



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

ESTRATEGIA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO EN SALUD EN UN SISTEMA DE ALERTAS POR CONTAMINACIÓN DE AIRE

Stefanía Franco Londoño

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Bioingeniería
Medellín, Colombia
2021



Estrategia para la caracterización del riesgo en salud en un sistema de alertas por
contaminación de aire

Stefania Franco Londoño

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Bioingeniero

Asesores (a):

Danny Alexandro Múnera Ramírez, Ingeniero electrónico

Línea de Investigación:

Internet de las Cosas

Grupo de Investigación:

IN2LAB

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Bioingeniería

Medellín, Colombia

2021

A mi familia, asesor y amigos

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Contaminación aérea	4
2.1.1. Principales contaminantes	5
2.1.2. Implicaciones en la salud	8
2.1.3 Contaminación y ejercicio físico	9
2.2. Contaminación en el Valle de Aburrá	10
2.3. Sistema experto difuso	11
2.3.1. Definición	11
2.3.2. Funciones de pertenencia	12
2.3.3. De-Fusificación	13
3. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA	15
3.1. Análisis de la literatura	15
3.2. Sistema experto difuso	18
3.2. Diseño de cuestionario para registro	22
4. APLICACIÓN WEB	26
4.1. Diseño de la aplicación web	26
4.1.1. Historias de usuario	26
4.1.2. Arquitectura de la aplicación	27
4.1.3. Frontend	29
4.1.4. Backend	35
4.1.5. Base de datos	35
5. RESULTADOS	37
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
6. REFERENCIAS	44
ANEXOS	44

LISTA DE TABLAS

2-1	Principales contaminantes del aire	5
3-1	Relación de contaminantes aéreos con enfermedades y consecuencias en la salud humana	16
3-2	Comparación en las concentraciones de contaminantes permitidos según POECA y la OMS	17
3-3	Valores típicos para ventilación pulmonar durante descanso y ejercicio moderado e intenso	18
3-4	Ventilación pulmonar de acuerdo a tiempo e intensidad de actividad física ...	20
3-5	Nivel de alerta de acuerdo a ventilación pulmonar y riesgo cardíaco con PM en alto	22
3-6	Cuestionario para registro de usuario	23
4-1	Historias de uso para construcción de la aplicación	26
4-2	Niveles de riesgo	34
5-1	Datos ingresados en registro de tres usuarios	37
5-2	Simulación de niveles de riesgo	41

LISTA DE FIGURAS

2-1	Funciones de pertenencia	13
2-2	Centro de gravedad en sistema experto difuso	14
3-1	Puntos de monitoreo de calidad de aire en el Valle de Aburrá	16
3-2	Sistema experto difuso diseñado	19
3-3	Funciones de pertenencia para primer sistema experto difuso	20
3-4	Superficie de control del primer sistema experto difuso	20
3-5	Funciones de pertenencia para el segundo sistema experto difuso	21
4-1	Arquitectura de la aplicación	28
4-2	Partes del frontend de la aplicación	30
4-3	Secciones del formulario de registro	31
4-4	Continuación de las secciones del formulario de registro	32
4-5	Ubicación del usuario	33
4-6	Modals para obtener datos necesarios en el cálculo del nivel de riesgo	34
4-7	Flujo de trabajo para componente de notificaciones	35
4-8	Base de datos diseñada en MariaDB	36

RESUMEN

La mayoría de estudios o proyectos enfocados en dar a conocer la calidad del aire en la ciudad de Medellín son genéricos y no se encuentran adaptados a las condiciones particulares de los ciudadanos como su rango de edad, el tipo de actividad física que suele realizar o sus comorbilidades. Con base en esto, se planteó el desarrollo de una estrategia de caracterización del estado de salud de una persona para un sistema de alertas geolocalizadas y personalizadas sustentado en la contaminación del aire con el fin de promover medidas de autocuidado en los usuarios. Se identificaron las fuentes que informan la calidad de aire en la ciudad de Medellín y los principales datos personales necesarios para calcular el nivel de riesgo de una persona cuando practica una actividad física en un ambiente que puede estar contaminado. Un sistema experto difuso fue diseñado para realizar los cálculos y fue validado con diferentes casos de uso. La información se concentró en una aplicación con la cual el usuario puede interactuar, ingresando sus datos personales y consultando su nivel de riesgo. Se pudo concluir que el sistema final cumple con los objetivos planteados. Al definir las condiciones de trabajo, se limitó la funcionalidad del sistema, por lo que se plantea como trabajo futuro adicionar nuevas funcionalidades.

Palabras clave: Contaminación aérea, Riesgo cardíaco, Riesgo respiratorio, Sistema experto difuso, Nivel de riesgo, Ventilación pulmonar.

ABSTRACT

Most of the studies or projects focused on showing air quality in the city of Medellín are generic and are not adapted to the particular conditions of citizens such as their age, the type of physical activity they usually perform or their comorbidities. Based on this, the development of a strategy to characterize the health status of a person was proposed for a system of georeferenced and personalized alerts based on air pollution in order to promote self-care measures in users. We identified the sources that report the air quality in the city of Medellín and the personal data necessary to calculate the level of risk of a person when practicing physical activity in an environment that may be polluted. We design a fuzzy expert system to perform the calculations and we validated it with different use cases. We developed a web application where the user can enter their personal data and check their risk level. We conclude that the final system achieves the aims set. When the working conditions were defined, the functionality of the system was limited, as future works we propose to improve the results by adding new functionalities.

Keywords: Air pollution, Cardiac risk, Respiratory risk, Fuzzy expert system, Risk level, Pulmonary ventilation.

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las fuentes de contaminación del aire representan uno de los mayores riesgos ambientales para la salud humana a nivel global [30]. Las personas, al respirar cerca de 10000 litros de aire al día, reciben altas dosis de aire contaminado [26], por lo que estadísticas preocupantes de muertes derivadas por esta problemática se han observado últimamente. En 2015, por ejemplo, la contaminación aérea fue responsable de 6.4 millones de muertes a nivel mundial, 24% por enfermedad isquémica del corazón, 19% por enfermedades cardiovasculares, 21% por Accidentes cerebrovasculares (ACV) y 23% por cáncer de pulmón [21]. Varios estudios adicionalmente han concluido que el empeoramiento de los síntomas en personas asmáticas, así como la aparición de nuevos casos en esta población se debe a su exposición a largo en un ambiente contaminado [19].

Ciudades con amplio crecimiento económico, social e industrial son propensas a generar altos índices de contaminación aérea, por lo que, al ser el Valle de Aburrá una región en desarrollo continuo, con una alta urbanización, es normal que se presente picos de alta contaminación en esta zona, los cuales son más frecuentes debido a su orografía y sus condiciones meteorológicas, pues propician una estabilidad atmosférica con poca ventilación de los contaminantes, especialmente en los meses (febrero, marzo y abril) donde se da la transición de temporada seca a húmeda. Algunos episodios de alta contaminación han presentado un niveles de aire catalogados como dañinos para la salud, superando los máximos permisibles diarios según la normatividad colombiana.

Para la disminución a corto, mediano y largo plazo de esta problemática, el gobierno del Valle de Aburrá ha generado diferentes estrategias como el Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá 2017-2030 (PIGECA) [11] y el Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de contaminación Atmosférica (POECA) [20] junto con los estudios sobre protección y control de la calidad del aire

realizados por un consorcio de centros educativos y entes de control territorial, donde el mantenimiento y la administración de estos sitios está a cargo del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) [6].

A pesar de que existen estas estrategias, sistemas que informan el estado de la contaminación del aire en la región, y varios estudios que han analizado el impacto en la salud de las personas expuestas a largo y corto plazo en este ambiente, esta información es genérica y no se encuentra adaptada a las condiciones particulares de las personas como su rango de edad, el tipo de actividad física que suele realizar o sus comorbilidades, datos de importancia con los que se pueden generar diferentes tipos de riesgos a un mismo nivel de contaminación.

Por lo anterior, en este trabajo se describe el desarrollo de un sistema de alertas por contaminación de aire geolocalizadas y personalizadas en la ciudad de Medellín. El sistema desarrollado infiere el nivel de riesgo (bajo, medio o alto) de la persona, utilizando como información la calidad del aire en la zona de interés, la intensidad de la actividad física a desarrollar y el estado de salud del usuario. Adicionalmente el sistema emite recomendaciones y sugerencias con el objetivo de mitigar el daño que la contaminación puede hacer en la salud del usuario.

Para calcular el nivel de riesgo, se implementó un sistema experto difuso debido a la capacidad que tienen estos sistemas de emular la toma de decisiones de un problema que se caracteriza por ser de carácter humano, es decir, su resolución está basada en el razonamiento que una persona puede tener del problema de acuerdo a la información de entrada, dando espacio a la duda, no acostándose a una respuesta exacta. Las limitaciones del trabajo fueron la evaluación de solo los riesgos a nivel cardiovascular y respiratorio en un ambiente contaminado. A pesar de que estar expuesto a contaminación del aire genera otro tipo de complicaciones en la salud, las vías aéreas y vasos sanguíneos tienen mayor interacción con los polutantes de acuerdo a lo encontrado en la literatura. Las reglas que definen el sistema difuso sólo se implementaron con el material particulado (PM) como contaminante a pesar de que existen otras moléculas en el aire que pueden afectar la salud

como los óxidos de nitrógeno o azufre. Lo anterior se trabajó de esta forma, por un lado debido a que previos estudios han concluido que este polutante tiene mayor repercusión en la salud humana. Por otro lado, el uso de un solo contaminante para las reglas lógicas del sistema simplifica su modelación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar una estrategia de caracterización del estado de salud de una persona en un sistema de alertas de contaminación del aire para promover medidas de autocuidado en los usuarios.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las principales características de los sistemas de alertas para la contaminación del aire.
- Identificar las fuentes de datos para el análisis de la calidad del aire en Medellín.
- Diseñar una estrategia para caracterizar la afectación de la calidad del aire en la salud de una persona.
- Diseñar e implementar un sistema de alertas geolocalizadas y personalizadas para la contaminación del aire.
- Validar la funcionalidad del sistema propuesto con un caso de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se hace un resumen de los principales conceptos teóricos necesarios para la correcta comprensión de este trabajo. En primer lugar se describen los principales contaminantes aéreos, luego se incluye un texto con el análisis de esta problemática a nivel local, por último, se definen los conceptos básicos de los sistemas expertos difusos.

