisición de sonidos respiratorios pediátricos.

Estado implementado:

Dispositivo IoT: se integró el microcontrolador ESP32 como unidad principal para la adquisición de sonidos respiratorios.

Sensor acústico: se incorporó el micrófono digital MEMS INMP441 adaptado al estetoscopio para captar señales respiratorias.

Lectura de señal: se configuró la interfaz I2S para la captura y preparación del registro respiratorio.

Conectividad: se implementó comunicación WiFi y envío de datos mediante solicitudes HTTP hacia el backend.

Integración: se verificó la recepción de los registros respiratorios dentro del sistema backend para su posterior procesamiento.

Resultado: El sistema cuenta con una arquitectura IoT funcional para capturar y transmitir sonidos respiratorios pediátricos, cumpliendo satisfactoriamente el Objetivo Específico 1.

2.5.4.6 Representación temporal de la señal respiratoria

La primera etapa del procesamiento bioacústico consistió en representar gráficamente la señal respiratoria obtenida por el dispositivo IoT mediante una forma de onda (waveform). Esta representación permite observar la variación de la amplitud del audio a lo largo del tiempo, facilitando la identificación de segmentos respiratorios, cambios de intensidad y posibles intervalos de silencio presentes durante la captura. La representación temporal constituye una herramienta de apoyo para verificar la calidad del registro antes de aplicar técnicas de análisis espectral, permitiendo comprobar que la señal adquirida contiene información suficiente para las etapas posteriores del procesamiento.

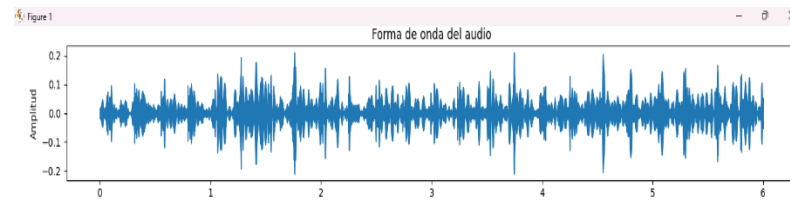


Figura 26: Representación temporal de la señal respiratoria capturada por el sistema.

2.5.4.7 Normalización y limpieza de señales acústicas

Antes de realizar el análisis bioacústico fue necesario acondicionar cada registro respiratorio para reducir diferencias entre las distintas capturas y se aplicó un proceso de normalización de amplitud que permitió mantener una escala uniforme entre los audios procesados.

Luego se eliminaron automáticamente los segmentos de silencio presentes al inicio y al final de cada grabación mediante la función `librosa.effects.trim()`, este procedimiento permitió conservar únicamente la información respiratoria relevante, reduciendo la influencia de fragmentos sin contenido útil durante el análisis.

Como resultado se obtuvieron señales más homogéneas y adecuadas para la extracción de características bioacústicas.

```
# PREPROCESAMIENTO
# Normalización de amplitud
max_val = np.max(np.abs(y))
if max_val > 0:
    y = y / max_val

# Eliminación de silencios al inicio y final
y, _ = librosa.effects.trim(y)

if y is None or len(y) < 100:
    raise ValueError("Audio demasiado corto después de eliminar silencios")
```

Figura 27: Implementación de normalización y eliminación de silencios en señales respiratorias.

2.5.4.8 Análisis espectral mediante STFT

Para analizar la distribución frecuencial de los sonidos respiratorios se implementó la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), técnica que permite observar simultáneamente la evolución temporal y frecuencial de la señal. A diferencia de la FFT tradicional, la STFT facilita el análisis de señales no estacionarias como los sonidos respiratorios, mostrando cómo cambia la energía espectral durante el proceso de respiración, esta representación constituye una etapa fundamental dentro del

procesamiento bioacústico, ya que sirve como base para el cálculo de diversas características espectrales utilizadas posteriormente por el sistema.

```
# ENERGÍA POR BANDAS
stft = np.abs(librosa.stft(y))

# Bandas aproximadas
low_band = stft[0:50, :]
mid_band = stft[50:150, :]
high_band = stft[150:300, :]

features["low_energy"] = float(np.mean(low_band))
features["mid_energy"] = float(np.mean(mid_band))
features["high_energy"] = float(np.mean(high_band))
```

Figura 28: Implementación de STFT para el análisis espectral y cálculo de energía por bandas.

2.5.4.9 Generación del espectrograma Mel

Como complemento del análisis espectral se generó un espectrograma utilizando la escala Mel, cuya distribución frecuencial se aproxima al comportamiento de la percepción auditiva humana, esta representación permite visualizar de forma más clara la concentración de energía en distintas bandas de frecuencia a lo largo del tiempo. El espectrograma Mel constituye una herramienta de apoyo tanto para la interpretación visual de los registros respiratorios como para el cálculo posterior de los coeficientes MFCC empleados durante el procesamiento bioacústico.

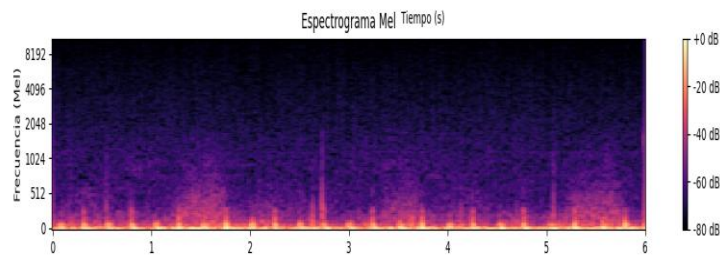


Figura 29: Espectrograma Mel generado a partir de la señal respiratoria.

2.5.4.10 Extracción de características bioacústicas

Después del análisis espectral, el sistema calculó automáticamente diferentes características bioacústicas que permiten describir cuantitativamente cada registro respiratorio.

Entre las principales variables extraídas se encuentran:

- duración del audio;
- energía RMS;

- tasa de cruces por cero (ZCR);
- centroide espectral;
- ancho de banda espectral;
- spectral rolloff;
- energía por bandas;
- coeficientes MFCC;
- chroma;
- spectral contrast.
- Estas características transforman cada señal respiratoria en un conjunto de variables numéricas que representan su comportamiento temporal, energético y frecuencial, constituyendo la información utilizada posteriormente durante el proceso de clasificación automática.

```

rms = librosa.feature.rms(y=y)
features["rms_mean"] = float(np.mean(rms))
features["rms_std"] = float(np.std(rms))

zcr = librosa.feature.zero_crossing_rate(y)
features["zcr_mean"] = float(np.mean(zcr))
features["zcr_std"] = float(np.std(zcr))

centroid = librosa.feature.spectral_centroid(y=y, sr=sr)
features["centroid_mean"] = float(np.mean(centroid))
features["centroid_std"] = float(np.std(centroid))

bandwidth = librosa.feature.spectral_bandwidth(y=y, sr=sr)
features["bandwidth_mean"] = float(np.mean(bandwidth))
features["bandwidth_std"] = float(np.std(bandwidth))

```

Figura 30: Implementación de características acústicas temporales y espectrales extraídas de la señal respiratoria.

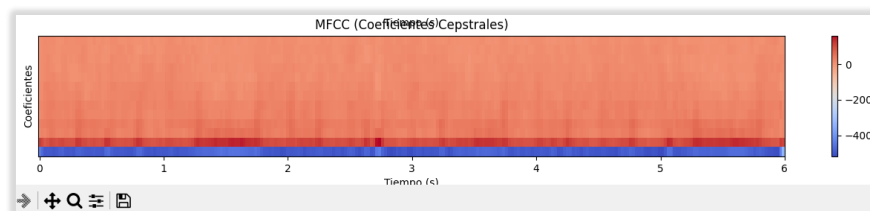
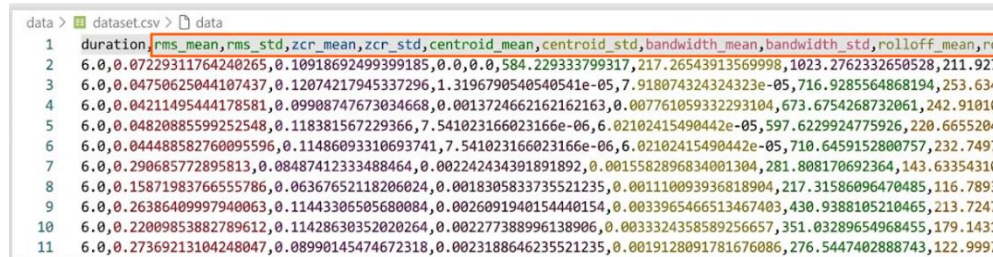


Figura 31: Implementación del cálculo de coeficientes MFCC a partir de la señal respiratoria.

2.5.4.11 Organización de las características bioacústicas extraídas

Una vez calculadas las características bioacústicas, la información obtenida fue organizada en una estructura tabular donde cada fila representa un registro respiratorio y cada columna corresponde a una variable acústica calculada durante el procesamiento. Esta organización permitió disponer de un conjunto de datos uniforme, facilitando el

almacenamiento, la consulta y la preparación de la información para las etapas posteriores de entrenamiento y clasificación automática del modelo de Machine Learning.



```

data > dataset.csv > data
1 duration,rms_mean,rms_std,zcr_mean,zcr_std,centroid_mean,centroid_std,bandwidth_mean,bandwidth_std,rolloff_mean,rd
2 6.0,0.07229311764240265,0.10918692499399185,0.0,0.0,584.229333799317,217.26543913569998,1023.2762332650528,211.927
3 6.0,0.04750625044107437,0.12074217945337296,1.3196790540540541e-05,7.918074324324323e-05,716.9285564868194,253.634
4 6.0,0.04211495444178581,0.09908747673034668,0.0013724662162162163,0.007761059332293104,673.6754268732061,242.91016
5 6.0,0.04820885599252548,0.118381567229366,7.541023166023166e-06,6.02102415490442e-05,597.6229924775926,220.6655204
6 6.0,0.044488582760095596,0.11486093310693741,7.541023166023166e-06,6.02102415490442e-05,710.6459152800757,232.7497
7 6.0,0.290685772895813,0.08487412333488464,0.002242434391891892,0.0015582896834001304,281.808170692364,143.63354316
8 6.0,0.15871983766555786,0.06367652118206024,0.0018305833735521235,0.001110093936818904,217.31586096470485,116.7897
9 6.0,0.26386409997940063,0.11443306505680084,0.0026091940154440154,0.0033965466513467403,430.9388105210465,213.7247
10 6.0,0.22009853882789612,0.11428630352020264,0.002277388996138906,0.0033324358589256657,351.03289654968455,179.1437
11 6.0,0.27369213104248047,0.08990145474672318,0.0023188646235521235,0.0019128091781676086,276.5447402888743,122.9997

```

Figura 32: Estructuración de características acústicas dentro del conjunto de datos bioacústico.

2.5.4.13 Integración del procesamiento bioacústico en el sistema

Una vez implementadas las etapas de procesamiento de señales, se integró el flujo bioacústico dentro del servidor encargado del análisis automático, cada audio respiratorio recibido es procesado mediante la función `extract_features()`, responsable de calcular las características necesarias para representar digitalmente la señal.

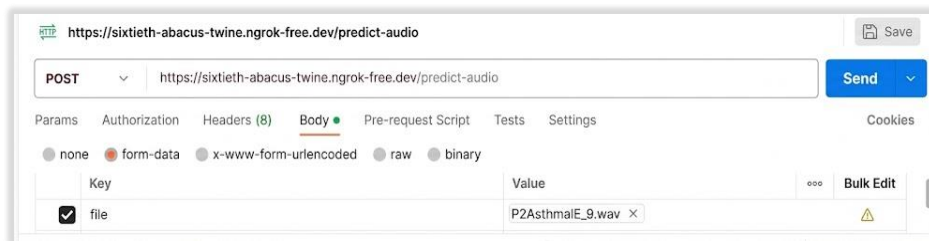


Figura 33: Subida de audio en Postman para extraer características acústicas.

Posteriormente, estas características son organizadas dentro de una estructura resumida que concentra la información acústica obtenida de cada medición respiratoria, permitiendo que los datos sean utilizados durante la clasificación automática realizada por el modelo de aprendizaje automático. Las pruebas efectuadas mediante Postman permitieron verificar el correcto funcionamiento de este proceso, comprobando tanto la recepción del audio como la generación automática de las características bioacústicas.

```

{
  "features_resumen": {
    "bandwidth_mean": 66.4901,
    "centroid_mean": 40.7777,
    "duration": 6.0,
    "rms_mean": 0.102382,
    "zcr_mean": 0.0021
  }
}

```

Figura 34: Resumen de características acústicas generadas por el procesamiento bioacústico a partir de un registro respiratorio.

2.5.4.14 Flujo del procesamiento bioacústico implementado

La siguiente figura resume las principales etapas implementadas dentro del procesamiento bioacústico desarrollado para el sistema, el flujo inicia con la recepción del audio respiratorio capturado por el dispositivo IoT, continúa con la normalización y eliminación de silencios, seguido por la representación espectral mediante STFT y espectrograma Mel. Posteriormente se realiza la extracción de características bioacústicas como RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, energía por bandas y coeficientes MFCC, finalizando con la organización estructurada de las variables obtenidas para su utilización durante la clasificación automática.

Flujo del procesamiento bioacústico implementado

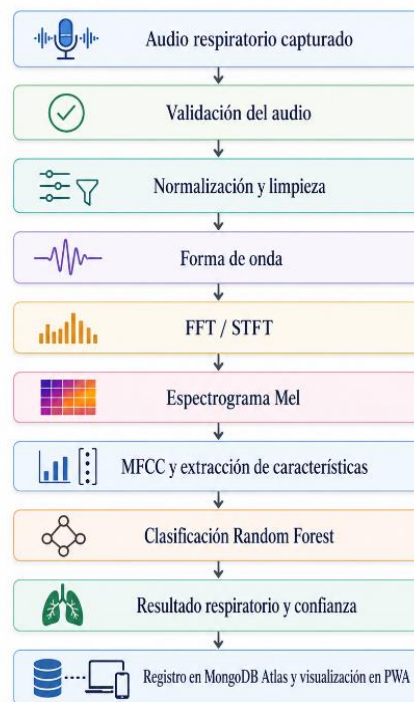


Figura 35: Flujo del procesamiento bioacústico implementado dentro del sistema.

2.5.4.15 Técnicas matemáticas y métricas bioacústicas implementadas

La siguiente tabla presenta las principales técnicas matemáticas y métricas bioacústicas implementadas durante el procesamiento de los sonidos respiratorios, cada una de ellas cumple una función específica dentro del análisis de la señal, permitiendo transformar los registros acústicos en características numéricas utilizadas posteriormente durante la clasificación automática.