2.1. Contaminación aérea

La contaminación del aire es una mezcla de sustancias peligrosas para la salud humana y el ambiente (agua, agricultura, bosques y biodiversidad) [22]. Los contaminantes pueden derivar de fuentes naturales y de carácter humano [8] y pueden alcanzar concentraciones que generen consecuencias negativas no solo en el sector de la salud, sino también a nivel económico, político y en consecuencia social [23]. Emisiones de vehículos e industrias, como la producción de energía, son las principales fuentes de aire contaminado por acto humano. Por otro lado, sustancias dañinas liberadas naturalmente provienen de erupciones volcánicas, descomposición de materia orgánica o incendios forestales [8].

Los problemas de calidad del aire son el resultado del continuo crecimiento demográfico, modelo de desarrollo económico, patrones de movilidad, producción, consumo y ocupación de un territorio, así como el estado de las tecnologías y calidad ambiental, e intensidad del uso de combustibles, procesos de producción y consumo de energía y las prácticas culturales que se llevan a cabo en las ciudades. Un crecimiento demográfico demanda un mayor consumo energético y de recursos, de generación de desechos y emisiones, así como de la ocupación de suelos de forma descontrolada. Esto asociado a las características geográficas y climáticas particulares del territorio puede contribuir al aumento de los problemas de contaminación atmosférica que viven hoy importantes ciudades en el mundo [11].

2.1.1. Principales contaminantes

En las sustancias que se consideran como contaminantes del aire, se encuentran desde alergénicos como el polen hasta los derivados de gases tóxicos emitidos por las industrias [23,26]. Los contaminantes más estudiados debido a su impacto en la salud humana son el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO) y el material particulado (PM, sigla en inglés), este último dividiéndose en partículas suspendidas, humo negro, partículas con un diámetro menor a 10µm (PM₁₀) y partículas con diámetro menor a 2.5µm (PM_{2.5}). La Tabla 2-1 resume estos contaminantes con sus fuentes de producción y algunas consecuencias a nivel ambiental y en la salud humana que puede generar la exposición a este contaminante.

Tabla 2-1: Principales contaminantes del aire [7, 10, 19, 24]

	¿Qué es?	Principales fuentes	Consecuencias
PM	Mezcla de partículas de una amplia variedad de fuentes que difieren en tamaño y composición. Pueden ser sólidas, líquidas o sólidas y líquidas. El tamaño de las partículas en suspensión varía, desde unos pocos nm hasta decenas de µm. Puede contener con frecuencia varias sustancias inmunogénicas, como esporas de hongos y polen.	Antropogénicas y naturales: Incendios, chimeneas, sitios de construcción, caminos sin pavimentar, reacciones entre productos químicos gaseosos emitidos por centrales eléctricas y automóviles, calefacción industrial y residencial que utiliza petróleo, carbón o madera.	Contribuye a la formación de smog. PM ₁₀ (partículas “torácicas”) puede penetrar en el sistema respiratorio inferior, (PM _{2.5} (partículas “respirables”) penetran en la región de intercambio de gases en el pulmón y partículas ultrafinas tienen grados crecientes de penetración pulmonar. Genera exacerbación de los síntomas del asma y de enfermedades cardiovasculares.
NO ₂	Es uno de un grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno u óxidos de nitrógeno (NO _x) y se utiliza como indicador para este grupo. Compuesto de nitrógeno y oxígeno, precursor de muchos contaminantes secundarios	Llega al aire principalmente por la quema de combustible, la reacción del ozono con el óxido nítrico emitido durante la combustión, lo genera; como resultado, existen fuertes gradientes de concentración de óxidos de nitrógeno cerca de los sitios	Daño al follaje y contribución a la formación de smog. Inflamación e irritación de las vías respiratorias. Durante períodos cortos puede agravar las enfermedades respiratorias, en particular el asma, provocando síntomas respiratorios (como tos, sibilancias o dificultad para

	dañinos, incluidos el ozono y material particulado. Es altamente reactivo con otros químicos y es un fuerte agente oxidante.	de emisión de óxidos de nitrógeno (por ejemplo, carreteras) y se produce un agotamiento relativo del ozono en estos sitios. Se forma a partir de las emisiones de automóviles, camiones y autobuses, plantas de energía y equipos todoterreno.	respirar), ingresos hospitalarios y visitas a las salas de emergencia. Exposiciones más prolongadas pueden contribuir al desarrollo de asma y potencialmente aumentar la susceptibilidad a infecciones respiratorias.
SO ₂	Contaminante atmosférico gaseoso compuesto de azufre y oxígeno. Es el componente de mayor preocupación y se utiliza como indicador para el grupo más grande de óxidos de azufre gaseosos (SO _x). Varía sustancialmente en su persistencia ambiental y capacidad oxidante.	Emisiones primarias durante la producción de energía o los procesos industriales. Quema de combustible que contiene azufre, como carbón, petróleo o diesel. Refinado de petróleo y el procesamiento de metales, motores diesel incluidos los autobuses y camiones antiguos, locomotoras, barcos y equipos diésel todoterreno.	Causa principal de neblina. Contribuye a la formación de lluvia ácida, que posteriormente daña el follaje, los edificios y los monumentos. Genera dificultades para respirar, especialmente para personas con asma y enfermedades del corazón. Sibilancias y opresión en el pecho, especialmente durante el ejercicio o la actividad física. Reduce la capacidad de funcionamiento de los pulmones. Mayor riesgo de ingresos hospitalarios o visitas a la sala de emergencias, especialmente entre niños, adultos mayores y personas con asma.
O ₃	Gas compuesto por tres átomos de oxígeno, además de ser un fuerte agente oxidante que se forma en la troposfera a través de una serie compleja de reacciones que involucran la acción de la luz solar sobre dióxido de nitrógeno e hidrocarburos. Las concentraciones en los centros de las ciudades tienden a ser más bajas que en los suburbios,	Se crea cuando los contaminantes (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) emitidos por automóviles, centrales eléctricas, calderas industriales, refinerías, entre otros, reaccionan químicamente en presencia de la luz solar, implicando condiciones cálidas y presentándose picos en las temperaturas de	Interfiere con la capacidad de ciertas plantas para respirar, lo que lleva a una mayor susceptibilidad a otros factores ambientales estresantes como un clima severo. Puede desencadenar una variedad de respuestas, como dolor de pecho, tos, función pulmonar reducida, irritación e inflamación de las vías respiratorias. Las personas con mayor riesgo

	<p>principalmente como resultado de la captación de ozono por el óxido nítrico proveniente del tráfico. Se encuentra tanto en la atmósfera superior de la Tierra como a nivel del suelo. A nivel del suelo es un contaminante atmosférico nocivo.</p>	<p>verano.</p>	<p>son las que sufren de asma, los niños, los adultos mayores y las personas que realizan actividades al aire libre. Puede empeorar la bronquitis y el enfisema, lo que lleva a una mayor atención médica.</p>
CO	<p>Es un gas incoloro e inodoro que puede ser dañino cuando se inhala en grandes cantidades.</p>	<p>Se produce en la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono, como gasolina, gas natural, petróleo, carbón y madera. Emisiones de automóviles, incendios, procesos industriales.</p>	<p>Contribuye a la formación de smog. Exacerba los síntomas de una enfermedad cardíaca, como el dolor de pecho; puede causar problemas de visión y reducir las capacidades físicas y mentales en personas sanas. Personas con problemas cardíacos ya tienen una capacidad reducida para llevar sangre oxigenada a sus corazones en situaciones en las que el corazón necesita más oxígeno de lo habitual por lo que son especialmente vulnerables a los efectos del CO cuando hacen ejercicio o están sometidos a un mayor estrés. Respirar altas concentraciones de CO típicas de un ambiente contaminado conduce a una reducción del transporte de oxígeno (O₂), pues cuando se inhala CO, este atraviesa rápidamente el epitelio alveolar para llegar a la sangre, donde se une a la hemoglobina para formar carboxihemoglobina (COHb) y al tener una afinidad por la hemoglobina más de 200 veces mayor que el O₂, la presencia de CO en el pulmón</p>

			desplazará al O ₂ de la hemoglobina. Con esto, no se podrá alcanzar el 100% de saturación de O ₂ y los efectos en esta situación sobre la salud incluyen dolores de cabeza, mayor riesgo de dolor en el pecho (angina) para personas con enfermedades cardíacas y alteración del tiempo de reacción.
--	--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.1.2. Implicaciones en la salud

Como se observa en la Tabla **2-1**, la contaminación aérea tiene un alto impacto en la salud humana. Varios estudios han concluido cómo afecta en diferentes patologías estar expuesto a un ambiente contaminado.

- Zhang et. al. [31] explica que una exposición a largo plazo impide un buen desempeño cognitivo en pruebas de tipo verbal y racional. Esto puede generar en adultos mayores factores de riesgo en enfermedades neurológicas como el Alzheimer u otro tipo de carácter demencial. Se concluye además que el aire contaminado afecta la toma de decisiones y el comportamiento, como también que estar expuesto en estas condiciones puede disminuir la producción laboral.
- Newby et. al. [24] menciona que el aire contaminado puede ser un estímulo importante para el desarrollo o el empeoramiento de enfermedades respiratorias como el asma, EPOC o el cáncer de pulmón. Adicionalmente la exposición a este aire aumenta el riesgo de sufrir una enfermedad coronaria, aterosclerosis, isquemia o fallo cardíaco, como también hipertensión y arritmias. Algunos contaminantes (O₃) al poder generar estrés oxidativo pueden desencadenar inflamación crónica en los pulmones. Una trombosis y disfunción vascular sistémica son otras consecuencias que se pueden generar en un ambiente contaminado.

- Guarnieri et. al. [19] basándose en estudios previos tanto epidemiológicos como experimentales discuten los efectos del PM, algunos contaminantes gaseosos (O_3 , NO_2 y SO_2) y la contaminación del aire relacionada con el tráfico mixto. Concluyen que estos contaminantes aumentan el riesgo de exacerbaciones de los síntomas del asma como la aparición de nuevos casos tanto en niños como en adultos y es probable que estén involucrados tanto en el estrés oxidativo como en la desregulación inmunológica.
- La Agencia Internacional de Investigación en Cáncer [26] hizo una revisión científica de la relación que puede existir entre el cáncer y la contaminación aérea. Mencionan que se han hecho por ejemplo estimaciones del [3-5]% para la fracción de casos de cáncer de pulmón atribuibles a la contaminación del aire ambiental. Plantean que dentro de las sustancias contaminantes pueden encontrarse algunas carcinógenas, que a largo plazo aumentan el riesgo de desarrollar cáncer.

2.1.3 Contaminación y ejercicio físico

La mayoría de las actividades deportivas, recreativas y ocupacionales requieren una liberación de energía moderadamente intensa pero sostenida. Dos factores limitan la capacidad de una persona para mantener un alto nivel de intensidad de ejercicio sin fatiga excesiva: la capacidad de suministro de oxígeno y la capacidad de las células musculares para generar ATP aeróbicamente. Para cumplir con el primer factor es fundamental un sistema de ventilación extraordinariamente eficaz que satisfaga las necesidades de intercambio de gases del cuerpo, así como un ambiente propicio para obtener la cantidad de oxígeno necesario [5,13].

El término “ventilación pulmonar” describe cómo el aire ambiental entra y se intercambia con el aire en los pulmones. Este término es importante para comprender la cantidad de aire que entra al cuerpo y depende de: volumen de aire movido por respiración (volumen corriente) y velocidad del movimiento del aire (frecuencia ventilatoria) [27].

En un ambiente contaminado el incremento en la ventilación pulmonar puede aumentar la dosis de contaminantes inhalados, lo que puede llevar a desarrollar alguna de las consecuencias negativas en la salud previamente mencionadas. Con base en esto, varios artículos han mencionado la posibilidad de que los beneficios que tiene practicar un ejercicio físico sean menores, de realizarlos con altos niveles de contaminación [18].

2.2. Contaminación en el Valle de Aburrá

Las condiciones geográficas y climáticas afectan la dispersión de los gases y partículas generadas por la industria, el transporte y las residencias, lo que determina en última instancia las condiciones atmosféricas de una ciudad o región. La temperatura ambiental, la humedad y la pluviosidad, la velocidad y la dirección del viento, la estabilidad atmosférica, las altas y las bajas presiones, sumado a la topografía, condicionan la concentración final de los contaminantes atmosféricos [11].

En el caso de territorios como el Valle de Aburrá, al encontrarse ubicado dentro de zonas rodeadas por montañas y cuencas hidrográficas que actúan como sistemas orográficos encerrados, puede generar una mayor retención de contaminantes, dificultando la circulación y ventilación del aire, y dirigiéndolo especialmente a lo largo de corredores correspondientes a ejes fluviales. Sus fenómenos meteorológicos además pueden interactuar de manera conjunta para agravar los problemas. Esta zona presenta otro aspecto en contra de un ambiente libre de contaminación y es que su acelerado proceso de crecimiento espacial, el cual hace uso de suelos naturales y agrícolas para construir superficies de cemento o suelos duros, deriva en la conformación de islas de calor, reducción de la humedad atmosférica y de la ventilación, que eventualmente genera elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos. Lo anterior sumado a los fenómenos de inversión térmica, en la que una capa de aire frío se ubica debajo de una capa de aire caliente, haciendo que los contaminantes no se dispersen, se mantengan y se acumulen cerca del suelo, permite que las condiciones duren, causando un problema localizado de contaminación del aire [3,9].

2.3. Sistema experto difuso

2.3.1. Definición

Es un método que asemeja el razonamiento humano. La principal inspiración detrás de él fue la necesidad de modelar fenómenos del mundo real, que son inherentemente vagos y ambiguos. Su enfoque imita la toma de decisiones de los humanos que involucra todas las posibilidades intermedias entre los valores exactos de SÍ y NO. Un bloque lógico convencional que una computadora puede entender toma como entrada un valor preciso y produce una salida definida como VERDADERO o FALSO, que es equivalente al SÍ o NO humano, pero a diferencia de las computadoras, la toma de decisiones humana incluye un rango de posibilidades entre ese SÍ y NO, como un Ciertamente Si, Posiblemente Si, No se sabe, Posiblemente No o Ciertamente No [1].

La lógica difusa trabaja en esos niveles de posibilidades de entrada para lograr la salida definida, producen una salida aceptable pero definida en respuesta a una entrada incompleta, ambigua, distorsionada o inexacta (difusa) [15].

El sistema se define por cuatro partes:

- **Módulo de fusificación:** transforma las entradas del sistema, que son números nítidos, en conjuntos difusos, es decir, asigna el conjunto difuso apropiado a una entrada no difusa.
- **Reglas condicionales difusas:** almacena reglas con estructura de “Si...Entonces...” proporcionadas por expertos.
- **Motor de inferencia:** simula el proceso de razonamiento humano. Los valores de las variables de entrada se mapean en valores lingüísticos de la variable de salida mediante el método apropiado de razonamiento aproximado, utilizando las reglas previamente establecidas.

- **Módulo de de-fusificador:** transforma el conjunto difuso obtenido por el motor de inferencia en un valor nítido, en caso de que los datos numéricos pueden ser necesarios como salida del sistema difuso.

2.3.2. Funciones de pertenencia

Permiten cuantificar términos lingüísticos y representar gráficamente un conjunto difuso. Hacen parte del módulo de fusificación. Una función de pertenencia para un conjunto difuso A se define como $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$, donde para cada elemento de X se asigna un valor entre 0 y 1. Este valor se conoce como valor de membresía o grado de membresía. Con lo anterior, se cuantifica entonces el grado de pertenencia de un elemento de X al conjunto difuso A.

Puede haber múltiples funciones de pertenencia aplicables para fusificar un valor numérico. Las funciones de membresía simples se prefieren ya que el uso de funciones complejas no agrega más precisión a la salida. La forma triangular es la función de pertenencia más común entre varias otras como la trapezoidal, singleton y gaussiana [4].

- **Función triangular:** definida por un límite inferior **a**, un límite superior **b** y un valor **m**, donde **a < m < b**. La Ecuación 2-1 define el sistema y en la Figura 2-1a se puede observar su forma.
- **Función trapezoidal:** definida por un límite inferior **a**, un límite superior **b**, un límite de apoyo inferior **m** y un límite de apoyo superior **n**, donde **a < m < n < b**. La Ecuación 2-2 define el sistema y en la Figura 2-1b se puede observar la función.

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m}, & m < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 0, & (x < a)|(x > b) \\ \frac{x-a}{m-a}, & a \leq x \leq m \\ 1, & m \leq x \leq n \\ \frac{b-x}{b-n}, & n \leq x \leq b \end{cases} \quad (2-2)$$

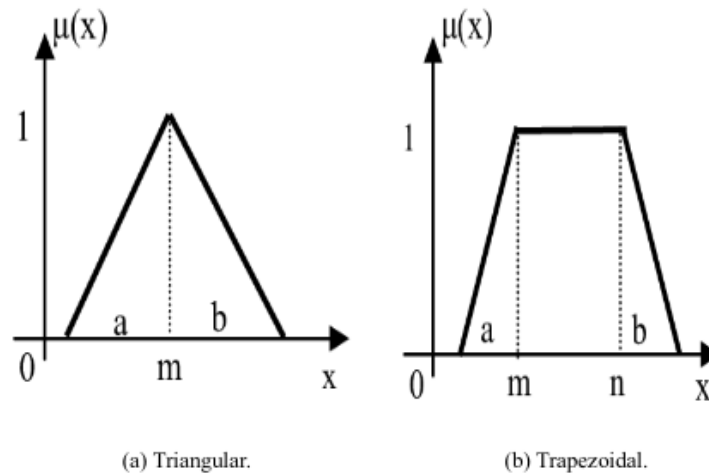


Figura 2-1: Funciones de pertenencia

2.3.3. De-Fusificación

La defusificación se puede considerar como un enfoque inverso de la fusificación. Convierte un conjunto difuso en el conjunto nítido apropiado, es decir, determina el valor nítido, que de alguna manera es la mejor representación del conjunto difuso de salida visto como una totalidad aislada. En algunos casos, generalmente cuando la salida del sistema difuso influye en otros sistemas, se requiere la defusificación para obtener un valor del rango de salida,. Por ejemplo, en los controladores difusos, es necesario un valor nítido como resultado en la salida porque se realiza un control sobre la base del valor nítido. También en los sistemas difusos de toma de decisiones, la defusificación puede ser necesaria [14].

Varios métodos de defusificación se conocen como el de membresía máxima, centroide, promedio ponderado y medio máximo. La selección de la técnica de

defusificación influye esencialmente en el valor de salida determinado por el método seleccionado, por lo que es importante utilizar una técnica adecuada. El método de defusificación más popular es la técnica del centro de gravedad (COG, siglas en inglés) en la que las salidas difusas del sistema correspondiente están representadas por las coordenadas del COG de la sección del nivel contenidas entre el gráfico de la función de pertenencia que expresa esas salidas y el eje de Z (Figura 2-2) [16].

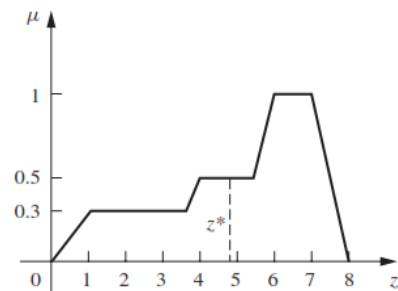


Figura 2-2: Centro de gravedad en sistema experto difuso.