Elemento	Tipo	Salida generada en el sistema
STFT / FFT	Transformación espectral	Energía por bandas
Escala Mel	Representación perceptual	Espectrograma Mel
MFCC	Descriptor cepstral	Coefficientes MFCC
RMS	Métrica energética	Energía promedio del audio
ZCR	Métrica temporal	Tasa de cruces por cero
Centroide espectral	Métrica espectral	Frecuencia central de la energía
Ancho de banda	Métrica espectral	Dispersión de frecuencias
Spectral rolloff	Métrica espectral	Frecuencia límite de concentración energética
Energía por bandas	Métrica espectral	Energía en bandas baja, media y alta

Tabla 14: Técnicas matemáticas y métricas bioacústicas implementadas en el procesamiento respiratorio.

Cumplimiento del objetivo específico 2

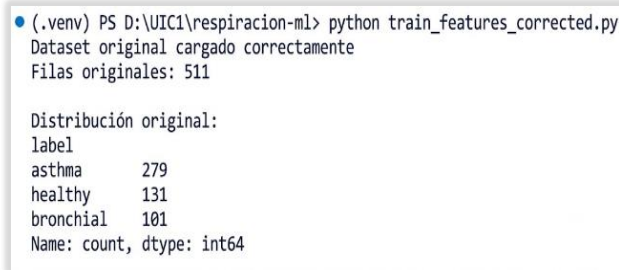
Implementar técnicas de análisis bioacústico mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la extracción de características espectrales relevantes, para el procesamiento de señales respiratorias.

A partir de las etapas desarrolladas, se implementó el flujo de procesamiento bioacústico del sistema, incorporando la normalización de los registros respiratorios, eliminación de silencios, representación temporal de la señal, análisis espectral mediante STFT, generación del espectrograma Mel y extracción de características acústicas relevantes. Estas etapas permitieron transformar los audios respiratorios capturados en información numérica organizada para su análisis computacional.

Asimismo, se calcularon características como RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, spectral rolloff, energía por bandas y coeficientes MFCC, las cuales fueron estructuradas dentro del flujo de procesamiento implementado. De esta manera, se evidencia el cumplimiento del Objetivo Específico 2, al haberse aplicado técnicas de análisis bioacústico para representar y preparar las señales respiratorias utilizadas posteriormente en la clasificación automática.

2.5.4.16 Carga inicial del conjunto de datos respiratorios

Antes de iniciar el entrenamiento del modelo fue necesario cargar el conjunto de datos respiratorios utilizado durante el desarrollo de la clasificación automática. En esta etapa se verificó que el archivo original se leyera correctamente y se identificó la distribución inicial de las clases presentes en el dataset. La figura muestra la salida obtenida durante la ejecución del script de entrenamiento, donde se observa la carga correcta del conjunto de datos con 511 registros, distribuidos en las clases asthma, healthy y bronchial.



```
(.venv) PS D:\UIC1\respiracion-ml> python train_features_corrected.py
Dataset original cargado correctamente
Filas originales: 511

Distribución original:
label
asthma      279
healthy     131
bronchial   101
Name: count, dtype: int64
```

Figura 36: Carga inicial del conjunto de datos respiratorios y distribución original de clases.

Esta validación permitió confirmar que el conjunto de datos estaba disponible y organizado antes de continuar con las etapas de limpieza, balanceo, entrenamiento y evaluación del modelo Random Forest.

2.5.4.17 Verificación de calidad de señales respiratorias

Después de confirmar la carga inicial del conjunto de datos, se aplicó una verificación automática sobre los archivos de audio respiratorio para evitar que registros incompletos o demasiado cortos ingresaran al proceso de entrenamiento. Esta etapa permitió controlar la calidad mínima de los audios antes de extraer sus características bioacústicas.

Durante la validación se comprobó:

- correcta lectura del archivo de audio;
- duración mínima requerida;
- detección de registros demasiado cortos;
- descarte automático de archivos que no cumplieran las condiciones establecidas.

```

# CARGAR AUDIO
y, sr = librosa.load(file_path, sr=22050)

duration = librosa.get_duration(
    y=y,
    sr=sr
)

# VALIDAR DURACIÓN
if duration < MIN_DURATION:

    print(
        f"Audio muy corto omitido: "
        f"{file} ({duration:.2f}s)"
    )
    continue

```

Figura 37: Implementación de la validación automática de duración mínima en señales respiratorias.

La siguiente ilustración evidencia el resultado de esta validación, donde el sistema omite un audio respiratorio por presentar una duración insuficiente, con ello se evitó incorporar señales que podían afectar la consistencia del conjunto de datos utilizado durante el entrenamiento.

```

(.venv) PS D:\UIC1\respiracion-ml> python build_dataset.py
Procesado correctamente: P8BronchialTc_37.wav
Procesado correctamente: P8BronchialTc_39.wav
Procesado correctamente: P9BronchialSc_42.wav
Procesado correctamente: P9BronchialSc_44.wav
Procesado correctamente: P9BronchialTc_41.wav
Procesado correctamente: P9BronchialTc_43.wav
Audio muy corto omitido: P9BronchialTc_45.wav (2.00s)

```

Figura 38: Resultado de la validación automática con descarte de un audio respiratorio de duración insuficiente.

2.5.4.18 Generación del conjunto de datos bioacústico

Una vez filtrados los audios no válidos, el sistema ejecutó el proceso de extracción de características bioacústicas para construir el archivo dataset.csv. En esta etapa cada audio procesado se transformó en una fila del conjunto de datos, mientras que las características extraídas se organizaron como columnas numéricas.

```

# EXTRAER FEATURES
features = extract_features(file_path)

# NORMALIZAR LABEL
features["label"] = clase.strip().lower()
data.append(features)
print(f" Procesado correctamente: {file}")
except Exception as e:
    print(f" Error con {file}: {e}")
    errores.append({
        "archivo": file,
        "clase": clase,
        "error": str(e)
    })

# CREAR DATAFRAME
df = pd.DataFrame(data)
if df.empty:
    print("\n No se pudo crear dataset.")
else:
    os.makedirs("data", exist_ok=True)
    df.to_csv(
        "data/dataset.csv",
        index=False
    )

```

Figura 39: Implementación de la generación automática del conjunto de datos bioacústico.

Luego de ejecutar el script, el sistema generó correctamente el archivo dataset.csv, obteniendo un conjunto estructurado compuesto por los registros respiratorios y sus características acústicas correspondientes.

```
(.venv) PS D:\UIC1\respiracion-ml> python build_dataset.py
Audio muy corto omitido: P9BronchialTc_45.wav (2.00s)

Dataset creado correctamente
Filas: 524
Columnas: 45
```

Figura 40: Generación del archivo dataset.csv a partir de características bioacústicas extraídas.

La estructura final del archivo permitió visualizar las variables obtenidas durante el procesamiento, como duración, RMS, ZCR, centroide espectral y otras métricas utilizadas posteriormente en el entrenamiento del modelo. Cada fila del conjunto de datos representa un registro respiratorio procesado y cada columna corresponde a una característica bioacústica extraída de la señal, esta organización facilitó la revisión de los valores generados, la verificación de datos faltantes y la preparación del archivo para las etapas de balanceo, entrenamiento y evaluación del modelo Random Forest.

```
data > dataset.csv > data
1 duration,rms_mean,rms_std,zcr_mean,zcr_std,centroid_mean,c
2 6.0,0.290065772895813,0.08487412333488464,0.00224345439185
3 6.0,0.15871983766555786,0.06367652118206024,0.001830583375
4 6.0,0.26386409997940063,0.11443306505680084,0.002609194011
5 6.0,0.22089853882789612,0.11428630352020264,0.002277388990
6 6.0,0.27369213104248047,0.08990145474672318,0.002318864623
7 6.0,0.24363933503627777,0.10338031419467926,0.002318864623
8 6.0,0.18777325749397278,0.07302160561084747,0.014490076013
9 6.0,0.16346724331378937,0.07171674072742462,0.009467754584
10 6.0,0.2785381078720093,0.00835245460271835,0.0021359948117
11 6.0,0.1447107493877411,0.06502906233072281,0.0009277569988
12 6.0,0.1898341178894043,0.09840133786201477,0.0023867333326
13 6.0,0.26324835419654846,0.0925489217042923,0.0047338772924
14 6.0,0.2341061383485794,0.09739863342876434,0.0039797749758
15 6.0,0.30166810750951304,0.09246533364057541,0.003221733228
16 6.0,0.24742922186851501,0.08589982241392136,0.005322077095
17 6.0,0.13650554418563843,0.06741668283939362,0.002748702944
18 6.0,0.1652260810422156,0.00707117114067078,0.0003045617631
```

Figura 41: Visualización del conjunto de datos bioacústico generado en formato CSV.

2.5.4.19 Balanceo del conjunto de datos

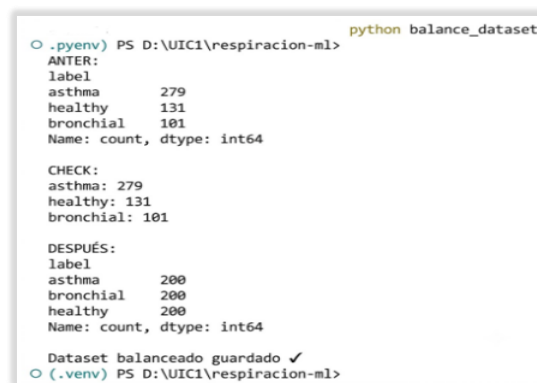
El conjunto de datos original presentaba una distribución desigual entre las clases respiratorias, con mayor cantidad de registros en la categoría asthma frente a las clases healthy y bronchial. Esta diferencia podía provocar que el modelo aprendiera con mayor facilidad la clase predominante y redujera su capacidad para reconocer categorías con menor cantidad de muestras.

Para reducir este efecto, se aplicó un proceso de balanceo únicamente sobre el conjunto de entrenamiento y con esto el conjunto de prueba se mantuvo sin alteraciones,

permitiendo una evaluación más realista del desempeño del modelo, este procedimiento ayudó a que el algoritmo recibiera una cantidad equivalente de ejemplos por clase durante el aprendizaje, sin alterar la distribución original utilizada para comprobar su comportamiento.

El balanceo permitió obtener:

- 200 registros para la clase asthma;
- 200 registros para la clase bronchial;
- 200 registros para la clase healthy.



```
.pyenv PS D:\UIC1\respiracion-ml> python balance_dataset
ANTER:
label
asthma      279
healthy     131
bronchial   101
Name: count, dtype: int64

CHECK:
asthma: 279
healthy: 131
bronchial: 101

DESPUÉS:
label
asthma      200
bronchial   200
healthy     200
Name: count, dtype: int64

Dataset balanceado guardado ✓
(.venv) PS D:\UIC1\respiracion-ml>
```

Figura 42: Balanceo de clases aplicado al conjunto de entrenamiento respiratorio.

Con este procedimiento se obtuvo una distribución más equilibrada para el aprendizaje del modelo Random Forest, reduciendo el sesgo hacia la clase mayoritaria sin modificar las muestras reservadas para la evaluación final.

2.5.4.20 Entrenamiento del modelo random forest

Una vez preparado el conjunto de datos bioacústico, se procedió al entrenamiento del modelo de aprendizaje automático utilizando el algoritmo Random Forest, con el propósito de clasificar automáticamente los sonidos respiratorios correspondientes a las categorías asthma, bronchial y healthy. Como parte de este proceso se realizó la codificación de las etiquetas y la separación entre las variables predictoras y la variable objetivo. Posteriormente, el conjunto de datos fue dividido de forma estratificada en 408 registros para entrenamiento y 103 registros para prueba, esta división permitió conservar la proporción de clases en ambos subconjuntos y mantener una evaluación más ordenada del modelo.

Sobre el conjunto de entrenamiento se aplicó el balanceo de clases y la normalización de las características bioacústicas, permitiendo mantener una distribución uniforme durante el aprendizaje del modelo. Se entrenó un clasificador Random Forest compuesto por 500 árboles de decisión, utilizando las características acústicas obtenidas durante el procesamiento bioacústico para construir el modelo encargado de realizar la clasificación automática de los sonidos respiratorios.

```
(.venv) PS D:\UIC1\respiracion-ml> python train_features_corrected.py
healthy      200
bronchial    200
Name: count, dtype: int64

Modelo entrenado correctamente con balanceo solo en entrenamiento

=== MÉTRICAS EN CONJUNTO DE PRUEBA ORIGINAL ===
Accuracy: 0.8835 (88.35%)
```

Figura 43: Ejecución del entrenamiento del modelo Random Forest con balanceo aplicado.

2.5.4.21 Evaluación del modelo mediante métricas de clasificación

Luego del entrenamiento, se evaluó el desempeño del modelo utilizando el conjunto de datos de prueba, con el objetivo de medir su capacidad para clasificar correctamente los sonidos respiratorios no utilizados durante el aprendizaje. Para esta evaluación se calcularon las métricas Accuracy, Precision, Recall y F1-score, ampliamente utilizadas en problemas de clasificación supervisada.

Los resultados obtenidos evidenciaron un desempeño satisfactorio, alcanzando una exactitud de 88,35 %, precisión de 88,25 %, recall de 88,35 % y F1-score de 88,28 %, de manera individual, el modelo obtuvo un F1-score de 0,91 para la clase asthma, 0,77 para bronchial y 0,91 para healthy, lo que demuestra un mejor comportamiento en las clases asma y saludable, mientras que la categoría bronquial presentó un rendimiento inferior debido a la menor cantidad de registros disponibles durante el entrenamiento.

```
(.venv) PS D:\UIC1\respiracion-ml> python train_features_corrected.py

=== MÉTRICAS EN CONJUNTO DE PRUEBA ORIGINAL ===
Accuracy: 0.8835 (88.35%)
Precision: 0.8825 (88.25%)
Recall: 0.8835 (88.35%)
F1-score: 0.8828 (88.28%)
```

Figura 44: Métricas de desempeño obtenidas durante la evaluación del modelo Random Forest.

2.5.4.22 Análisis del comportamiento del modelo

Para complementar la evaluación del modelo, se incorporaron diferentes herramientas de análisis que permitieron interpretar su comportamiento durante la clasificación de los sonidos respiratorios. La matriz de confusión permitió visualizar la cantidad de clasificaciones correctas e incorrectas realizadas para cada categoría respiratoria, los resultados mostraron 51 registros correctamente clasificados para asma, 15 para bronquial y 25 para healthy, evidenciando que la mayor cantidad de errores se concentró en la clase bronquial.

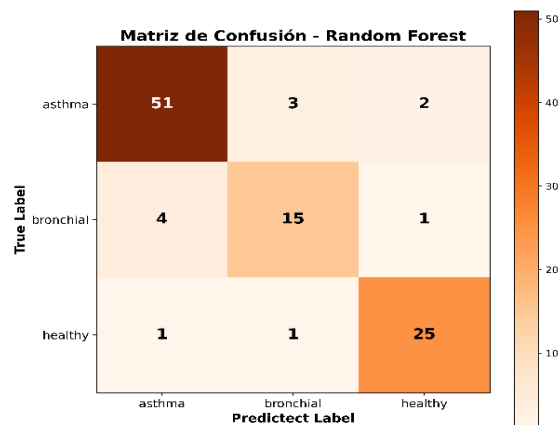


Figura 45: Matriz de confusión obtenida durante la evaluación del modelo Random Forest.