3. DISEÑO DE LA ESTRATEGIA

3.1. Análisis de la literatura

Para el desarrollo de la estrategia primero fue necesario identificar cuáles eran las variables de importancia que iban a conformar el sistema. Debido a que existen diferentes contaminantes en el aire se hizo una búsqueda de los principales que son perjudiciales para la salud humana. Con la información obtenida se construyó la Tabla **3-1**, en la cual se observa la relación entre estos contaminantes con los diferentes tipos de enfermedades y consecuencias que pueden generar. Como se puede observar en la tabla, el Material Particulado (PM) es el que mayor número de consecuencias negativas genera en una persona expuesta a él. Además, también se puede observar que la contaminación produce mayormente enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

Para determinar los niveles permisibles de los contaminantes se consultó en el Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica (POECA). Además, se tuvo en cuenta la concentración máxima permitida para estos polutantes según la Organización Mundial de la Salud (OMS) como se puede observar en la Tabla **3-2**. Este ente es más estricto respecto a la concentración permitida a la que se puede estar expuesto, por lo que esta información se priorizó en el diseño del sistema implementado. También cabe resaltar que para algunos componentes no se encontró el máximo permitido por la OMS para el mismo intervalo de tiempo que propone POECA.

De forma paralela se buscó y estudió las bases de datos con la información de la contaminación aérea en la ciudad de Medellín proporcionados por el sistema SIATA, el cual con sus 32 estaciones (Figura **3-1a**) y varios puntos de monitoreo del programa de ciudadanos científicos (Figura **3-1b**) que están distribuidos a lo largo del valle de Aburrá, mide la concentración de cada polutante mencionado en la Tabla **3-2** [6].

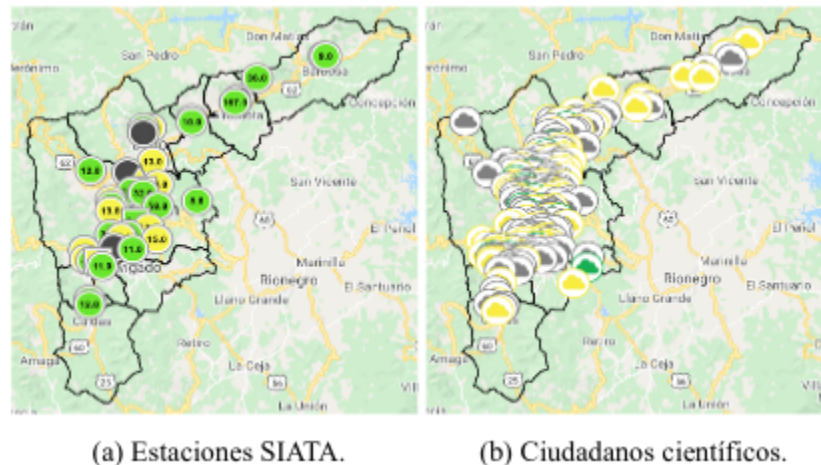


Figura 3-1: Puntos de monitoreo de calidad de aire en el Valle de Aburrá [6].

Con el fin de conocer cómo afecta la contaminación del aire a las personas durante una sesión de actividad física, se consultó adicionalmente en varios artículos la relación entre estos dos frentes: contaminantes y deporte. Debido a que se concluyó que entre más intenso es el ejercicio a realizar mayor es la cantidad de aire inhalado, en un ambiente contaminado, dependiendo de las concentraciones, aumenta la dosis de polutantes en el cuerpo humano que puede generar las diferentes consecuencias mencionadas en la Tabla 3-1. Por lo anterior, los datos que se observan en la Tabla 3-3 se usaron para determinar cuál sería el riesgo de una persona con base en su volumen tidal y la ventilación pulmonar, variables importantes para tener un promedio de la cantidad de aire inhalado.

Tabla 3-1: Relación de contaminantes aéreos con enfermedades y consecuencias en la salud humana.

Contaminante	Enfermedad	Consecuencia	Referencia
PM _{2.5}	Cardiovascular	Trombosis.	[28]
PM _{2.5}	Cardiovascular	Enfermedades coronarias, isquemia, fallo cardiaco, hipertensión, arritmias.	[24]
PM _{2.5}	Respiratorio	Tos, reduce funcionalidad de pulmones, bronquitis asmática, EPOC.	[17]
PM _{2.5}	Respiratorio	Contiene sustancias inmunogénicas → Incrementa asma.	[19]
PM _{2.5} -O ₃	Inmune	Estrés oxidativo → Inflamación pulmonar	[24]

		→ Asma y EPOC.	
PM _{2,5} -NO _x ¹	Cardiovascular	Efectos en la regulación de presión arterial durante el ejercicio → Cancela efecto de hipotensión al hacer ejercicio.	[25]
PM _{2,5} -NO _x	Inmune	Aumento de respuesta pro-inflamatoria.	[25]
NO _x	Cardiovascular	Hipertrofia ventricular derecha e izquierda.	[17]
O ₃	Respiratorio	Asma.	[17]
SO ₂	Cardiovascular Respiratorio Visual	Irritación respiratoria, empeoramiento de enfermedades cardiovasculares, bronquitis, opacidad en la córnea.	[17]
SO ₂	Respiratorio	Irritación en las vías aéreas.	[17]

Oxidos de nitrógeno

Tabla 3-2: Comparación en las concentraciones por contaminantes permitidos según POECA y la OMS [20,29]

Contaminante	POECA		OMS
	Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Nivel	Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM ₁₀ (24h)	0-54	Bueno	50
	55-154	Aceptable	
	155-254	Prevenición	
	255-354	Alerta	
	≥ 355	Emergencia	
PM _{2,5} (24h)	0-12	Bueno	25
	13-37	Aceptable	
	38-55	Prevenición	
	56-150	Alerta	
	≥ 151	Emergencia	
O ₃ (8h)	0-106	Bueno	100
	107-138	Aceptable	
	139-167	Prevenición	
	168-207	Alerta	

	≥ 208	Emergencia	
SO ₂ (1h)	0-93	Bueno	-
	94-197	Aceptable	
	198-486	Prevención	
	487-797	Alerta	
	≥ 798	Emergencia	
NO ₂ (1h)	0-100	Bueno	200
	101-189	Aceptable	
	190-677	Prevención	
	678-1221	Alerta	
	≥ 1222	Emergencia	
CO (8h)	0-5094	Bueno	-
	5095-10819	Aceptable	
	10820-14254	Prevención	
	14255-17688	Alerta	
	≥ 17688	Emergencia	

Tabla 3-3: Valores típicos para ventilación pulmonar durante descanso y ejercicio moderado e intenso [5].

Condición	Respiraciones por minuto	Volumen tidal (L/respiración)	Ventilación pulmonar (L/min)
Descanso	12	0.5	6
Moderado	30	2.5	75
Intenso	50	3.0	150

3.2. Sistema experto difuso

Para construir la estrategia se decidió usar un sistema experto difuso que, con base en diferentes variables, determinará el nivel de riesgo que una persona pudiera tener en el momento en que se dispusiera a realizar una actividad física. El sistema se conforma por dos etapas como se observa en la Figura 3-2. En la primera etapa, con base en el tiempo de

duración de una actividad física a realizar y la intensidad de esta, se buscó calcular la cantidad promedio de aire inhalado por minuto (ventilación pulmonar) en una persona.

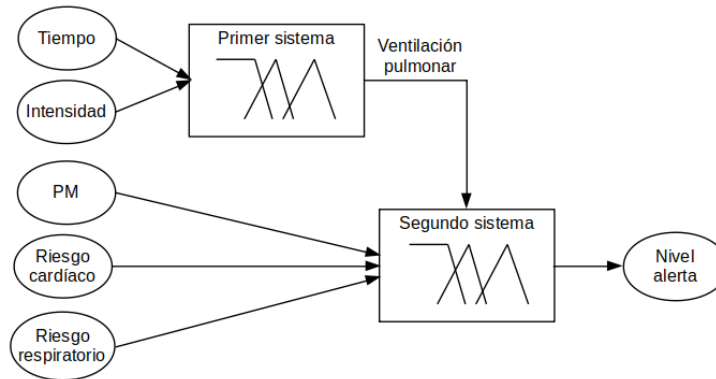


Figura 3-2: Sistema experto difuso diseñado.

El tiempo se definió como la primera entrada de esta etapa con un rango de trabajo de 0 a 90 minutos, divididos en 3 grupos o funciones de pertenencia de tipo triangular (Figura 3-3a). De igual forma al tiempo se definió la intensidad del ejercicio; entrada del sistema con un rango de trabajo de 0 a 10, donde cada unidad hace referencia al nivel de dificultad de la actividad y tres funciones de pertenencia triangulares para clasificar los valores (Figura 3-3b). La salida del sistema como se mencionó es la ventilación pulmonar. Para definir los valores del rango de trabajo se usaron los datos de la Tabla 3-3. Tres funciones de pertenencia, dos trapezoidales y una triangular se usaron para esta variable (Figura 3-3c).

Las reglas que definen la primera etapa del sistema se encuentran resumidas en la Tabla 3-4. Se puede observar además en la Figura 3-4 la superficie de control de esta etapa, en la cual de forma visual se muestra la relación entre las entradas y la salida.

Para la segunda etapa se trabajó con un sistema de cuatro entradas: la salida de la etapa previa (ventilación pulmonar), la concentración de PM en el aire y el riesgo cardíaco y respiratorio del usuario.

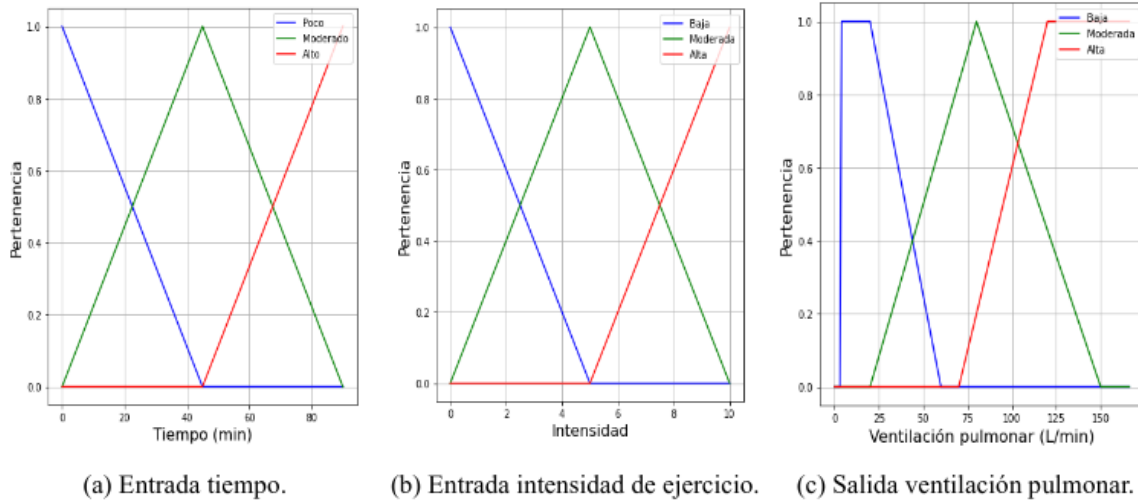


Figura 3-3: Funciones de pertenencia para primer sistema experto difuso.

Tabla 3-4: Ventilación pulmonar de acuerdo a tiempo e intensidad de actividad física.

		Tiempo		
		Poco	Moderado	Alto
Intensidad	Baja	Baja	Baja	Baja
	Moderada	Baja	Moderada	Alta
	Alta	Alta	Alta	Alta

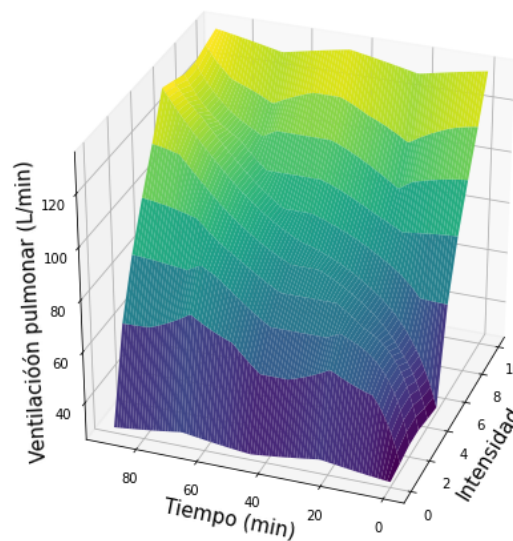
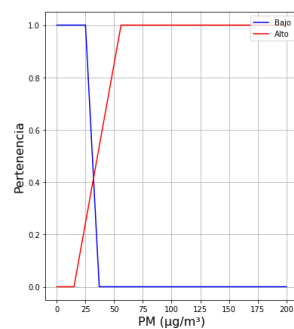


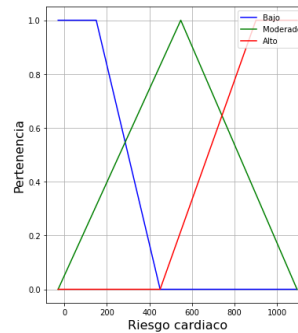
Figura 3-4: Superficie de control de primer sistema experto difuso.

Se decidió trabajar con un solo contaminante. En la literatura consultada se pudo concluir que el PM es el contaminante con mayores consecuencias negativas en la salud humana con respecto a los demás polutantes. De esta forma el sistema se simplificó en gran medida al no considerarse un amplio número de reglas derivadas de los demás contaminantes. Se usó para esta entrada el rango de trabajo del SIATA que va de 0 a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las funciones de pertenencia fueron 2 trapezoidales (Figura 3-5a) con los límites de la zona en común definidos con base en el máximo permitido por la OMS (Tabla 3-2) y el mayor valor del rango aceptable según POECA para el $\text{PM}_{2.5}$. Tanto el nivel de riesgo cardíaco como respiratorio se trabajaron con tres funciones de pertenencia, una triangular y dos trapezoidales (Figuras 3-5b, 3-5c). Los valores que definen el rango para estas entradas son el puntaje resultante de un cuestionario que se le haría al usuario al momento de su registro, como se explica más adelante. La salida final del sistema, como se puede observar en la Figura 3-2, es el nivel de alerta para una persona bajo las condiciones previamente mencionadas, y al igual que los riesgos, esta se definió con un rango de 0 a 10 y tres funciones de pertenencia (Figura 3-5d).

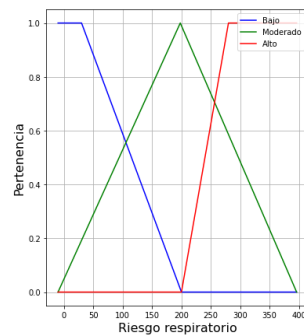
Figura 3-5: Funciones de pertenencia para segundo sistema experto difuso.



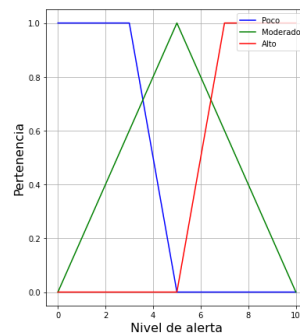
(a) Entrada PM.



(b) Entrada riesgo cardíaco.



(c) Entrada riesgo respiratorio.



(d) Salida nivel de alerta.

Las reglas para este sistema se observan en la Tabla 3-5 con las variables de entrada de ventilación pulmonar y riesgo cardíaco para generar la salida de nivel de alerta. Estas reglas aplican de igual forma para el caso de riesgo respiratorio pues se le dio el mismo grado de importancia. No se especifican en la tabla todas las relaciones del nivel de concentración de PM ya que para el caso de un nivel bajo, no se presenta riesgo alguno para el usuario en llevar a cabo la actividad planeada a realizar.

Por último no se muestran las superficies de control que relacionan la salida (nivel de riesgo) con los rangos definidos de PM, ventilación por minuto y riesgo cardíaco y respiratorio, debido a que necesita un alto costo computacional para generarlas.

Tabla 3-5: Nivel de alerta de acuerdo a ventilación pulmonar y riesgo cardíaco con PM en alto.

		Ventilación pulmonar (L/min)		
		Baja	Moderada	Alta
Riesgo cardíaco Respiratorio	Bajo	Poco	Poco	Moderado
	Moderado	Moderado	Moderado	Alto
	Alto	Moderado	Alto	Alto

3.2. Diseño de cuestionario para registro

El riesgo cardíaco y respiratorio se calcularon por medio de un cuestionario diseñado con base en información encontrada en la literatura, donde se buscó cuáles eran las principales variables que podían afectar la salud de una persona en esta medida. El cuestionario consta de cinco partes principales, como se puede observar en la Tabla 3-6. La información general del usuario, como primera parte, permite conocer con el peso y la estatura el Índice de Masa Corporal (IMC) de una persona, dato que está correlacionado con los riesgos a calcular, ya que indica que tan obesa es una persona, donde la obesidad, al generar varias consecuencias negativas a nivel cardiorespiratorio es uno de los datos más importantes del sistema. Adicionalmente la edad al ser un factor que también influye en el desarrollo o empeoramiento de este tipo de enfermedades, se le asignó un peso para el

cálculo de ambos riesgos. La segunda y tercera parte del cuestionario se enfocaban principalmente en calcular el riesgo cardíaco y respiratorio, respectivamente, del usuario. El estilo de vida como cuarta parte se usó para el cálculo de ambos riesgos. La última sección (creación del usuario), se diseñó para generar el usuario y la contraseña con las cuales el usuario va a ingresar a la plataforma [2, 12].

Tabla 3-6: Cuestionario para registro de usuario.

Información general					
Nombre	Apellidos	Edad	Género	Peso	Estatura
Riesgo cardíaco					
Historia cardiovascular					
¿Ha sido diagnosticado con una enfermedad cardiovascular, aterosclerosis, ataque cardíaco y / o accidente cerebrovascular?					
¿Ha experimentado angina (dolor de corazón) en los últimos 3 meses?					
Historia familiar					
Madre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 65 años					
Padre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 55 años					
Madre/Padre con diabetes tipo II					
Estrés					
Muerte de un esposo			Divorcio/Separación		
Reconciliación marital			Encarcelamiento		
Enfermedad grave/Herida/Cirugía			Matrimonio		
Despido del trabajo			Jubilación		
Enfermedad en la familia			Muerte de un amigo		
Dificultades sexuales			Embarazo		
Mudanza a nueva ciudad/departamento/país			Disputas familiares/de pareja		
Cambio en el estado financiero			Cambio de ocupación		
Cambio de responsabilidades laborales			Muerte de un miembro familiar		

Eventos familiares importantes: bodas/nacimientos	Hipoteca
Hijo(a) se va de casa	Dificultades personales en el trabajo
Logro personal sobresaliente	Cambio en los colegios/universidades
Cambio de hábitos sociales	Cambio de residencia
Cambio de rutina	Violaciones menores de la ley
¿Siente ansiedad, preocupación, miedo, pánico o malestar repentino, incapacidad para controlar la respiración y la aceleración del ritmo cardíaco cuando está molesto? Semanal Mensual	
¿Tiene sentimientos de tristeza, depresión, desesperanza, apatía, pesimismo, impotencia, aislamiento, soledad o falta de interés en la interacción social? Semanal Mensual	
¿Se enoja, irrita o frustra fácilmente, siente resentimiento u hostilidad hacia los demás con frecuencia? Semanal Mensual	
Realiza alguna de las siguientes actividades	
Meditación/Oración	Ejercicios de yoga/Estiramiento/Relajación
Eventos comunitarios/Actividades sociales/Deportes	Jugar con mascotas
¿Cuántas horas promedio de sueño tiene por noche? 0-4 5-6 7-8 >8	
¿Siente que sus niveles de energía bajan una hora después de comer? y/o ¿Tiene antojos de dulces o chocolate frecuentes? y/o ¿Tiene dolores de cabeza o incapacidad para concentrarse que se alivia comiendo?	
¿Es usted diabético?	
Inflamación y dolor	
¿Ha experimentado sibilancias, estornudos, secreción nasal, dolor de garganta, ojos llorosos o con picazón, tos y/o congestión nasal más de una vez en un mes?	
¿Ha experimentado palpitaciones del corazón o dolores de cabeza después de ciertos alimentos más de una vez en un mes?	
¿Experimenta dolor recurrente? Diario Semanal Mensual Nunca	
Riesgo respiratorio	
¿Tiene problemas al hacer ejercicio o realizar actividades de baja intensidad?	
¿Tose por la noche o inmediatamente después de despertarse?	
¿Sufre de una abundante presencia de moco en la garganta?	
¿Experimenta ruidos respiratorios agudos durante la mañana?	
¿Experimenta sonidos respiratorios de tono alto por la noche, mientras hace ejercicio o mientras realiza actividades de baja intensidad?	