Como parte de la validación del proceso de entrenamiento también se aplicó una validación cruzada estratificada de cinco particiones, obteniendo resultados de 86,40 %, 89,22 %, 95,09 %, 97,06 % y 93,14 %, alcanzando un promedio de 92,18 %. Estos resultados evidencian que el modelo mantiene un comportamiento estable al ser evaluado con diferentes particiones del conjunto de datos, lo que refuerza la consistencia del entrenamiento realizado.

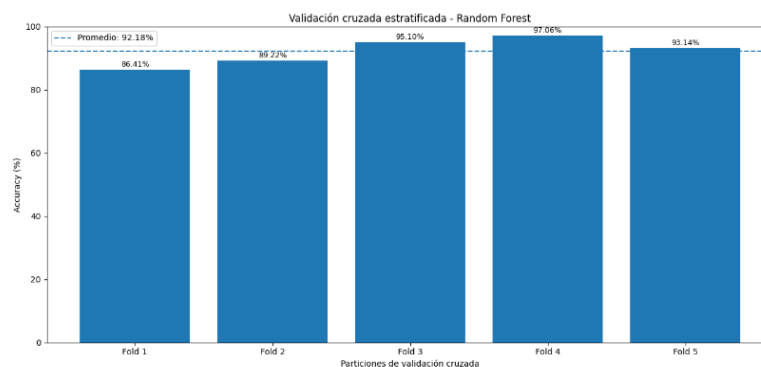


Figura 46: Validación cruzada estratificada aplicada al modelo Random Forest.

Adicionalmente, se generó una curva ROC multiclase, la cual permitió analizar la capacidad discriminativa del clasificador frente a cada categoría respiratoria. La representación obtenida mostró una adecuada separación entre las clases, respaldando el desempeño alcanzado por el modelo durante la etapa de evaluación, ya que las curvas se mantuvieron cercanas al extremo superior izquierdo del gráfico, indicando una buena relación entre verdaderos positivos y falsos positivos.

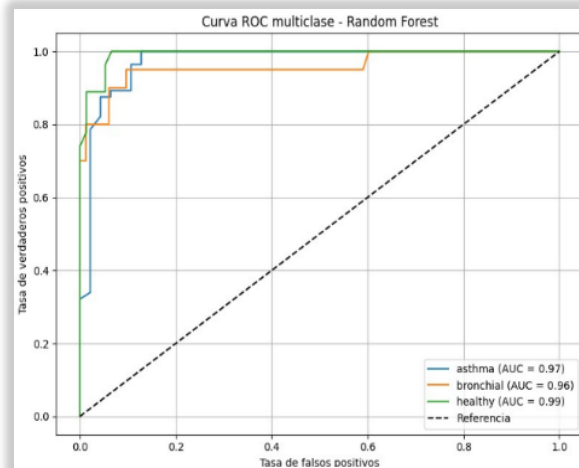


Figura 47: Curva ROC multiclase obtenida durante la evaluación del modelo Random Forest.

2.5.4.23 Generación e integración del modelo entrenado

Al finalizar el entrenamiento, se generaron los archivos `model.pkl`, `scale.pkl`, `encoder_corrected.pkl` y `feature_column.pkl`, los cuales almacenan el clasificador entrenado, el escalador utilizado durante la normalización, el codificador de etiquetas y la estructura de las características bioacústicas empleadas durante el entrenamiento. La generación de estos archivos permitió reutilizar el modelo sin necesidad de repetir el proceso de entrenamiento, facilitando su incorporación al servicio encargado de procesar nuevas mediciones respiratorias enviadas por el prototipo IoT.

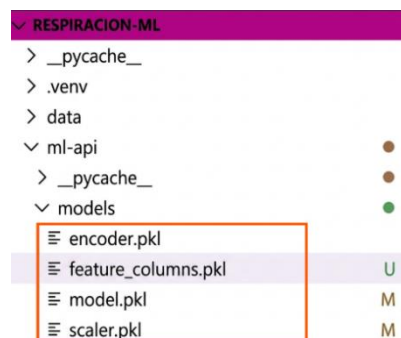


Figura 48: Archivos generados para la integración del modelo Random Forest dentro del sistema.

2.5.4.24 Importancia de las características bioacústicas

Durante la clasificación automática, se realizó un análisis de importancia de características empleando la información generada por el modelo Random Forest y la técnica SHAP. Los resultados mostraron que variables como bandwidth_mean, centroid_mean, high_energy, chroma_mean, chroma_std y bandwidth_std aportaron una mayor contribución durante la clasificación, evidenciando que la distribución espectral y energética de la señal respiratoria constituye uno de los principales criterios utilizados por el modelo para diferenciar las categorías respiratorias.

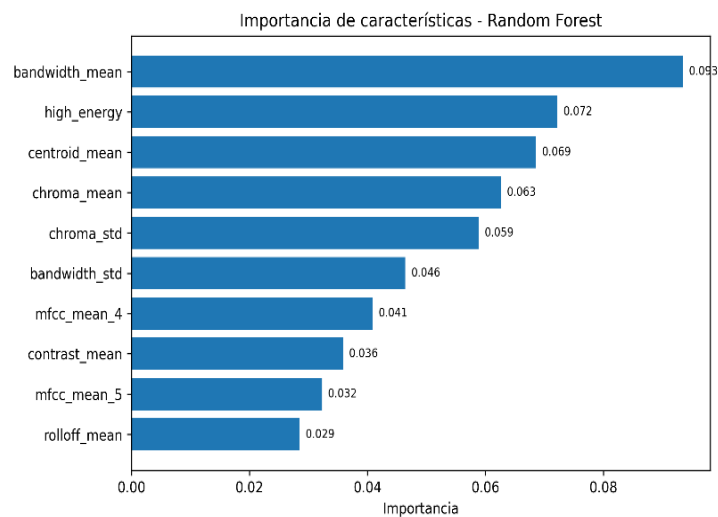


Figura 49: Importancia de características bioacústicas obtenida durante el entrenamiento del modelo Random Forest.

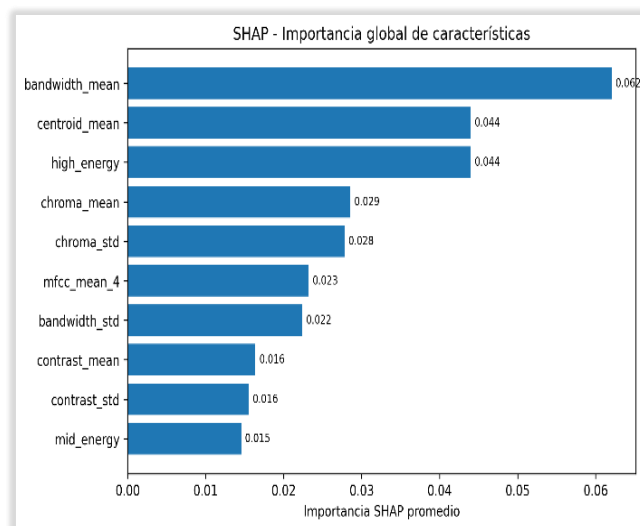


Figura 50: Importancia global de características mediante SHAP.

2.5.4.26 Interpretación de las clases respiratorias mediante SHAP

Como complemento al análisis global, se realizó una interpretación individual para cada una de las clases respiratorias utilizando valores SHAP, permitiendo identificar el efecto que tienen las diferentes características bioacústicas sobre las decisiones tomadas por el modelo. Los resultados evidenciaron que variables relacionadas con el ancho de banda espectral, centroide espectral, energía en altas frecuencias, coeficientes MFCC y características cromáticas presentan diferentes niveles de influencia dependiendo de la categoría respiratoria analizada, proporcionando una interpretación más detallada del proceso de clasificación realizado por el modelo.

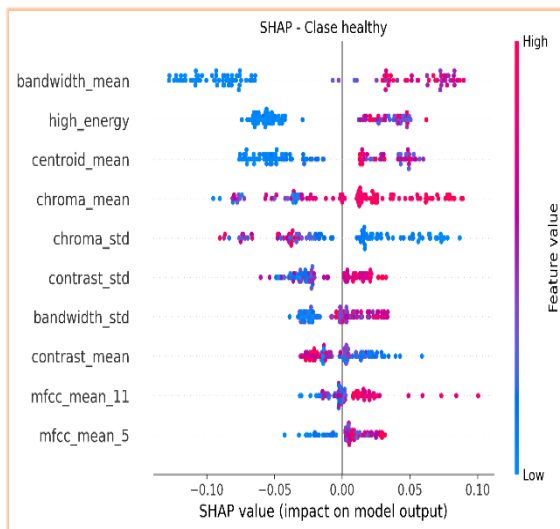


Figura 52: Interpretación SHAP para la clase Healthy.

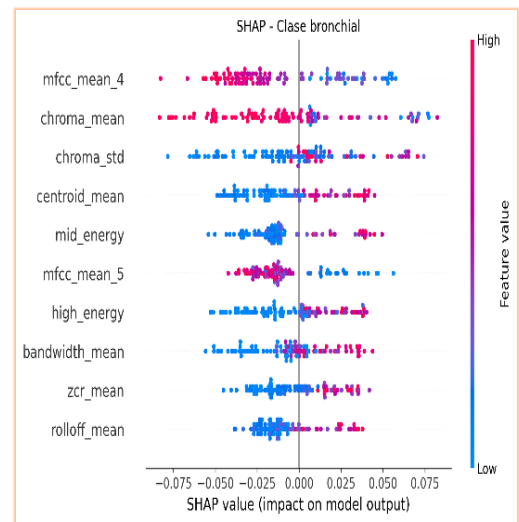


Figura 51: Interpretación SHAP para la clase bronquial.

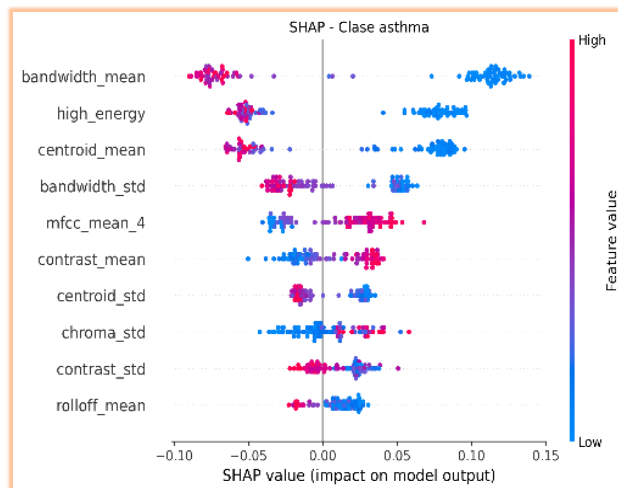


Figura 53: Interpretación SHAP para la clase asma.

2.5.4.27 Generación progresiva de registros respiratorios propios

Además del conjunto de datos público empleado durante el entrenamiento, el sistema implementado permite almacenar automáticamente los registros respiratorios capturados mediante el prototipo IoT. Cada medición enviada por el dispositivo es procesada por el servidor de Machine Learning, donde se generan automáticamente la forma de onda, el espectrograma Mel y el resultado de clasificación correspondiente, estos recursos quedan asociados a cada medición realizada, permitiendo conservar evidencia del comportamiento temporal y espectral de los sonidos respiratorios.

La incorporación de esta funcionalidad constituye la base para la construcción progresiva de un conjunto de datos propio, orientado a futuras etapas de entrenamiento, incorporación de nuevas categorías respiratorias y fortalecimiento del modelo de clasificación automática.

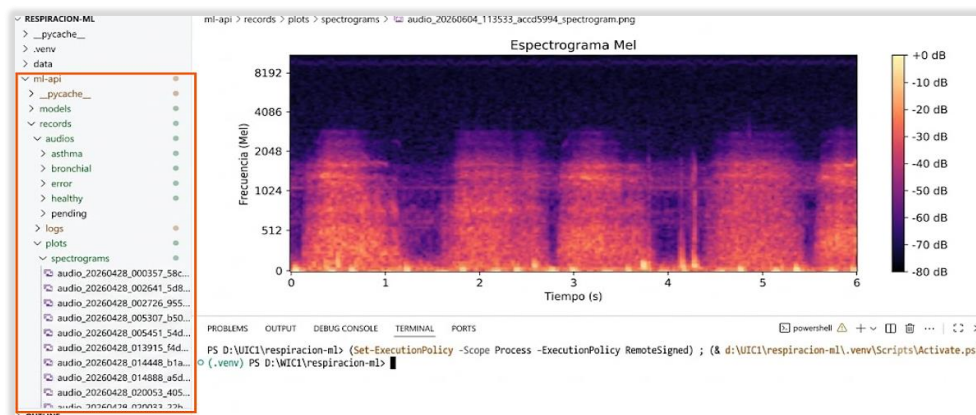


Figura 54: Espectrograma Mel generado automáticamente a partir de una captura respiratoria.

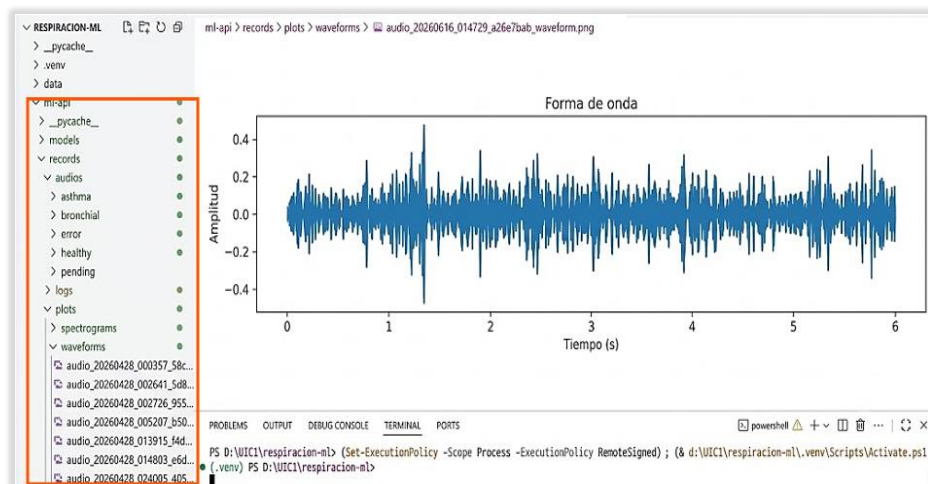


Figura 55: Forma de onda generada automáticamente a partir de una captura respiratoria procesada por el sistema.

Cumplimiento del objetivo específico 3

Procesar el conjunto de datos bioacústicos mediante técnicas de limpieza, segmentación y extracción de características para apoyar la clasificación automática de sonidos respiratorios.

Durante las partes desarrolladas se implementó el procesamiento completo del conjunto de datos bioacústicos, iniciando con la carga y validación de los registros respiratorios, la generación y balanceo del conjunto de datos, el entrenamiento del modelo Random Forest y su evaluación mediante diferentes métricas de clasificación. Además, se aplicaron herramientas como la matriz de confusión, la curva ROC, la validación cruzada y el análisis de importancia de características, permitiendo interpretar el comportamiento del modelo y verificar su estabilidad durante el proceso de clasificación.

Los resultados obtenidos evidenciaron un desempeño satisfactorio, alcanzando una exactitud (Accuracy) de 88,35 %, precisión (Precision) de 88,25 %, Recall de 88,35 % y F1-score de 88,28 %, la validación cruzada obtuvo un promedio de 92,18 %, confirmando la consistencia del modelo el cual fue integrado al sistema para clasificar automáticamente nuevos sonidos respiratorios, evidenciando el cumplimiento del Objetivo Específico 3.

2.5.4.28 Implementación de la aplicación web progresiva

Se desarrolló una aplicación web progresiva orientada a la visualización y gestión de la información respiratoria generada por el prototipo IoT, la plataforma permite el acceso mediante autenticación de usuarios y diferencia las funciones disponibles según el rol asignado, considerando perfiles de administrador, médico y familiar, esta organización permite que cada usuario acceda únicamente a las opciones correspondientes dentro del sistema, la interfaz permite centralizar el uso del sistema desde un entorno visual sencillo, donde el médico puede gestionar pacientes y revisar resultados respiratorios, mientras que el familiar accede a una vista más limitada y comprensible de la información asociada al paciente

La aplicación integra las funcionalidades necesarias para consultar pacientes, visualizar mediciones, acceder al historial respiratorio y revisar los resultados obtenidos durante

el análisis bioacústico, y al estar implementada como PWA, puede utilizarse desde navegadores modernos en equipos de escritorio o dispositivos móviles, facilitando el acceso a la información generada por el sistema. La aplicación integra las funcionalidades necesarias para consultar pacientes, visualizar mediciones, acceder al historial respiratorio y revisar los resultados obtenidos durante el análisis bioacústico, y al estar implementada como PWA, puede utilizarse desde navegadores modernos en equipos de escritorio o dispositivos móviles, facilitando el acceso a la información generada por el sistema.



Figura 57: Registro de cuentas para familiares mediante asociación automática.

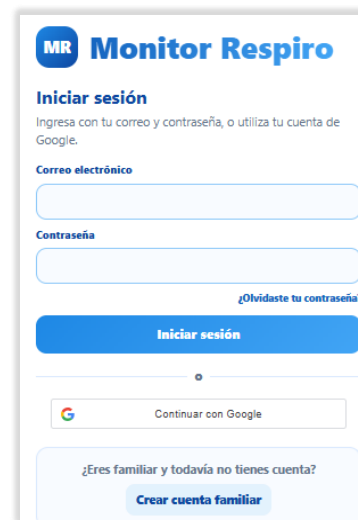


Figura 56: Inicio de sesión de la aplicación web progresiva.

2.5.4.29 Dashboard médico de seguimiento respiratorio

El dashboard médico se implementó como una pantalla principal de seguimiento respiratorio, orientada a presentar una vista general del comportamiento de las mediciones registradas en el sistema. Esta interfaz muestra indicadores resumidos, como número de pacientes, pacientes evaluados, capturas realizadas, resultado predominante, casos con alteración y mediciones no concluyentes. Además, integra gráficos de distribución de clasificaciones, pacientes prioritarios, evolución mensual, frecuencia respiratoria por edad, distribución por sexo, síntomas frecuentes y últimas mediciones, permitiendo que el médico consulte de forma organizada la información generada por el prototipo IoT.

Esta pantalla permite centralizar la interpretación inicial de los datos respiratorios sin reemplazar la valoración médica, ya que los resultados se presentan como información de apoyo para el seguimiento del paciente. A través del dashboard, el personal médico puede identificar tendencias generales, revisar pacientes con mayor cantidad de resultados alterados y acceder posteriormente a secciones específicas como tiempo real, historial o reportes. De esta manera, el dashboard actúa como un panel de control que resume la actividad registrada en la PWA y facilita la consulta rápida de los datos almacenados.



Figura 58: Dashboard médico de seguimiento respiratorio en la PWA.

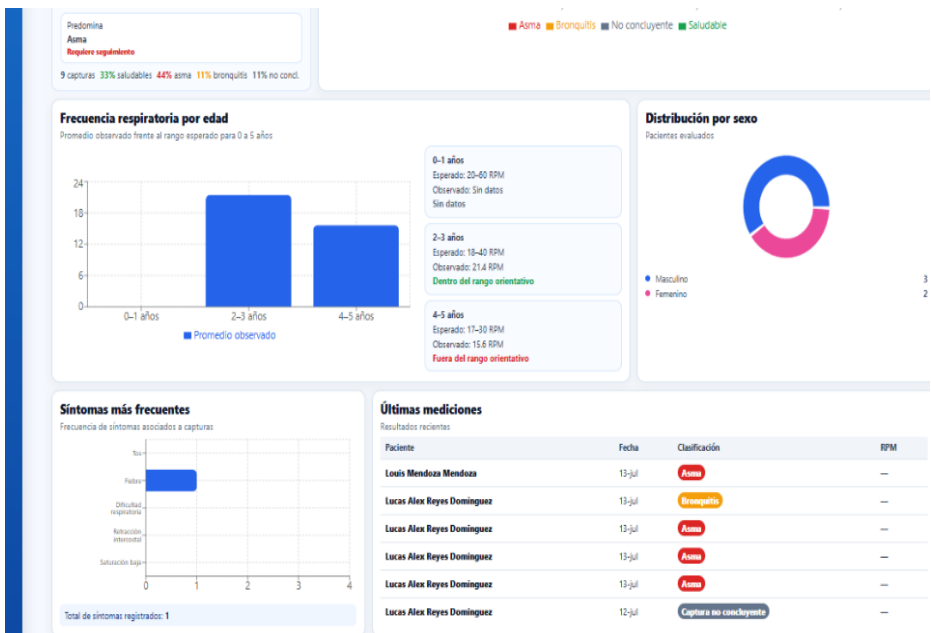


Figura 59: Visualización de métricas complementarias del dashboard médico.

2.5.4.30 Gestión de pacientes y usuarios del sistema

Dentro de la aplicación se implementaron interfaces para la gestión de usuarios, pacientes y responsables familiares, desde el rol administrador se puede registrar, consultar y administrar cuentas de usuario, considerando datos como nombre, correo, rol, teléfono, cédula, método de acceso, estado y último acceso. Esta funcionalidad permite mantener un control organizado de los perfiles que interactúan con el sistema, diferenciando el acceso según el tipo de usuario registrado.

En el caso del rol médico, la plataforma permite crear pacientes, actualizar su información, asociar familiares responsables y consultar los registros disponibles dentro del sistema, estas funciones permiten preparar la información necesaria antes de iniciar una medición respiratoria, ya que cada resultado debe quedar asociado a un paciente específico. De esta manera, la PWA no solo presenta resultados, sino que también mantiene una estructura ordenada para relacionar cada captura del prototipo IoT con el historial respiratorio correspondiente.

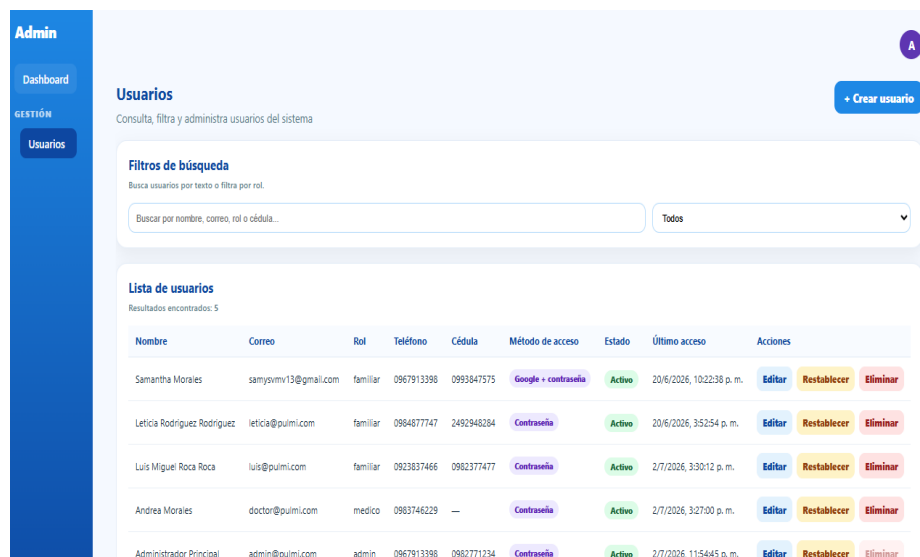


Figura 60: Administración de usuarios desde el rol administrador.

En esta ilustración se muestra el panel del admin en donde puede ver los datos de los usuarios del sistema incluyendo doctores, familiares que son quienes acceden al aplicativo, con la opción de crear únicamente los perfiles de doctores, ya que los familiares crean su propia cuenta, se pueden cambiar datos de todos los usuarios, eliminar usuarios o restablecer usuarios

2.5.4.31 Visualización de métricas respiratorias en tiempo real

El módulo de monitoreo en tiempo real constituye la principal evidencia funcional de la aplicación, ya que integra la comunicación entre el prototipo IoT, el backend, el servidor de procesamiento bioacústico y la interfaz web, en esta pantalla se selecciona el paciente activo y se visualiza la información generada durante la medición respiratoria. Durante la ejecución de una medición, el sistema presenta la frecuencia respiratoria estimada, el resultado del análisis bioacústico, el nivel de confianza, el estado respiratorio, las características acústicas extraídas y los recursos visuales asociados al audio procesado, además, se muestran la forma de onda y el espectrograma Mel, permitiendo observar tanto el comportamiento temporal como la representación frecuencial de la señal respiratoria capturada.

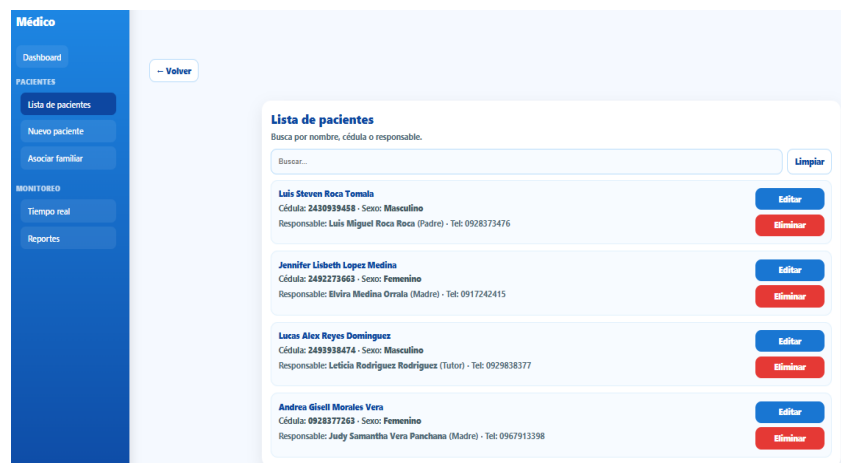


Figura 61: Registro y gestión de pacientes desde el rol médico.

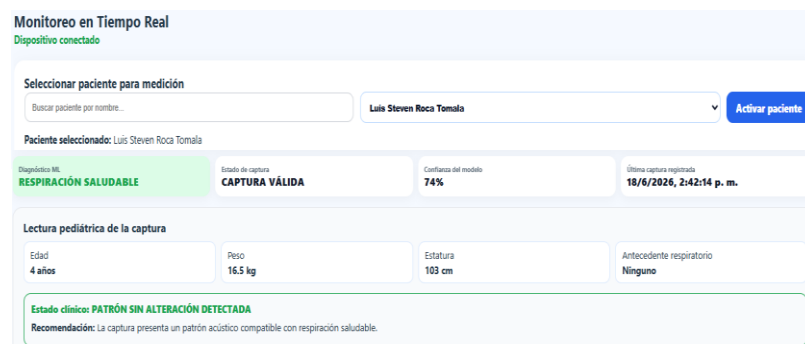


Figura 62: Selección del paciente para iniciar el monitoreo respiratorio.

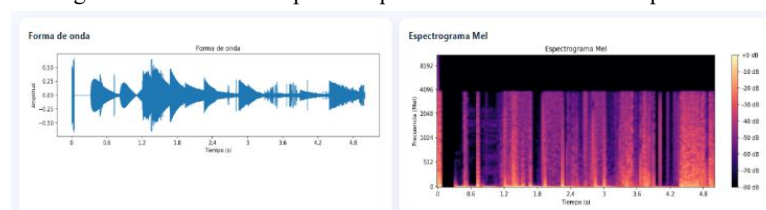


Figura 63: Forma de onda y espectrograma Mel generados durante una medición respiratoria.

2.5.4.32 Historial, reportes y seguimiento de mediciones

La aplicación permite almacenar y consultar las mediciones respiratorias realizadas a cada paciente, organizándolas de forma cronológica dentro del historial clínico, cada registro incluye la fecha de medición, frecuencia respiratoria, resultado obtenido, nivel de confianza y recursos visuales generados durante el procesamiento del audio. También se incorporó la generación de reportes en formato PDF, lo que permite consolidar la información respiratoria de un paciente para su revisión posterior. Esta funcionalidad complementa el monitoreo en tiempo real, ya que permite conservar evidencia de las mediciones realizadas y facilita el seguimiento de la evolución respiratoria durante las pruebas controladas.