¿Experimenta sensación de asfixia mientras está en reposo?		
¿Sufre de alguna enfermedad respiratoria como asma o EPOC?		
Estilo de vida		
Fumador pasivo		
Nunca ha fumado Ex-fumador Fumador(a) actual con menos de 20 cigarrillos/día Fumador(a) actual con más de 20 cigarrillos/día		
Alcohol: ¿Número de bebidas en promedio que ingiere? 0 diarias 1 diaria/7 por semana 2 diarias/14 por semana 3 o más diarias/21 o más por semana		
¿Vive en una calle principal?		¿Vive en una ciudad?
¿Vive en una zona industrial con emisiones de gases?		¿Trabaja con productos químicos?
Creación de usuario		
Usuario	Correo electrónico	Contraseña



4. APLICACIÓN WEB

4.1. Diseño de la aplicación web

4.1.1. Historias de usuario

Con el fin de conocer cuáles eran los requisitos que la aplicación final debía cumplir, se realizó un levantamiento de estos con historias de usuario donde se definieron dos frentes de trabajo, una como usuario y otra como sistema (Tabla 4-1). Por el lado del usuario se quería determinar cuáles eran las características y el funcionamiento principal de la aplicación cuando una persona como usuario navegará por esta. Desde el punto de vista del sistema se buscó definir las tareas a ejecutar para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto. Con lo anterior se facilitó conocer todas las partes que debía tener la aplicación y cuales iban a ser las herramientas con las cuales se podían desarrollar cada una de estas.

Tabla 4-1: Historias de uso para construcción de la aplicación.

 Sistema	 Usuario
Nombre: Datos ambientales Como: Sistema Quiero: Cargar datos ambientales del SIATA o Ciudadanos Científicos. Para: Conocer calidad del aire en la ciudad de Medellín.	Nombre: Navegar en aplicación Como: Usuario Quiero: Navegar en un sistema con un entorno amigable y sencillo Para: Encontrar fácilmente la información.
Nombre: Datos personales Como: Sistema Quiero: Recibir datos personales de un usuario Para: Calcular el nivel de riesgo del usuario.	Nombre: Configurar usuario Como: Usuario Quiero: Configurar aplicación con datos personales Para: Obtener por parte del sistema, alertas personalizadas sobre calidad del aire.

<p>Nombre: GPS Como: Sistema Quiero: Obtener ubicación GPS de un usuario Para: Calcular calidad del aire de forma localizada y enviar alertas al usuario con base en esta información.</p>	<p>Nombre: Configurar actividad física Como: Usuario Quiero: Ingresar actividad física a realizar Para: Recibir alertas según nivel de intensidad del ejercicio.</p>
<p>Nombre: Generar alertas Como: Sistema Quiero: Generar alertas personalizadas por contaminación de aire al superar niveles de riesgo previamente establecidos. Para: Notificar al usuario.</p>	<p>Nombre: Notificaciones usuario Como: Usuario Quiero: Recibir notificaciones con alertas de calidad de aire acordes con la actividad que deseo realizar. Para: Tomar medidas que mitiguen los efectos de la contaminación del aire en mi salud.</p>
<p>Nombre: Notificaciones sistema Como: Sistema Quiero: Enviar notificaciones con alertas personalizadas al usuario. Para: Informar acerca del nivel de riesgo.</p>	

4.1.2. Arquitectura de la aplicación

A partir de los requisitos planteados, se pudo definir la arquitectura del proyecto con los bloques principales de la aplicación como se observa en la Figura 4-1. Cuatro entradas, una salida y tres módulos principales conforman la arquitectura.

- Como entradas se encuentran los datos ambientales de la calidad del aire en la ciudad de Medellín generados por las estaciones principales del SIATA y de los ciudadanos científicos. La información personal del usuario, concentrada en una base de datos relacional, se modeló también como entrada y está conformada por los nombres y apellidos del usuario, edad, estatura, género, peso, usuario, contraseña y correo, así como el puntaje de riesgo cardíaco y respiratorio calculados del formulario de registro. Además, debido a que el objetivo del proyecto fue determinar el nivel de riesgo geolocalizado de una persona, la ubicación del usuario (GPS) se tomó en cuenta como entrada.

- Solo se contempló una salida de la aplicación. Las alertas para el usuario con información del nivel de riesgo en su salud serían desplegadas cuando este las consultara en el componente de notificaciones diseñado en el frontend.
- Los tres módulos planteados fueron, uno para la captura de los datos ambientales (Módulo de acceso), otro para el cálculo del nivel de riesgo del usuario y el último para el despliegue de las alertas (Notificaciones) con esa información. En el módulo de acceso, por medio de un fetch se pudo capturar los datos de las estaciones del SIATA y de los ciudadanos científicos y filtrar la información para discernir la correspondiente al PM2.5, contaminante central para inferir el nivel de riesgo. El módulo de generación de alertas por su parte como se mencionó, fue en donde se hizo el cálculo del nivel de riesgo en la salud del usuario, es decir es el sistema experto difuso implementado.

El desarrollo de la aplicación implicó cuatro enfoques: el diseño del sistema experto difuso, mencionado en el capítulo previo, y un frontend, un backend y una base de datos.

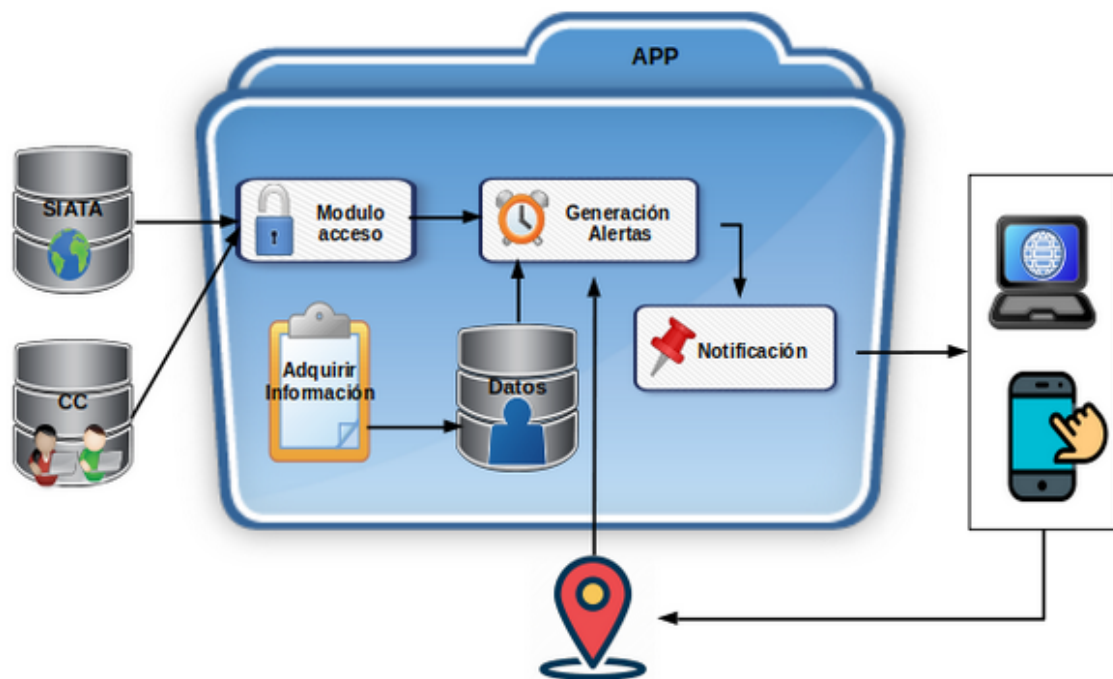


Figura 4-1: Arquitectura de la aplicación.

4.1.3. Frontend

Fue desarrollado con la biblioteca de JavaScript React, que permite la construcción de forma sencilla de interfaces de usuario. Inicialmente, con el fin de definir con claridad cómo iba a ser el diseño gráfico de la aplicación y los componentes con los que el usuario podía interactuar, se hicieron de forma manual varios mockups. Los componentes finales se dispusieron en una barra de navegación (Figura 4-2a) y fueron:

- **Componente principal de bienvenida (/home):** introduce a los usuarios la aplicación y el objetivo de esta (Figura 4-2c).
- **Componente de consejos (/consejo):** permite dar recomendaciones y sugerencias al usuario para mitigar el daño que la contaminación puede hacer en la salud de este. El despliegue de estos consejos se hizo con uno de los componentes que React tiene integrado que es el de carrusel (Figura 4-2d).
- **Componente de login (/login):** tipo Card de React, con el cual se permitió al usuario su ingreso, digitando un usuario y contraseña (Figura 4-2e). El botón de “Iniciar sesión” se diseñó de tal forma que pudiera activarse cuando ambos campos del card no estuvieran vacíos. Al presionar el botón se hace una consulta a la base de datos para verificar la información ingresada, si el usuario existe y si la contraseña asociada a este coincide con la ingresada. En caso de que la información sea correcta, la barra de navegación cambia y se observa una opción para dirigirse a la sección de “Notificaciones” (Figura 4-2b). Las opciones de “Iniciar sesión” y “Registrarse” desaparecen, y se sustituyen por una de “Cerrar sesión”. En caso de que el usuario o la contraseña sean incorrectos se despliega un mensaje avisando al usuario de su error (Figura 4-2f).



(a) Barra de navegación sin iniciar sesión.



(b) Barra de navegación, sesión iniciada.