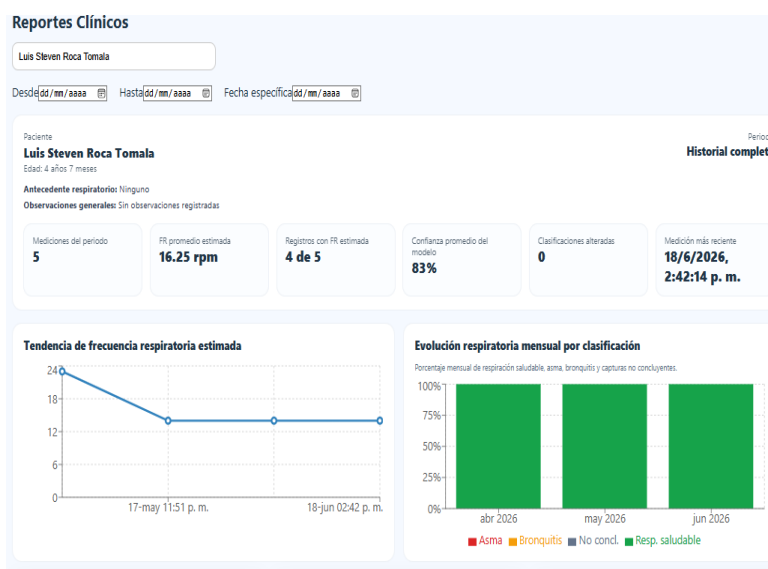


Figura 64: Pantalla de reportes clínicos de la pwa.

may 2026

Total 2 mediciones: RPM promedio: 19 rpm

Predominio: Respiración saludable

Más base

Resp. saludable: 2 (100%)

jun 2026

Total 2 mediciones: RPM promedio: 14 rpm

Predominio: Respiración saludable

Sin cambios importantes

Resp. saludable: 2 (100%)

jul 2026

Total 3 mediciones: RPM promedio: 15 rpm

Predominio: Respiración saludable

Sin cambios importantes

Resp. saludable: 3 (100%)

Tabla Clínica de Mediciones

Mostrar:

Todas las mediciones

7 registros

Fecha	Respiraciones por minuto (rpm)	Diagnóstico	Audio	Forma de onda	Espectrograma	Confianza	Acción
10/7/2026, 6:24:04 p. m.	21 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	78%	Ver datos clínicos Editar Eliminar
10/7/2026, 4:11:31 p. m.	28 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	75%	Ver datos clínicos Editar Eliminar
10/7/2026, 12:33:02 a. m.	22 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	75%	Ver datos clínicos Editar Eliminar
18/6/2026, 2:42:14 p. m.	25 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	74%	Ver datos clínicos Editar Eliminar
18/6/2026, 12:22:36 a. m.	27 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	88%	Ver datos clínicos Editar Eliminar
17/5/2026, 11:51:00 p. m.	24 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	95%	Ver datos clínicos Editar Eliminar
17/5/2026, 10:47:00 p. m.	26 rpm	Normal	Escuchar	Ver	Ver	86%	Ver datos clínicos Editar Eliminar

Generar PDF

Figura 65: Tabla de mediciones totales.

REPORTE DE MONITOREO RESPIRATORIO

Prototipo V1.0 de apoyo al seguimiento de sondas respiratorias infantiles

Evolución respiratoria mensual

Evolución respiratoria mensual

Mes	Mediciones	Saludables	Asma	Strangulio	No cens.	RPM promedio	Letado
abr 2026	1	1	0	0	0	No estimada	Misó bene
may 2026	2	2	0	0	0	19 gpm	Sin cambios importantes
jun 2026	2	2	0	0	0	14 gpm	Sin cambios importantes

Detalle de mediciones

Fecha	FR estimada	Clasificación	Confianza
18/6/2026, 2:42 14 p. m.	14 gpm	Respiración saludable	74%
18/6/2026, 12:22 36 a. m.	14 gpm	Respiración saludable	88%
17/6/2026, 11:51 00 p. m.	14 gpm	Respiración saludable	80%
17/6/2026, 10:47 00 p. m.	23 gpm	Respiración saludable	88%
17/6/2026, 10:16 00 p. m.	No estimada	Respiración saludable	74%

Contexto clínico registrado

Fecha	Síntomas reportados	Observaciones clínicas
18/6/2026, 2:42 14 p. m.	Fiebre	Sin observaciones

Consideraciones para la interpretación

Los resultados corresponden a clasificaciones automatizadas obtenidas mediante el análisis de sondas respiratorias. La frecuencia respiratoria presentada es una estimación acústica por captura y no una medición clínica directa. Esta información debe utilizarse como apoyo para el seguimiento y no sustituye la valoración clínica, la auscultación profesional ni otros procedimientos diagnósticos.

Fuente: AVISO Cuadern / Monitoreo respiratorio infantil

Página 2 de 6

Figura 66: Generación pdf detalles de mediciones.

Reporte de Monitoreo Respiratorio

Prototipo V1.0 de apoyo al seguimiento de sondas respiratorias infantiles

Resumen clínico del periodo

Datos generales

Paciente	Luis Steven Roca Tomala	Edad	4 años 7 meses
Periodo analizado	Historial completo	Fecha de generación	9/7/2026
Antecedente respiratorio	Ninguno	Medición más reciente	18/6/2026, 2:42:14 p. m.

Observaciones generales del paciente

Sin observaciones generales registradas

Resumen del periodo

Indicador	Resultado
Mediciones analizadas	5
Clasificación predominante	Normal
Confianza promedio del modelo	83%
FR promedio estimada	16.3 rpm
Registros con FR estimada	4 de 5
Clasificaciones respiratorias alteradas	0

Distribución de clasificaciones

Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Respiración saludable	5	100.0%
Patron compatible con asma	0	0.0%
Patron compatible con bronquitis	0	0.0%
Captura no concuyente	0	0.0%

Figura 67: Generación pdf datos generales.

2.5.4.33 Consulta de información respiratoria por familiares

Se implementó una interfaz específica para familiares, orientada a la consulta de la información respiratoria del paciente asociado a su cuenta, este perfil permite revisar la última medición registrada, consultar el historial de evaluaciones y visualizar el estado respiratorio de forma simplificada, sin modificar la información clínica almacenada. Esta funcionalidad permite que el familiar acceda a los resultados generados por el sistema de manera comprensible, manteniendo el enfoque del prototipo como una herramienta de apoyo al monitoreo respiratorio, la información presentada se limita a la visualización de resultados y seguimiento, evitando funciones administrativas o clínicas reservadas al médico.

Última medición	
Consulta el registro más reciente del paciente.	
Paciente	Luis Steven Roca Tomala
Respiración saludable	
La captura fue clasificada dentro de la categoría saludable.	
Fecha de la medición	10 jul 2026, 6:24 p. m.
Estado del seguimiento	Respiración saludable
Orientación para el familiar	
La medición no mostró alteraciones respiratorias relevantes.	
Qué hacer ahora	
Continúe con el seguimiento habitual y observe si aparecen nuevos síntomas.	
Síntomas registrados	
No registrados	

Figura 69: Familiar pantalla tiempo real.

Mis pacientes vinculados

Consulta la información reciente registrada por el equipo médico.

Pacientes vinculados

1

Con mediciones registradas

1

Última actualización

18/6/2026, 2:42:14 p. m.

Luis Steven Roca Tomala

Edad

4 años 7 meses

Sexo

Masculino

Mediciones

5

Información general del paciente

Peso registrado

16.5 kg

Alergias

Ninguna

Observaciones generales

Sin observaciones registradas

Esta información es de apoyo para el seguimiento y no sustituye la valoración médica.

Ir a tiempo real

Ver historial

Figura 68: Visualización de información respiratoria desde el perfil familiar.

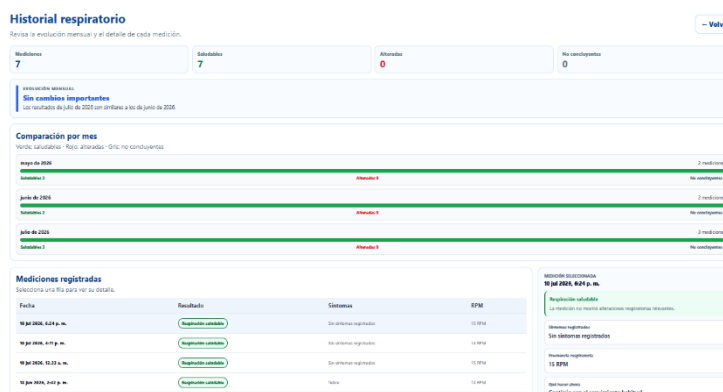


Figura 70: Familiar pantalla historial.

Cumplimiento del objetivo específico 4

Desarrollar una aplicación web progresiva, mediante la implementación de interfaces de visualización y la evaluación del prototipo IoT a través de pruebas técnicas controladas, para presentar métricas respiratorias y resultados del análisis bioacústico.

Durante este incremento se desarrolló la aplicación web progresiva del sistema, integrando interfaces para la gestión de usuarios, pacientes, mediciones, historial respiratorio y consulta familiar, la funcionalidad de monitoreo en tiempo real permitió evidenciar la integración entre el prototipo IoT, el backend, el servidor de procesamiento bioacústico y la visualización de resultados dentro de la plataforma. A través de las pruebas técnicas controladas se verificó la captura, transmisión, procesamiento, almacenamiento y visualización de la información respiratoria, como resultado, la aplicación permitió presentar métricas respiratorias, forma de onda, espectrograma Mel, nivel de confianza y resultado del análisis bioacústico.

2.5.5 Levantamiento de datos reales con el dispositivo iot

El levantamiento de datos reales se realizó para comprobar que el prototipo podía utilizarse fuera del entorno de desarrollo y generar registros respiratorios asociados a pacientes pediátricos, en esta etapa permitió comprobar que el dispositivo podía utilizarse con participantes pediátricos, captar sonidos desde la región dorsal y enviar la información hacia el flujo de procesamiento del sistema. La finalidad fue respaldar técnicamente la captura, segmentación, almacenamiento y visualización de los datos respiratorios obtenidos durante el uso del prototipo.

Durante la recolección se consideró la protección de la identidad de los participantes, debido a que el proyecto trabaja con menores de edad y datos relacionados con salud. Por esta razón, las fotografías usadas como evidencia fueron anonimizadas y los registros se organizaron mediante códigos de prueba. El formato de autorización y consentimiento informado se incluye en el Anexo 5, conforme a criterios de confidencialidad y tratamiento responsable de datos personales establecidos en la Ley Orgánica de Protección de Datos Personales del Ecuador [61].

El procedimiento técnico se mantuvo breve y controlado: el paciente permaneció en posición sentada, el sensor se ubicó en la espalda y el registro respiratorio tuvo una duración de un minuto, luego el audio fue segmentado en fragmentos de 6 segundos para facilitar el cálculo de frecuencia respiratoria y la extracción de características acústicas. La matriz completa de mediciones, con códigos, edad, RPM, resultado, confianza y observaciones que se presentan en el Anexo 3.

Indicador	Dato registrado
Niños incluidos en el levantamiento	3 participantes pediátricos
Mediciones respiratorias registradas	9 capturas completas
Duración de cada medición	1 minuto
Segmentación del audio	10 fragmentos de 6 segundos por captura
Zona de captura	Región dorsal / espalda
Identificación usada	Códigos P01, P02 y P03
Respaldo documental	Consentimiento informado y matriz completa en anexos

Tabla 15: Datos generales del levantamiento real con el dispositivo IoT.



Figura 72: Captura respiratoria con el sensor ubicado en región dorsal.



Figura 71: Registro antropométrico previo al levantamiento de datos respiratorios.

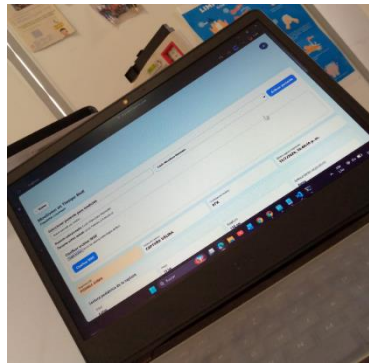


Figura 73: Visualización del resultado obtenido en la PWA durante el levantamiento de datos.

2.5.5.1 Validación técnica de resultados

La validación técnica se realizó para comprobar que la clasificación automática no dependa únicamente de una interpretación visual del sistema, sino de resultados medibles obtenidos durante el entrenamiento y la evaluación del modelo y para eso se consideraron métricas de clasificación, matriz de confusión, validación cruzada y curva ROC multiclase, debido a que estas herramientas permiten revisar el desempeño del modelo desde diferentes criterios: aciertos generales, errores por clase, estabilidad entre particiones y capacidad de separación entre categorías respiratorias [62] [63] .

En este proyecto el modelo Random Forest fue evaluado con un conjunto de prueba separado del entrenamiento y con balanceo aplicado únicamente sobre los datos de aprendizaje, esta decisión permitió reducir el sesgo hacia la clase con mayor cantidad

de registros, sin alterar el conjunto reservado para evaluación. La validación cruzada estratificada permitió observar si el comportamiento del modelo se mantenía estable al cambiar las particiones de datos.

Validadores técnicos aplicados al modelo

Validador	Qué comprueba	Resultado del proyecto	Lectura técnica
Métricas de clasificación	Accuracy, precision, recall y F1-score sobre datos no usados en entrenamiento.	Accuracy: 88,35 %. Precision: 88,25 %. Recall: 88,35 %. F1-score: 88,28 %.	El modelo presenta desempeño general favorable para clasificar señales respiratorias en las clases evaluadas.
Matriz de confusión	Cantidad de aciertos y errores por cada clase respiratoria.	Aciertos: asma 51, bronquial 15 y healthy 25. Mayor dificultad en la clase bronquial.	Permite identificar que el rendimiento no es igual en todas las clases y que bronquial requiere más datos.
Validación cruzada estratificada	Estabilidad del modelo en cinco particiones manteniendo proporción de clases.	Resultados: 86,40 %, 89,22 %, 95,09 %, 97,06 % y 93,14 %. Promedio: 92,18 %.	El modelo mantiene comportamiento estable y no depende de una sola división de datos.
Curva ROC multiclase	Capacidad del modelo para separar las categorías respiratorias.	Se generó una curva ROC para las tres clases evaluadas.	Complementa la evaluación porque revisa la discriminación entre clases y no solo el porcentaje de aciertos.
Comparación externa	Ubicación del resultado frente a investigaciones recientes.	El resultado del proyecto se compara con estudios posteriores a 2020.	El desempeño se acerca a rangos reportados en trabajos de clasificación automática de sonidos respiratorios.

Tabla 16: Validadores técnicos aplicados para comprobar el desempeño del modelo Random Forest.

2.5.5.2 Comparación con estudios relacionados

La siguiente tabla presenta una comparación entre el modelo implementado en este proyecto y estudios recientes orientados a la clasificación automática de sonidos respiratorios, se incluye el resultado propio para establecer una referencia directa, y luego se presentan trabajos relacionados con diferentes modelos, conjuntos de datos y estrategias de validación. La comparación no busca afirmar superioridad absoluta, porque cada investigación usa condiciones de captura, clases, tamaños de muestra y protocolos distintos, sino demostrar que el resultado obtenido se encuentra dentro de un rango técnico comparable y favorable.

Estudio	Datos y técnica	Validación	Resultado reportado	Relación con este proyecto
Presente proyecto	Audios respiratorios procesados con RMS, ZCR, centroide, ancho de banda, energía por bandas y MFCC. Modelo Random Forest.	Train/test estratificado, balanceo en entrenamiento, matriz de confusión, ROC y validación cruzada de 5 particiones.	Accuracy 88,35 %. Precision 88,25 %. Recall 88,35 %. F1-score 88,28 %. Validación cruzada promedio 92,18 %.	Resultado propio usado como línea base. Se acerca a rangos favorables de estudios recientes.
Monaco et al. (2020)	Clasificación clínica de sonidos normales, crackles, wheezes y rhonchi mediante deep learning.	Características multi-escala para clasificación de sonidos respiratorios.	Validación experimental del modelo propuesto.	El resultado del proyecto supera levemente la exactitud reportada, aunque usa datos y protocolo diferentes [64].
Kim et al. (2021)	Clasificación clínica de sonidos normales, crackles, wheezes y rhonchi mediante deep learning.	Registros clínicos reales con ruido de campo.	Accuracy 86,5 % y AUC 0,93.	El resultado del proyecto es cercano y se ubica en un rango comparable para apoyo al seguimiento [65].

Petmezas et al. (2022)	ICBHI 2017, espectrogramas STFT, red híbrida CNN-LSTM y focal loss.	Split oficial, validación cruzada inter-paciente y leave-one-out.	Accuracy 73,69 % en split oficial y 76,39 % en validación cruzada inter-paciente.	Muestra que bases públicas exigentes pueden producir resultados menores según el protocolo de validación [66].
Gulzar et al. (2023)	CBHI, MFCC y VGG16 con transferencia de aprendizaje.	Validación cruzada de 5 particiones.	Accuracy 95 %, precision 88 %, recall 86 % y F1 score 81 %.	El proyecto tiene F1-score global mayor, aunque el otro estudio reporta accuracy superior [67].
Shuvo et al. (2020)	ICBHI, EMD CWT y CNN ligero para clasificación de enfermedades respiratorias.	Partición independiente por paciente.	Weighted accuracy mayor al 99 % en tareas específicas.	Sirve como referencia alta; no es comparación directa por arquitectura, clases y protocolo [68].

Tabla 17: Comparación del desempeño del modelo con estudios relacionados.

2.6 Pruebas

2.6.1 Casos de prueba del prototipo iot y la aplicación web progresiva

Prueba No.01 – Funcionamiento del prototipo iot

Campo	Contenido
Roles	Dispositivo IoT
Descripción	Validar el correcto funcionamiento del prototipo IoT durante la inicialización del sistema, verificando la comunicación entre el microcontrolador ESP32, el

	micrófono digital INMP441, la pantalla LCD I2C, el sensor MPU6050 y la conexión inalámbrica WiFi, garantizando que todos los componentes se encuentren operativos antes de iniciar la captura de los sonidos respiratorios.		
Condiciones	El prototipo debe encontrarse correctamente ensamblado y alimentado mediante conexión USB. Todos los módulos electrónicos deben estar conectados según el diseño establecido y el servidor backend debe permanecer disponible para recibir la información generada durante la prueba.		
Pasos	1. Conectar el prototipo IoT al computador mediante el cable USB. Esperar la inicialización automática del ESP32. 3. Verificar la comunicación con el micrófono INMP441, la pantalla LCD y el sensor MPU6050. 4. Comprobar la conexión a la red WiFi. 5. Confirmar que el sistema se encuentre listo para iniciar una nueva medición respiratoria.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
El prototipo IoT inicializa correctamente el ESP32, establece comunicación con los dispositivos conectados, obtiene conexión inalámbrica con el servidor backend y queda preparado para realizar la captura de sonidos respiratorios sin presentar errores durante la ejecución.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 18: Prueba No.01 - Funcionamiento del prototipo IoT

Prueba No.02 – Captura de señal respiratoria desde el dispositivo iot

Campo	Contenido		
Roles	Dispositivo iot, médico		
Descripción	Validar el proceso de captura de los sonidos respiratorios mediante el micrófono digital INMP441 adaptado al estetoscopio, verificando que la señal adquirida presente la calidad suficiente para continuar con el procesamiento bioacústico y la clasificación automática implementada.		
Condiciones	El prototipo debe encontrarse correctamente inicializado, el paciente debe estar previamente seleccionado dentro de la aplicación y el estetoscopio debe colocarse adecuadamente sobre el punto de auscultación para obtener una señal respiratoria de calidad.		
Pasos	1. Seleccionar el paciente desde la aplicación web progresiva. 2. Colocar correctamente el estetoscopio sobre el paciente. 3. Iniciar la captura del sonido respiratorio. 4. Esperar la finalización automática de la medición. 5. Verificar que el archivo de audio haya sido generado correctamente.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
El sistema captura correctamente el sonido respiratorio mediante el prototipo IoT, generando un archivo de audio adecuado para continuar con el procesamiento bioacústico y la clasificación automática.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 19: Prueba No.02 - Captura del sonido respiratorio.

Prueba No.03 – Transmisión del audio respiratorio al servidor

Campo	Contenido		
Roles	Dispositivo IoT, backend		
Descripción	Validar la transmisión del audio respiratorio capturado por el prototipo IoT hacia el servidor backend mediante comunicación WiFi y solicitudes HTTP POST, comprobando que la información sea recibida correctamente para iniciar el procesamiento bioacústico y el almacenamiento de la medición.		
Condiciones	El dispositivo debe encontrarse conectado a la red WiFi y el servidor backend debe permanecer en ejecución con disponibilidad para recibir la información del protoripo.		
Pasos	1. Finalizar la captura del sonido respiratorio. 2. Ejecutar el envío automático del archivo al backend. 3. Esperar la respuesta generada por el servidor. 4. Verificar la correcta recepción del audio. 5. Confirmar el almacenamiento para su procesamiento.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
El servidor backend recibe correctamente el archivo de audio enviado por el prototipo IoT, permitiendo iniciar el procesamiento bioacústico y el almacenamiento de la información sin presentar errores durante la transmisión.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 20: Prueba No.03 - Transmisión del audio respiratorio al servidor.

Prueba No.04 – Procesamiento bioacústico

Campo	Contenido	
Roles	Servidor de machine learning	
Descripción	Validar el procesamiento bioacústico del audio respiratorio recibido por el servidor, verificando la extracción de características temporales, frecuenciales y cepstrales que posteriormente serán utilizadas por el modelo de clasificación automática para determinar el estado respiratorio del paciente.	
Condiciones	El archivo de audio debe encontrarse almacenado correctamente en el servidor y el módulo de procesamiento bioacústico debe estar disponible para ejecutar el análisis de la señal respiratoria.	
Pasos	1. Recibir el archivo de audio enviado por el prototipo. 2. Ejecutar el procesamiento bioacústico. 3. Extraer las características espectrales y temporales. 4. Generar el espectrograma Mel y los coeficientes MFCC. 5. Verificar que todas las características hayan sido calculadas correctamente.	
Resultado obtenido		
Resultado esperado	Evaluación de la prueba	
El sistema obtiene correctamente las características bioacústicas del sonido respiratorio, incluyendo FFT, STFT, espectrograma Mel, MFCC y métricas espectrales utilizadas posteriormente por el modelo de clasificación del machine learning.	✓	Exitoso
		Fallido

Tabla 21: Prueba No.04 - Procesamiento bioacústico.

Prueba No.05 – Clasificación automática mediante random forest

Campo	Contenido		
Roles	Servidor de machine learning y modelo random forest		
Descripción	Validar el funcionamiento del modelo Random Forest durante la clasificación automática de los sonidos respiratorios, comprobando que las características bioacústicas generadas sean utilizadas para identificar la categoría respiratoria correspondiente y el nivel de confianza obtenido durante la predicción.		
Condiciones	Las características bioacústicas deben haberse generado correctamente y el modelo Random Forest entrenado debe encontrarse cargado en el servidor de Machine Learning para ejecutar la clasificación.		
Pasos	1. Cargar las características obtenidas durante el procesamiento bioacústico. 2. Ejecutar el modelo Random Forest. 3. Obtener la categoría respiratoria predicha. 4. Generar el porcentaje de confianza asociado. 5. Enviar el resultado al backend para su almacenamiento.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
El modelo Random Forest genera correctamente la clasificación automática del sonido respiratorio y el porcentaje de confianza correspondiente, permitiendo almacenar y visualizar el resultado dentro de la aplicación web progresiva.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 22: Prueba No.05 - Clasificación automática mediante Random Forest.

Prueba No.06 – Monitoreo respiratorio en tiempo real

Campo	Contenido		
Roles	Médico, Aplicación web progresiva.		
Descripción	Validar el funcionamiento del módulo de monitoreo en tiempo real, verificando que la aplicación web progresiva visualice correctamente las métricas respiratorias obtenidas durante la medición, junto con la forma de onda, el espectrograma Mel, la clasificación automática y el nivel de confianza generado por el modelo de ml.		
Condiciones	El paciente debe encontrarse previamente registrado y seleccionado dentro de la aplicación. El prototipo IoT debe haber transmitido correctamente el audio respiratorio y el servidor debe haber finalizado el procesamiento bioacústico.		
Pasos	1. Iniciar sesión como médico. 2. Seleccionar el paciente correspondiente. 3. Acceder al módulo Tiempo Real. 4. Ejecutar una nueva medición respiratoria. 5. Verificar la información mostrada durante el monitoreo.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
La aplicación web progresiva presenta correctamente la frecuencia respiratoria, la forma de onda, el espectrograma Mel, la clasificación automática y el porcentaje de confianza obtenido durante el análisis bioacústico.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 23: Prueba No.06 - Monitoreo respiratorio en tiempo real.

Prueba No.07 – Registro de mediciones respiratorias

Campo	Contenido		
Roles	Médico, base de datos mongo DB atlas		
Descripción	Validar que las mediciones respiratorias generadas por el sistema sean almacenadas correctamente en la base de datos junto con la información del paciente, métricas respiratorias, características bioacústicas y resultado de la clasificación automática.		
Condiciones	Debe existir una medición respiratoria procesada correctamente y el servicio de base de datos debe encontrarse disponible para almacenar la información correspondiente.		
Pasos	- Finalizar la medición respiratoria. - Procesar el audio recibido. - Registrar la información en la base de datos. - Consultar el registro almacenado. - Verificar la integridad de los datos.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
El sistema almacena correctamente la medición respiratoria junto con las métricas, características bioacústicas, y resultado de la clasificación, asociando el registro al paciente correspondiente.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 24: Prueba No.07 - Registro de mediciones respiratorias.

Prueba No.08 – Consulta del historial respiratorio

Campo	Contenido	
Roles	Médico, familiar, aplicación web progresiva.	
Descripción	Validar la consulta del historial respiratorio desde la aplicación web progresiva, comprobando que las mediciones almacenadas puedan visualizarse de forma organizada junto con la información clínica generada durante cada evaluación.	
Condiciones	El paciente debe contar con registros previamente almacenados y el usuario debe disponer de permisos para acceder a la información correspondiente.	
Pasos	1. Iniciar sesión en la aplicación. 2. Acceder al módulo Historial. 3. Seleccionar un paciente. 4. Consultar las mediciones registradas. 5. Revisar el detalle de una medición.	
Resultado obtenido		
Resultado esperado	Evaluación de la prueba	
La aplicación presenta correctamente el historial respiratorio del paciente, mostrando las mediciones registradas, la clasificación obtenida y la información asociada a cada evaluación.	✓	Exitoso
		Fallido

Tabla 25: No.08 - Consulta del historial respiratorio.

Prueba No.09 – Generación de reporte pdf

Campo	Contenido
Roles	Médico, aplicación web progresiva.

Descripción	Validar la generación del reporte clínico en formato PDF utilizando la información almacenada durante las mediciones respiratorias, permitiendo resumir las evaluaciones realizadas para facilitar el seguimiento del paciente.		
Condiciones	El paciente debe contar con mediciones previamente registradas y el módulo de generación de reportes debe encontrarse disponible.		
Pasos	1. Acceder al módulo Reportes. 2. Seleccionar el paciente. 3. Definir el período de consulta. 4. Generar el reporte en formato PDF. 5. Verificar el contenido generado.		
Resultado obtenido			
Resultado esperado		Evaluación de la prueba	
El sistema genera correctamente un reporte en formato PDF que contiene las mediciones respiratorias, resultados de clasificación y métricas registradas durante el período seleccionado.		✓	Exitoso
			Fallido

Tabla 26: No.09 - Generación del reporte clínico en PDF.

Prueba No.10 – Integración completa del sistema

Campo	Contenido
Roles	Aplicación web progresiva, backend, servidor de machine learning, base de datos mongo
Descripción	Validar el funcionamiento integral del sistema desarrollado, comprobando la comunicación entre el prototipo IoT, el backend, el módulo de procesamiento

	bioacústico, el modelo Random Forest, la base de datos y la aplicación web progresiva durante una medición respiratoria completa.	
Condiciones	Todos los módulos del sistema deben encontrarse correctamente configurados y operativos para permitir la ejecución completa del flujo de adquisición, procesamiento, almacenamiento y visualización de la información.	
Pasos	1. Inicializar el prototipo IoT. 2. Capturar el sonido respiratorio. 3. Transmitir el audio al backend. 4. Ejecutar el procesamiento bioacústico. 5. Obtener la clasificación automática. 6. Almacenar la información. 7. Visualizar los resultados en la aplicación.	
Resultado obtenido		
Resultado esperado	Evaluación de la prueba	
El sistema ejecuta correctamente todas las etapas del proceso, desde la captura del sonido respiratorio hasta la visualización de las métricas respiratorias y resultados del análisis bioacústico, sin presentar errores durante la integración de los módulos.	✓	Exitoso
		Fallido

Tabla 27: Integración funcional del prototipo IoT y la aplicación web progresiva.

2.7 Resultados

Los resultados presentados corresponden a las pruebas técnicas realizadas durante la construcción e integración del sistema IoT respiratorio en un entorno real controlado, durante el desarrollo se identificaron dificultades propias de la captación de sonidos pulmonares, como baja amplitud de la señal, ruido ambiental, movimiento del paciente pediátrico y registros iniciales poco estables. Estas situaciones permitieron ajustar el

montaje físico del dispositivo, la ubicación del sensor, el tiempo de captura, el procesamiento del audio y la presentación de resultados en la aplicación web progresiva. Los resultados evidencian que la solución implementada permitió transformar las dificultades encontradas en registros respiratorios organizados, clasificaciones automáticas, historial por paciente y reportes generados desde la plataforma.

Resultados - Solución del sistema iot respiratorio

Problemática Identificada	Solución implementada	Resultados Obtenidos	Impacto
Captación inicial débil del sonido pulmonar	Acoplamiento del INMP441 con campana y manguera de estetoscopio	Señal respiratoria con mayor presencia acústica	✓ Mejora de captura
Interferencia por ruido del entorno	Revisión del ambiente de prueba y control de condiciones durante la medición	Registros con menor alteración externa	✓ Señal más limpia
Movimiento del niño durante la captura	Uso del MPU6050 como referencia de estabilidad del dispositivo	Capturas inestables identificadas durante el registro	✓ Control de calidad
Capturas cortas para estimar respiraciones por minuto	Medición de 1 minuto organizada en fragmentos de 6 segundos	Lectura respiratoria estructurada por segmentos	✓ Cálculo ordenado
Confianza inicial variable en algunas clasificaciones	Ajuste de características acústicas, escalador	Resultado visible con clase predicha y porcentaje de confianza	✓ Interpretación técnica

	y modelo Random Forest		
Mediciones sin vinculación completa al paciente activo	Asociación automática entre paciente seleccionado, medición e historial	Registros consultables por paciente desde la PWA	✓ Trazabilidad
Reportes generados sin respaldo estructurado al inicio	Registro de metadatos del reporte en MongoDB Atlas	PDF asociado a paciente, tipo de reporte y fecha	✓ Evidencia documental

Tabla 28: Resultados - Solución del sistema IoT respiratorio.