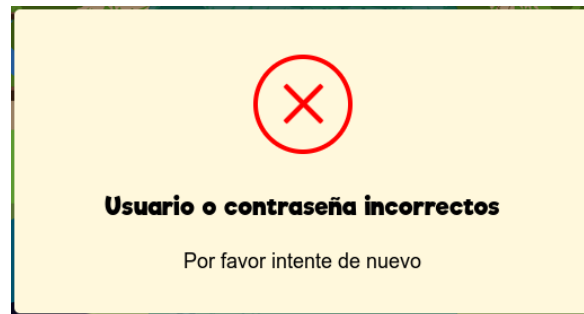
(c) Página de bienvenida.



(d) Página de recomendaciones o consejos.



(e) Login.



(f) Mensaje de error.

Figura 4-2: Partes del frontend de la aplicación.

- Componente de registro (/registro):** en el caso de un usuario nuevo, un formulario (Figura 4-3 - 4-4) se despliega con diferentes secciones, divididas en un carrusel. Las opciones para el formulario son las expuestas en la Sección 3.3 del Capítulo 3. Varias validaciones fueron aplicadas, por ejemplo solo permitir el ingreso de valores numéricos en campos que fueran de esta índole (peso o estatura) o la comparación de una entrada con un regex, que es una secuencia de caracteres y permitió la validación de la estructura de un correo electrónico ingresado. Se verificó adicionalmente que los campos de la sección uno (Figura 4-3b) como de la última (Figura 4-4c) estuvieran completos. Para dejar en blanco todos los campos de cada sección del formulario se implementó un botón de “Limpiar”. Otro botón de “Crear” conecta la aplicación con la base de datos con un método POST para generar un nuevo registro en esta con la información obtenida del formulario.

Formulario de registro

Para la generación de alarmas personalizadas es necesario conocer información de base acerca de usted, por medio de la cual a partir de la concentración de contaminación del aire del lugar en el que usted realiza su actividad deportiva y de la intensidad que esta de forma general requiere, se pueda indicar el nivel de peligro al que usted estaría expuesto.

(a) Sección de introducción.

Información general

Nombres: Mark Apellidos: Otto

Edad: 38 Peso [kg]: 67 Estatura [m]: 1.65 Género: Hombre Mujer

Limpia

(b) Ingreso de información general.

Riesgo cardiovascular

Historia cardiovascular

¿Ha sido diagnosticado con una enfermedad cardiovascular, aterosclerosis, ataque cardíaco y / o accidente cerebrovascular?

¿Ha experimentado angina (dolor de corazón) en los últimos 3 meses?

Historia familiar

Madre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 55 años

Padre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 55 años

Madre/Padre con diabetes tipo II

Limpia

(c) Form1.

Riesgo cardiovascular

Estrés (Parte I)

Muerte de un esposo Enfermedad en la familia

Muerte de un miembro familiar Muerte de un amigo

Divorcio/separación Dificultades sexuales

Reconciliación marital Embarazo

Encarcelamiento Mudanza a nueva ciudad/departamento/país

Enfermedad grave/Hérnia/Cirugía Disputas familiares/de pareja

Matrimonio Cambio en el estado financiero

Despido del trabajo Cambio de ocupación

Jubilación Cambio de responsabilidades laborales

Limpia

(d) Form2.

Riesgo cardiovascular

Estrés (Parte II)

Hipoteca Cambio en los colegios/universidades

Eventos familiares importantes: bodas/nacimientos Cambio de hábitos sociales

Hijos(a) se va de casa Cambio de residencia

Dificultades personales en el trabajo Cambio de rutina

Logro personal sobresaliente Violaciones menores de la ley

Limpia

(e) Form3.

Riesgo cardiovascular

Estrés (Parte III)

¿Siente ansiedad, preocupación, miedo, pánico o malestar repentino, incapacidad para controlar la respiración y la aceleración del ritmo cardíaco cuando está molesto? Semanal o más Mensual o más

¿Tiene sentimientos de tristeza, depresión, desesperanza, apatía, pesimismo, impotencia, aislamiento, soledad o falta de interés en la interacción social? Semanal o más Mensual o más

¿Se enoja, empuja o frustra fácilmente, siente resentimiento u hostilidad hacia los demás con frecuencia? Semanal o más Mensual o más

Limpia

(f) Form4.

Riesgo cardiovascular

Estrés (Parte III)

Meditación/Oración ¿Cuántas horas promedio de sueño tiene por noche? 0-4 5-6 7-8 Más de 8

Ejercicios de yoga/Estramiento/Relajación Eventos comunitarios/Actividades sociales/Deportes Lugar con masoetas

Azúcar en sangre

¿Siente que sus niveles de energía bajan una hora después de comer? y/o ¿Tiene antojos de dulces o chocolate frecuentes? y/o ¿Tiene dolores de cabeza o incapacidad para concentrarse que se alivia comiendo? ¿Es usted diabético?

Limpia

(g) Form5.

Riesgo cardiovascular

Inflamación y dolor

¿Ha experimentado sibilancias, estornudos, secreción nasal, dolor de garganta, ojos llorosos o con picazón, tos y/o congestión nasal más de una vez en un mes?

¿Ha experimentado palpitaciones del corazón o dolores de cabeza después de ciertos alimentos más de una vez en un mes?

¿Experimenta dolor recurrente? Diario Semanal Mensual Nunca

Limpia

(h) Form6.

Figura 4-3: Secciones del formulario de registro.

(a) Form7.

(b) Form8.

(c) Creación de usuario.

(d) Final de formulario.

Figura 4-4: Continuación de las secciones del formulario de registro.

- Componente de notificaciones (/notificaciones):** al ingresar al componente se le pide al usuario permiso para conocer su ubicación geográfica y poderla desplegar en un mapa (Figura 4-5). Si el usuario quiere conocer su nivel de riesgo, dispone de un botón “Generar” con el cual se despliega una serie de modals o cajas de diálogo para ingresar la información necesaria (Figura 4-6). En el primer modal se escoge el tipo de actividad a realizar de una lista de opciones (bicicleta, caminar o yoga) (Figura 4-6a). La intensidad de la actividad se escoge de un rango de cero a diez con paso uno, siendo cero una intensidad baja y diez una alta (Figura 4-6b). Por último se ingresa el tiempo para realizar la actividad en un rango de cero a noventa minutos (Figura 4-6c). Los datos ingresados se muestran en el último modal (Figura 4-6d) para que el usuario pueda dar click en un botón “Consultar” y el sistema se encargue de calcular el nivel de riesgo.

Al generarse el evento asociado al botón de “Consultar”, se hace una conexión con el backend, cediendo los datos recopilados en los modals, el usuario que hace la

consulta y su ubicación (latitud y longitud). Se consulta el valor de $PM_{2.5}$ de la estación del SIATA y de ciudadanos científicos más próximos a la posición del usuario. Un promedio de los datos de PM se realiza, asignándole un peso de 0.7 al valor de la estación del SIATA, ya que este es de mayor confianza. El dato del usuario se usa para obtener de la BD el riesgo cardíaco y respiratorio calculados cuando este realizó el proceso de registro. Los datos de PM y riesgo cardíaco y respiratorio obtenidos se envían como parámetros de entrada a la función “sistema.py” junto con los de intensidad y tiempo de los modals, donde con estos se calcula el nivel de riesgo en el sistema experto difuso previamente diseñado.

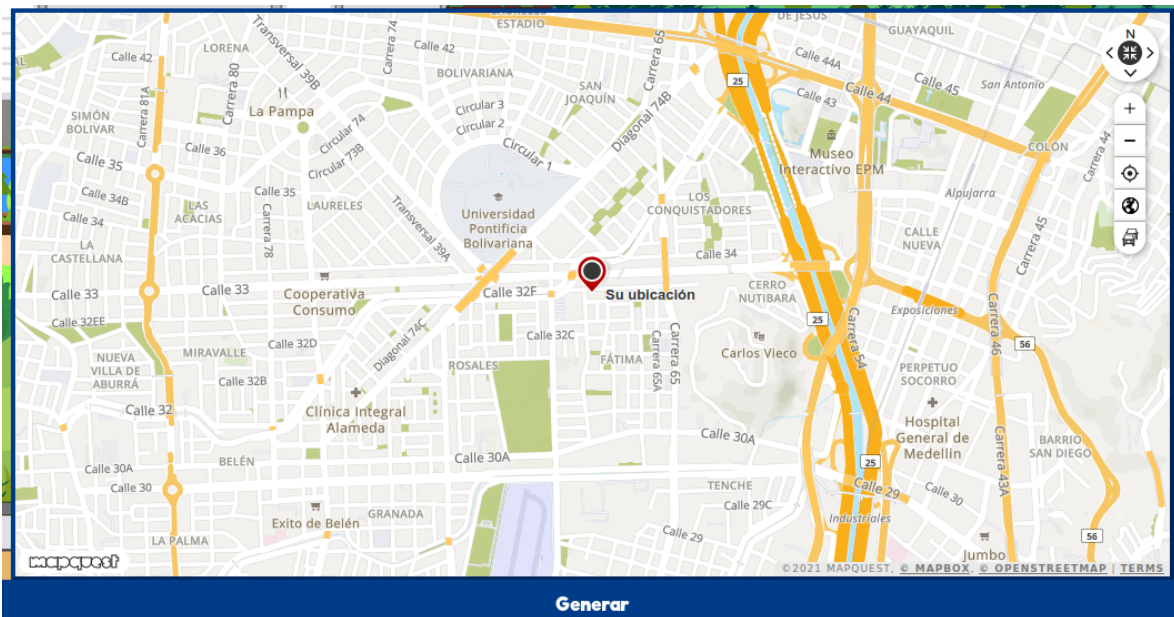





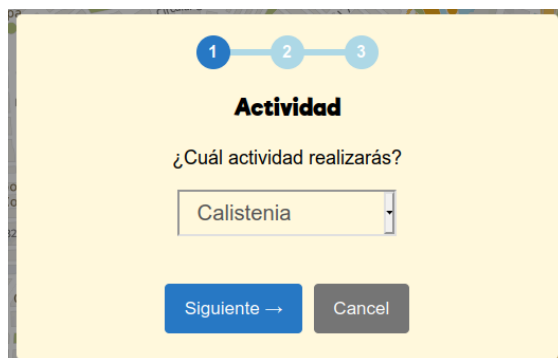
Figura 4-5: Ubicación del usuario.