Medición - Clasificación respiratoria

Fase	Herramienta	Resultado	Interpretación
Pre-test	Prototipo IoT ESP32 + INMP441	Capturas con ruido, baja amplitud o movimiento	Línea base de ajuste
Intervención	Procesamiento bioacústico + Random Forest	Extracción de RMS, ZCR, centroide, energía y MFCC	Proceso automático
Post-test	PWA + MongoDB Atlas + reportes	Mediciones clasificadas, almacenadas y visibles por paciente	Clasificación registrada
MEJORA TOTAL	Comparación entre capturas enviadas y clasificadas	Registros con resultado, confianza e historial	Efectividad comprobada

Tabla 29: Resultados Medición - Clasificación respiratoria.

CONCLUSIONES

El prototipo desarrollado permitió consolidar una arquitectura IoT funcional para adquirir sonidos respiratorios pediátricos, durante el desarrollo se comprobó que la calidad de la señal depende de las conexiones electrónicas, el acoplamiento acústico, la estabilidad física y las condiciones del entorno, las primeras capturas presentaron variaciones de amplitud e interferencias, por lo que se incorporaron la campana y manguera del estetoscopio, se verificó la lectura I2S y se utilizó el MPU6050 como referencia de movimiento. El firmware configurado a 16 kHz permitió preparar y transmitir los audios al backend mediante HTTP POST, este proceso evidenció que la integración entre hardware, firmware y comunicación inalámbrica es esencial para mantener un flujo de adquisición estable.

El procesamiento bioacústico permitió transformar los audios en representaciones temporales, frecuenciales y cepstrales aptas para el análisis computacional, durante las primeras pruebas se comprobó que el uso aislado de la FFT no describía completamente la variabilidad de las señales, por lo que se incorporaron STFT, espectrograma Mel y coeficientes MFCC, también se calcularon RMS, ZCR, centroide espectral, ancho de banda, spectral rolloff, chroma, contraste espectral y energía por bandas. Al detectar diferencias de amplitud, silencios prolongados y registros demasiado cortos, se añadieron procesos de normalización y eliminación automática de silencios y al aplicar estas mejoras permitieron obtener características más uniformes y representar con mayor detalle el comportamiento acústico de cada señal respiratoria.

Se construyó un conjunto de datos bioacústico compuesto por 511 registros y 46 variables, con una distribución inicial de 279 muestras de asma, 131 saludables y 101 bronquiales, durante el análisis se identificó que este desbalance podía favorecer a la clase mayoritaria, por lo que se aplicó remuestreo únicamente al conjunto de entrenamiento hasta obtener 200 registros por categoría, manteniendo intactas las 103 muestras de prueba. El modelo Random Forest con 500 árboles alcanzó una exactitud de 88,35 %, precisión de 88,25 %, recall de 88,35 % y F1-score de 88,28 %, la validación cruzada obtuvo un promedio de 92,18 %, mostrando estabilidad en la generalización, los resultados permitieron reconocer que la clase bronquial requiere mayor diversidad de registros para mejorar su diferenciación.

La aplicación web progresiva integró el dispositivo IoT con el backend en Node.js y Express, MongoDB Atlas y el servicio de Machine Learning en Flask, debido a que el dispositivo puede utilizarse con varios pacientes y no los identifica de forma autónoma, se incorporó la selección y activación previa del paciente antes de cada medición, esta lógica permitió asociar el audio, la clasificación, la confianza y las métricas bioacústicas con el historial correspondiente. Durante la integración se comprobó la importancia de mantener consistencia entre paciente activo, medición recibida y resultado procesado, la plataforma también permitió visualizar forma de onda, espectrograma Mel, frecuencia respiratoria estimada e historial cronológico, facilitando el seguimiento de cada medición.

RECOMENDACIONES

Para optimizar la calidad de captura de los sonidos respiratorios y reducir la presencia de ruido ambiental durante las mediciones, se plantea mejorar el acoplamiento físico entre el micrófono INMP441, la campana del estetoscopio y la superficie de contacto con el paciente. Se incorpora como mejora futura un proceso de calibración inicial antes de cada registro, capaz de reconocer el nivel de ruido del entorno y ajustar los parámetros de captura según la intensidad de la señal respiratoria, esta mejora permitirá obtener audios más estables, disminuir capturas no concluyentes y fortalecer la confiabilidad del procesamiento bioacústico.

Para fortalecer el desempeño del modelo de clasificación respiratoria, se propone ampliar progresivamente el conjunto de datos con nuevos registros acústicos obtenidos en condiciones controladas y con una distribución más equilibrada entre las clases asma, bronquial y saludable. La incorporación de más muestras respiratorias reales por grupo de edad, condición acústica y nivel de ruido permitirá mejorar la capacidad del modelo para reconocer patrones diversos y ayudar a reducir posibles sesgos del entrenamiento y aumentará la estabilidad de las predicciones generadas por el algoritmo Random Forest.

Implementar un sistema de alertas tempranas permitirá identificar mediciones con baja confianza, frecuencia respiratoria fuera del rango orientativo o resultados repetidos compatibles con alteración respiratoria, estas alertas podrán clasificarse por nivel de

prioridad y mostrarse en el dashboard médico, sin emitir diagnósticos clínicos, sino como apoyo para la revisión profesional. Los reportes PDF podrán enriquecerse con gráficas comparativas, observaciones automáticas y recomendaciones de repetición de captura cuando la señal presente baja calidad o movimiento elevado.

REFERENCIAS

- [1] J. O. Sarfo, M. Amoadu, P. Y. Kordorwu, A. K. Adams, T. B. Gyan, A. G. Osman, I. Kyei y E. W. Ansah, «Acute lower respiratory infections among children under five in sub-Saharan Africa: a scoping review,» *BMC Pediatrics*, vol. 23, nº 1, p. 285, 2023.
- [2] C. C. R. Laura Francisco González, «Infecciones respiratorias virales,» *Protoc diagn ter pediatri*, vol. 2, nº 139-149, 2023.
- [3] A. L. d. T. (ALAT), «Día Mundial del Asma 2025,» ALAT, 2025. [En línea]. Available: <https://alatorax.org/es/firs/dia-mundial-del-asma-2025>. [Último acceso: 9 Septiembre 2025].
- [4] B. F. Asher, «Bronchitis: Overview, Symptoms, Causes, and Treatment,» Verywell Health, 25 Agosto 2025. [En línea]. Available: <https://www.verywellhealth.com/bronchitis-facts-6499436>. [Último acceso: 9 septiembre 2025].
- [5] P. Kapetanidis, F. Kalioras, C. Tsakonas, P. Tzamalís, G. Kontogiannis, T. Karamanidou, T. G. Stavropoulos y S. Nikolettseas, «Respiratory Diseases Diagnosis Using Audio Analysis and Artificial Intelligence: A Systematic Review,» *Sensors*, vol. 24, nº 4, p. 1173, 2024.
- [6] S. E. B. G. D. A. C. M. P. M. P. Manish Suneja, «Retrasos en el diagnóstico de enfermedades infecciosas,» *Diagnóstico (Berlin)*, vol. 9, nº 3, pp. 332-339, 2022.
- [7] S. E. B. G. D. A. C. M. P. M. P. Manish Suneja, «Effect of diagnosis delay on pulmonary function in children with asthma,» *Allergy, Asthma & Clinical Immunology*, vol. 18, p. 92, 2022.
- [8] X. Xu y R. Sankar, «Classification and Recognition of Lung Sounds Using Artificial Intelligence and Machine Learning: A Literature Review,» *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 8, nº 10, p. 127, 2024.

- [9] A. W. D. y. F. G. H. B. Maricela Morales Hernández, «Propuesta de Aplicación del IoT para Monitoreo de Niños de Primaria Basado en un Sistema Ciber-Físico,» *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, nº 6, pp. 3069-3088, 2023.
- [10] F. Bertrand Z., D. Segall K., I. Sánchez D. y P. Bertrand N., «La auscultación pulmonar en el siglo 21,» *Andes Pediátrica*, vol. 91, nº 4, pp. 500-506, 2020.
- [11] W. Ariyanti, K.-C. Liu, K.-Y. Chen y Y. Tsao, «Abnormal Respiratory Sound Identification Using Audio-Spectrogram Vision Transformer,» 2024.
- [12] D. S. K. I. S. D. P. B. N. Francisca Bertrand Z., «La auscultación pulmonar en el siglo 21,» *Rev Chil Pediatr*, vol. 91, nº 4, pp. 500-506, 2020.
- [13] N. L. Novak, . N. M. Askelson, L. Diers, B. Dunn, H. Haines, R. Afifi y E. A. Parker, «Health Equity in Midsize Rural Communities: Challenges and Opportunities in a Changing Rural America,» *Am. J. Public Health*, vol. 110, pp. 1342-1343, 2020.
- [14] Secretaría Nacional de Planificación, «Plan Nacional de Desarrollo 2025–2029: Ecuador no se detiene,» 2025.
- [15] G. P. Guevara Alban, A. E. Verdesoto Arguello y N. E. Castro Molina, «Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción),» *RECIMUNDO*, vol. 4, nº 3, pp. 163-173, 2020.
- [16] J. J. Castro Maldonado, L. K. Gómez Macho y E. Camargo Casallas, «La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI,» *Tecnura*, vol. 27, nº 75, pp. 140-174, 2023.
- [17] J. L. Arias Gonzáles y M. Covinos Gallardo, *Diseño y metodología de la investigación*, Arequipa: Enfoques Consulting EIRL, 2021.

- [18] M. Á. Medina Romero, C. R. Rojas León, W. Bustamante Hoces, R. M. Loaiza Carrasco, C. P. Martel Carranza y R. Y. Castillo Acobo, *Metodología de la investigación: Técnicas e instrumentos de investigación*, Puno: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C., 2023.
- [19] Universidad de Guanajuato, «Tipos, alcances y diseños de investigación,» División de Derecho, Política y Gobierno, Octubre 2022. [En línea]. Available: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf. [Último acceso: 6 Octubre 2025].
- [20] Scikit-learn developers, «Metrics and scoring: quantifying the quality of predictions,» 2026. [En línea]. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/model_evaluation.html. [Último acceso: noviembre 2025].
- [21] Scikit-learn developers, «Cross-validation: evaluating estimator performance,» 2026. [En línea]. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html. [Último acceso: noviembre 2025].
- [22] OBS Business School, «Características y fases del modelo incremental,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.obsbusiness.school/blog/caracteristicas-y-fases-del-modelo-incremental>. [Último acceso: 15 septiembre 2025].
- [23] X. Xu y R. Sankar, «Classification and Recognition of Lung Sounds Using Artificial Intelligence and Machine Learning: A Literature Review,» *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 8, n° 10, p. 127, 2024.
- [24] F. Bertrand Z., D. Segall K., I. Sánchez D. y P. Bertrand N., «La auscultación pulmonar en el siglo 21,» *Andes Pediátrica*, vol. 91, n° 4, pp. 500-506, 2020.
- [25] Global Initiative for Asthma, «Global Strategy for Asthma Management and Prevention,» Global Initiative for Asthma, Fontana, Wisconsin, 2025.

- [26] M. P. Smith, M. Lown, S. Singh, B. Ireland, A. T. Hill, J. A. Linder y R. S. Irwin, «Acute Cough Due to Acute Bronchitis in Immunocompetent Adult Outpatients: CHEST Expert Panel Report,» *CHEST*, vol. 157, n° 5, pp. 1256-1265, 2020.
- [27] S. B. R.-V. Renard Xaviero Adhi Pramono, «Análisis automático de sonidos respiratorios adventicios: una revisión sistemática,» *Plos One*, vol. 12, n° 5, 2017.
- [28] Y. Kim, Y. Hyon, S. S. Jung, S. Lee, G. Yoo, C. Chung y T. Ha, «Respiratory sound classification for crackles, wheezes, and rhonchi in the clinical field using deep learning,» *Scientific Reports*, vol. 1, n° 11, p. 17186, 2021.
- [29] U. Zölzer, Digital Audio Signal Processing, 3 ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2022.
- [30] P. Kapetanidis, F. Kalioras, C. Tsakonas, P. Tzamalís, G. Kontogiannis, T. Karamanidou, T. G. Stavropoulos y S. Nikolettseas, «Respiratory Diseases Diagnosis Using Audio Analysis and Artificial Intelligence: A Systematic Review,» *Sensors*, vol. 24, n° 4, p. 1173, 2024.
- [31] Elsevier, «Applied Acoustics,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/journal/applied-acoustics>. [Último acceso: Junio 2026].
- [32] Scikit-learn developers, «Metrics and scoring: quantifying the quality of predictions,» 2026. [En línea]. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/model_evaluation.html. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [33] C. Constantinescu y R. Brad, «An Overview on Sound Features in Time and Frequency Domain,» *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*, vol. 13, n° 1, pp. 45-58, 2023.
- [34] D. Jurafsky y J. H. Martin, Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Computational Linguistics, and Speech Recognition with Language Models, 3 ed., 2026.

- [35] I. The MathWorks, «Audio Toolbox Documentation,» 2026. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/audio/>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [36] Librosa development team, «librosa documentation,» 2025. [En línea]. Available: <https://librosa.org/doc/latest/>. [Último acceso: Diciembre 2026].
- [37] IEEE Spectrum, «FFT: The 60-Year-Old Algorithm Underlying Today's Tech,» Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025. [En línea]. Available: <https://spectrum.ieee.org/fft-algorithm-ieee-milestone>.
- [38] U. Zölzer, Digital Audio Signal Processing, 3 ed., John Wiley & Sons, 2022.
- [39] Y. Choi y H. Lee, «Interpretation of lung disease classification with light attention connected module,» *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 84, p. 104695, 2023.
- [40] Y. Yan, S. O. Simons, L. van Bommel, L. G. Reinders, F. M. E. Franssen y V. Urovi, «Optimizing MFCC Parameters for the Automatic Detection of Respiratory Diseases,» *Applied Acoustics*, vol. 228, p. 110299, 2025.
- [41] R. Kenge, «Aprendizaje automático, sus limitaciones y soluciones en TI,» *Revistasindias*, vol. 12, n° 2, pp. 73-83, 2020.
- [42] R. B. Constantin Constantinescu, «An Overview on Sound Features in Time and Frequency Domain,» *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*, vol. 13, n° 1, pp. 45-48, 2023.
- [43] K. R. H. T. A. A. S. A. A. M. I. Abderahman Rejeb, «El Internet de las Cosas (IoT) en la atención médica: balance y perspectivas de futuro,» *Internet of Things*, vol. 22, n° 100721, p. 1, 2023.
- [44] P. N. B.-R. R. Sattar Farook, Acoustic Sensors and Their Applications, Basel: MDPI, 2023.

- [45] J. D. S. B. D. A. Fonseca Yupa, «Diseño e implementación de control domótico (con sistemas embebidos) para conectarse con aplicaciones adaptivas basados en IoT,» Ecuador, 2020.
- [46] Á. Benito Herranz, «Desarrollo de aplicaciones para IoT con el módulo ESP32,» 2019.
- [47] E. J. Huang, K. Yan y J.-P. Onnela, «Combining Accelerometer and Gyroscope Data in Smartphone-Based Activity Recognition using Wavelets,» arXiv, 2022.
- [48] Y. Torabi, S. Shirani, J. P. Reilly y G. M. Macrae, «MEMS and ECM Sensor Technologies for Cardiorespiratory Sound Monitoring—A Comprehensive Review,» arXiv, 2024.
- [49] C. Asaad, K. Baïna y M. Ghogho, «NoSQL Databases: Yearning for Disambiguation,» 2020.
- [50] S. Scherzinger y S. Sidortschuck, «An Empirical Study on the Design and Evolution of NoSQL Database Schemas,» 2020.
- [51] M. Inc., «MongoDB Atlas Documentation,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.mongodb.com/docs/atlas/>.
- [52] A. Ehsan, M. A. M. E. Abuhaliqa, C. Catal y D. Mishra, «RESTful API Testing Methodologies: Rationale, Challenges, and Solution Directions,» *Applied Sciences*, vol. 12, nº 9, p. 4369, 2022.
- [53] J. M. G. Z. J. Á. J. M. H. C. J. N. G. V. Teresita de Jesús Fuentes Lara, «PWA: Arquitectura de Aplicaciones Web Progresivas,» *INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO REVISTA DIGITAL*, vol. 15, nº 3, pp. 1030-1037, 2023.
- [54] D. A. E. P. d. S. E. D. J. C. Jaramillo Chamba, «Estudio comprensivo de la Transformada de Fourier Discreta para el análisis de señales digitales,» *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 9, nº 1, pp. 75-84, 2022.

- [55] C. Constantinescu y R. Brad, «An Overview on Sound Features in Time and Frequency Domain,» *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*, vol. 13, n° 1, pp. 25-58, 2023.
- [56] H. Jeon, Y. Jung, S. Lee y Y. Jung, «Area-Efficient Short-Time Fourier Transform Processor for Time–Frequency Analysis of Non-Stationary Signals,» *Applied Sciences*, vol. 10, n° 20, p. 7208, 2020.
- [57] L. C. J. E. P. d. S. E. U. |. L. L. -. E. Daniel Jaramillo Chamba, «Estudio comprensivo de la Transformada de Fourier Discreta para el análisis de señales digitales,» *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, vol. 1, pp. 75-84, 2022.
- [58] Y. Yan, S. O. Simons, L. van Bemmelen, L. Reinders, F. M. E. Franssen y V. Urovi, «The Fourier Transform (What you need to know),» *Optimizing MFCC parameters for the automatic detection of respiratory diseases*, vol. 228, p. 110299, 2025.
- [59] S. K. V., D. Koppad, P. Kumar, N. A. Kantikar y S. Ramesh, «Multi-Task Learning for Lung Sound & Lung Disease Classification,» 2024.
- [60] R. S. Xiaoran Xu, «Classification and Recognition of Lung Sounds Using Artificial Intelligence and Machine Learning: A Literature Review,» *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 8, n° 10, p. 127, 2024.
- [61] A. N. d. Ecuador, «Ley Orgánica de Protección de Datos Personales,» Registro Oficial del Ecuador, Quito, 2021.
- [62] scikit-learn developers, «sklearn.metrics.classification_report,» 2025. [En línea]. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.classification_report.html. [Último acceso: Junio 2026].
- [63] scikit-learn developers, «sklearn.metrics.confusion_matrix,» 2025. [En línea]. Available: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.confusion_matrix.html.

learn.org/stable/modules/generated/sklearn.metrics.confusion_matrix.html.
[Último acceso: Junio 2026].

- [64] A. Monaco, N. Amoroso, L. Bellantuono, E. Pantaleo, S. Tangaro y R. Bellotti, «Multi-Time-Scale Features for Accurate Respiratory Sound Classification,» *Applied Sciences*, vol. 10, nº 23, p. 8606, 2020.
- [65] Y. Kim, Y. Hyon, S. S. Jung, S. Lee, G. Yoo, C. Chung y T. Ha, «Respiratory sound classification for crackles, wheezes, and rhonchi in the clinical field using deep learning,» *Scientific Reports*, vol. 11, nº 1, p. 17186, 2021.
- [66] G. Petmezas, G.-A. Cheimariotis, L. Stefanopoulos, B. Rocha, R. P. Paiva, A. K. Katsaggelos y N. Maglaveras, «Automated Lung Sound Classification Using a Hybrid CNN-LSTM Network and Focal Loss Function,» *Sensors*, vol. 22, nº 3, p. 1232, 2022.
- [67] H. Gulzar, J. Li, A. Manzoor, S. Rehmat, U. Amjad y H. J. Khan, «Transfer Learning Based Diagnosis and Analysis of Lung Sound Aberrations,» 15 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://arxiv.org/abs/2303.08362>. [Último acceso: Junio 2026].
- [68] S. B. Shuvo, S. N. Ali, S. I. Swapnil, T. Hasan y M. I. H. Bhuiyan, «A Lightweight CNN Model for Detecting Respiratory Diseases from Lung Auscultation Sounds using EMD-CWT-based Hybrid Scalogram,» 8 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://arxiv.org/abs/2009.04402>. [Último acceso: Junio 2026].

ANEXOS

Anexo1. Protocolo de pruebas respiratorias

Propósito: establecer una guía estandarizada para la ejecución de las pruebas técnicas del prototipo IoT respiratorio, considerando la preparación del entorno, verificación del dispositivo, selección del paciente, captura del audio respiratorio, procesamiento automático y registro de resultados en la aplicación web progresiva.

Información general de la prueba

Campo	Detalle
Código de prueba	RIOT-2026-001
Lugar	Fundación AVSI Ecuador, Santa Elena
Responsable técnico	Samantha Morales
Sistema evaluado	Prototipo IoT respiratorio + PWA + servidor ML
Duración de medición	1 minuto por participante, segmentado en fragmentos de 6 segundos para cálculo de RPM
Zona de captura	Región dorsal, para captar con mayor claridad sonidos asociados al campo pulmonar

Tabla 30: Información general de la prueba

FASE 1: Preparación del entorno y consentimiento

N.º	Actividad	Estado
1	Verificar que el representante legal haya firmado el consentimiento informado.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
2	Asignar código al participante, por ejemplo P01, P02 o P03.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
3	Confirmar que las fotografías o evidencias se registren de forma anonimizada.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
4	Preparar espacio con bajo ruido ambiental y supervisión de un adulto responsable.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

Tabla 31: Preparación del entorno y consentimiento.

FASE 2: Configuración del dispositivo IoT

N.º	Actividad	Estado
1	Conectar el ESP32, micrófono INMP441, MPU6050 y pantalla LCD I2C.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
2	Verificar conexión WiFi y comunicación con el backend.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

3	Confirmar lectura del micrófono mediante interfaz I2S.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
4	Comprobar que el sistema no reporte error de conexión o envío.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

Tabla 32: Configuración del dispositivo IoT.

FASE 3: Registro del paciente en la PWA

N.º	Actividad	Estado
1	Seleccionar o registrar al paciente desde el perfil médico.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
2	Activar el paciente antes de iniciar la medición.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
3	Registrar edad, peso, estatura y antecedentes disponibles.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
4	Verificar que el paciente activo coincida con el participante evaluado.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

Tabla 33: Registro del paciente en la PWA.

FASE 4: Captura respiratoria

N.º	Actividad	Estado
1	Ubicar el sensor acústico en la espalda del paciente, sobre la región dorsal.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
2	Solicitar respiración natural y mantener estabilidad durante la medición.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
3	Capturar audio durante 1 minuto, organizado en fragmentos de 6 segundos.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

4	Registrar posibles movimientos o ruido ambiental durante la captura.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
---	--	--

Tabla 34: Captura respiratoria.

FASE 5: Procesamiento y clasificación

N.º	Actividad	Estado
1	Enviar el archivo respiratorio al backend mediante HTTP POST.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
2	Procesar el audio en el servidor ML mediante características bioacústicas.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
3	Generar clase respiratoria, nivel de confianza, waveform y espectrograma.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
4	Guardar el resultado en MongoDB Atlas y visualizarlo en la PWA.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

Tabla 35: Procesamiento y clasificación.

FASE 6: Criterios de aceptación

N.º	Actividad	Estado
1	La medición se considera válida si el audio se recibe, se procesa y genera resultado.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
2	La captura se repite si existe movimiento excesivo, ruido alto o ausencia de audio útil.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
3	El resultado debe quedar asociado al paciente activo.	X ☐ Cumple ☐ No cumple

4	El reporte PDF debe generarse cuando existan mediciones disponibles.	X ☐ Cumple ☐ No cumple
---	--	--

Tabla 36: Criterios de aceptación.

Anexo2. Registro automático del sistema IoT

Propósito: documentar la estructura real de almacenamiento generada por el sistema en MongoDB Atlas.

Colección	Documento real observado	Campos principales registrados	Evidencia técnica
dispositivos	Prototipo respiratorio principal	codigo, activo, configuracion, sensores, pacienteActual, ultimaCaptura, ultimaConexion	Permite verificar estado del ESP32, sensores conectados y configuración de captura.
mediciones	Captura respiratoria individual	paciente, frecuencia_respiratoria, ruido, resultado, features, acelerometro, audio_filename, waveform_url, spectrogram_url, fechas	Permite comprobar que el audio fue recibido, procesado y vinculado al paciente.
pacientes	Registro pediátrico anonimizado	nombres, apellidos, fechaNacimiento, sexo, peso, estatura, antecedentesRespiratorios, responsable, medico	Permite asociar mediciones respiratorias al historial del niño.
reportes	Reporte histórico y tiempo real	paciente, generadoPor, tipoReporte, rangoFechas,	Permite respaldar los resultados

		resumen, nombreArchivo, origen, fechaGeneracion	generados por la PWA.
usuarios	Cuenta familiar, médico o administrador	nombre, email, rol, telefono, parentesco, pacientes, activo, authProvider, ultimoAcceso	Permite controlar acceso por roles y relación con pacientes.

Tabla 37: Resumen de colecciones verificadas en MongoDB Atlas.

Anexo 3. Matriz de mediciones respiratorias

Propósito: consolidar las mediciones realizadas con el prototipo durante las pruebas reales, los códigos P01, P02 y P03 reemplazan los datos identificatorios de los menores, de acuerdo con el criterio de anonimización usado en el proyecto.

Código	Edad	Duración	Fragmentos	Ubicación sensor	Resultado	Confianza	Observación técnica
P01	4 años	1 min	10 fragmentos de 6 s	Región dorsal	healthy	0.83	Captura válida con paciente en reposo.
P02	5 años	1 min	10 fragmentos de 6 s	Región dorsal	healthy/ asthma según fragmento	0.77	Revisar ruido y estabilidad del sensor.
P03	4 años	1 min	10 fragmentos de 6 s	Región dorsal	Asthma	0.88	Revisar y seguir realizando mediciones
P04	3 años	1min	10 fragmentos de 6 s	Región dorsal	Bronquitis	0,76	Realizar más mediciones

P05	3 años	1 min	10 fragmentos de 6 s	Región dorsal	healthy	0.78	Captura aceptada para historial.
-----	--------	-------	----------------------	---------------	---------	------	----------------------------------

Tabla 38: Matriz resumida de mediciones respiratorias.

Anexo 4. Cuestionario de percepción del sistema

Propósito: instrumento dirigido a representantes, personal de apoyo o usuarios autorizados que visualizaron el funcionamiento del prototipo, con el fin de valorar la facilidad de uso, claridad de la información presentada y utilidad percibida del sistema IoT respiratorio.

Realizado por	Nombre del reporte	Fecha				
Samantha Vanessa Morales Vera	Encuesta de usabilidad y utilidad del sistema IoT respiratorio	____ / ____ / ____				
Instrucciones: marque con una X la opción que represente su opinión. La escala utilizada es de 1 a 5, donde 1 equivale a “totalmente en desacuerdo” y 5 equivale a “totalmente de acuerdo”.						
Sección	Pregunta	1	2	3	4	5
Facilidad de uso	El sistema es fácil de utilizar durante la medición respiratoria.	☐	☐	☐	☐	☐
Facilidad de uso	La navegación dentro de la aplicación web es clara e intuitiva.	☐	☐	☐	☐	☐
Comprensión	La información presentada por el	☐	☐	☐	☐	☐

	sistema es clara y comprensible.					
Comprensión	Los indicadores visuales ayudan a interpretar el estado respiratorio.	☐	☐	☐	☐	☐
Utilidad	El sistema puede apoyar el seguimiento respiratorio infantil.	☐	☐	☐	☐	☐
Utilidad	Los reportes generados pueden servir como respaldo para seguimiento.	☐	☐	☐	☐	☐

Tabla 39: Cuestionario de percepción del sistema IoT.

Anexo 5. Formato de consentimiento informado

Propósito: documento dirigido al representante legal del menor para autorizar la participación en la prueba del prototipo IoT respiratorio este formato corresponde a una autorización académica entre la responsable del proyecto y el representante, por lo que no involucra directamente a la Universidad como entidad solicitante de datos personales.

Yo, _____, con cédula de ciudadanía No. _____, en calidad de representante legal del menor _____, autorizo la realización de una prueba respiratoria con el prototipo IoT desarrollado por Samantha Morales, con fines académicos y de validación técnica del sistema.

Se me ha informado que la prueba consiste en colocar el sensor acústico en la región dorsal del menor para captar sonidos respiratorios mientras permanece en reposo y respirando de forma natural. La medición tiene una duración aproximada de un minuto y se organiza en fragmentos técnicos de seis segundos para permitir el cálculo y análisis de la frecuencia respiratoria dentro del sistema.

Autorización	Marcar
Acepto la realización de la medición respiratoria con el prototipo IoT.	☐ Sí ☐ No
Acepto el uso académico de los resultados generados por el sistema.	☐ Sí ☐ No
Acepto el uso de fotografías anonimizadas como evidencia del proceso.	☐ Sí ☐ No
Acepto que los datos sean tratados sin identificación personal del menor.	☐ Sí ☐ No

Tabla 40: Autorización de representante para pruebas.