Cuando se obtiene el nivel de riesgo por parte del backend, este se compara con diferentes rangos (Tabla 4-2) con el fin de mostrarle al usuario con un alert su nivel de riesgo. Tres tipos de alert se pueden desplegar como se observa en la tabla.

La Figura 4-7 resume las conexiones y procesos mencionados para este componente.

Tabla 4-2: Niveles de riesgo.

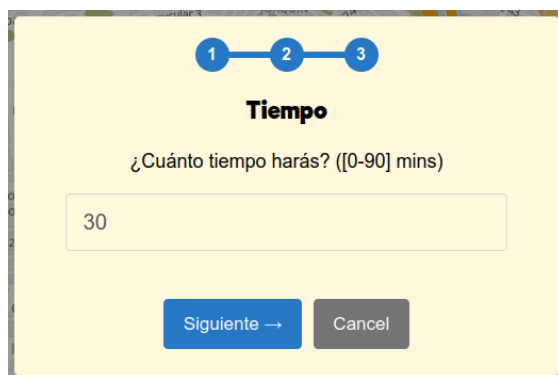
Nivel	Rango	Alerta
Bajo	0-4	
Moderado	4-7	
Alto	7-10	



(a) Ingreso de actividad física a realizar.



(b) Ingreso de intensidad.



(c) Ingreso de tiempo.



(d) Resumen de la información.

Figura 4-6: Modals para obtener datos necesarios en el cálculo del nivel de riesgo.

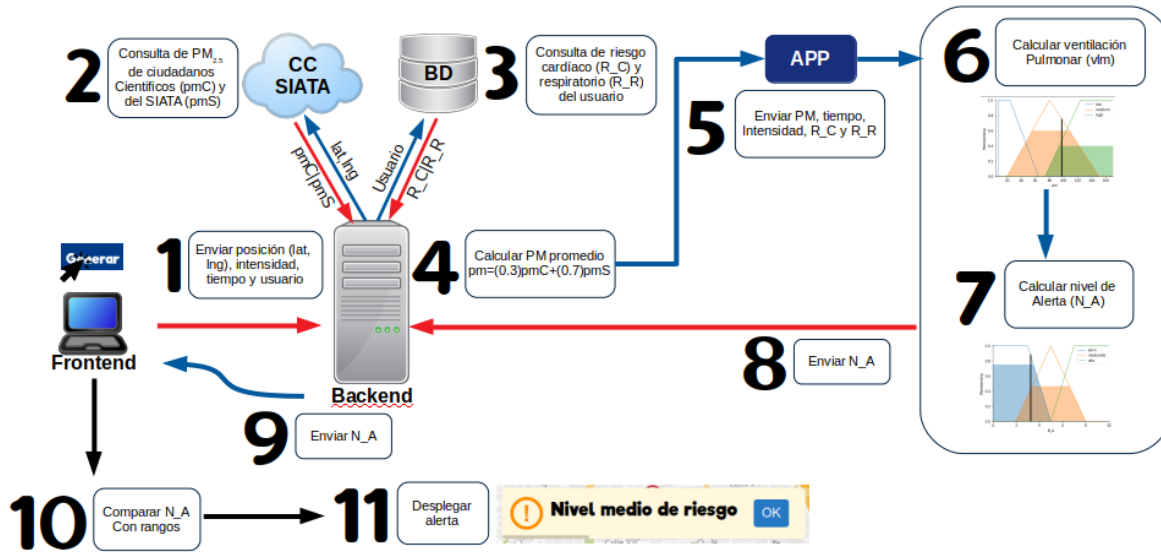


Figura 4-7: Flujo de trabajo para componente de notificaciones.

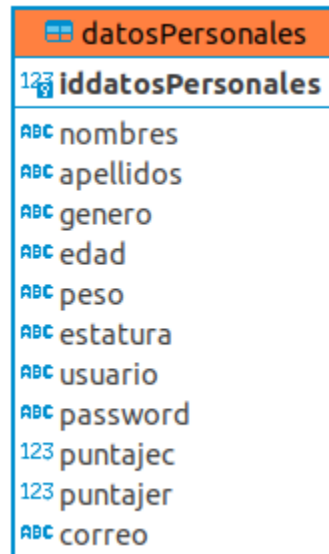
4.1.4. Backend

La conexión de la aplicación con la Base de Datos (BD) se hizo con ayuda de Flask, el cual es un micro-framework web diseñado para python. Se definieron rutas con dos métodos HTML de trabajo (POST y GET), para generar o consultar datos en la BD, respectivamente. Este servicio se empleó de forma local es una máquina virtual con un sistema operativo Linux. Las urls definidas fueron:

- `http://localhost:5000/login/username` (Método: GET) → Consultar si existe el usuario (username) en la BD, y de existir, cual es la contraseña asociada a este.
- `http://localhost:5000/user` (Método: POST) → Insertar un nuevo registro en la BD con la información obtenida del formulario de registro.

4.1.5. Base de datos

Una base de datos simple se creó con el software libre MariaDB. Se trabajó con una sola Tabla (Figura 4-8) para almacenar la información de cada usuario registrado en la aplicación.



The image shows a screenshot of a MariaDB database table named 'datosPersonales'. The table has a header row with the name 'datosPersonales' and a small icon. Below the header, there are several rows of data, each with a small icon and a text value. The rows are: 'nombres', 'apellidos', 'genero', 'edad', 'peso', 'estatura', 'usuario', 'password', 'puntajec', 'puntajer', and 'correo'.

datosPersonales
123 iddatosPersonales
ABC nombres
ABC apellidos
ABC genero
ABC edad
ABC peso
ABC estatura
ABC usuario
ABC password
123 puntajec
123 puntajer
ABC correo

Figura 4-8: Base de datos diseñada en MariaDB.

5. RESULTADOS

Con el fin de validar el funcionamiento de la aplicación se crearon tres usuarios que simulaban las características de ser una persona sana (riesgo cardíaco y respiratorio bajo), una persona con mayores comorbilidades (riesgo cardíaco moderado) y una persona con altas comorbilidades (riesgo cardíaco mayor y riesgo respiratorio moderado). En la Tabla 5-1 se observa los campos ingresados en el formulario de registro para cada persona como su nivel de riesgo cardíaco y respiratorio calculados en este proceso.

Para cada usuario se simuló la consulta de su nivel de riesgo con tres tipos de intensidad (baja, media y alta), con un tiempo de ejecución fijo de 60 min y tres condiciones ambientales que se pueden presentar en la ciudad de Medellín:

- Concentración baja de $PM_{2.5}$ ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), usual en las zonas de bajo tránsito vehicular.
- Concentración moderada de $PM_{2.5}$ ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), común en varias zonas de la ciudad durante los picos de flujo automotor. Este valor supera el límite permitido por la normatividad colombiana de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como también el de la OMS de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Concentración alta de $PM_{2.5}$ ($90 \mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo un valor crítico, como los presentados durante el mes de marzo, en el cual por lo cambios meteorológicos, se da una retención de los contaminantes, aumentando la concentración de contaminantes en el aire.

Tabla 5-1: Datos ingresados en registro de tres usuarios.

Información general		
Nombres: Laura Andrea. Apellidos: González Tobón. Edad: 28.	Nombres: Nicolás Apellidos: Restrepo Pérez. Edad: 36.	Nombres: Darío Apellidos: Mejía Londoño. Edad: 54.

Género: f. Peso: 60 kg. Estatura: 1.54 m.	Género: m. Peso: 80 kg. Estatura: 1.72 m.	Género: m Peso: 66 kg. Estatura: 1.65 m.
Riesgo cardíaco		
Historia cardiovascular		
	Ha experimentado angina (dolor de corazón) en los últimos 3 meses.	Ha sido diagnosticado con una enfermedad cardiovascular, aterosclerosis, ataque cardíaco y / o accidente cerebrovascular. Ha experimentado angina (dolor de corazón) en los últimos 3 meses.
Historia familiar		
Madre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 65 años.	Madre/Padre con diabetes tipo II.	Madre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 65 años. Padre con enfermedad cardiovascular (presión arterial alta, ataque cardíaco, angina, accidente cerebrovascular, endurecimiento de las arterias) menor de 55 años.
Estrés		
Cambio de ocupación. Cambio de responsabilidades laborales. Logro personal sobresaliente. Siente ansiedad, preocupación, miedo, pánico o malestar repentino, incapacidad para controlar la respiración y la aceleración del ritmo cardíaco cuando está molesto (Semanal). Tiene sentimientos de tristeza, depresión, desesperanza, apatía, pesimismo, impotencia, aislamiento, soledad o falta de interés en la interacción social (Mensual). Se enoja, irrita o frustra	Divorcio/Separación. Despido del trabajo. Enfermedad en la familia. Cambio en el estado financiero. Hipoteca. Cambio de rutina. Siente ansiedad, preocupación, miedo, pánico o malestar repentino, incapacidad para controlar la respiración y la aceleración del ritmo cardíaco cuando está molesto (Semanal). Tiene sentimientos de tristeza, depresión, desesperanza, apatía, pesimismo, impotencia, aislamiento, soledad o falta de	Muerte de un esposo. Divorcio/Separa. Enfermedad grave/Herida/Cirugía. Enfermedad en la familia. Muerte de un amigo. Disputas familiares/de pareja. Cambio en el estado financiero. Cambio de ocupación. Cambio de responsabilidades laborales. Hipoteca. Hijo (a) se va de casa.




























<p>fácilmente, siente resentimiento u hostilidad hacia los demás con frecuencia (Semanal).</p> <p>Meditación/Oración.</p> <p>Ejercicios de yoga/Estiramiento/Relajación.</p> <p>Jugar con mascotas 5-6 horas promedio de sueño por noche.</p>	<p>interés en la interacción social (Semanal).</p> <p>0-4 horas promedio de sueño por noche.</p> <p>¿Siente que sus niveles de energía bajan una hora después de comer? y/o ¿Tiene antojos de dulces o chocolate frecuentes? y/o ¿Tiene dolores de cabeza o incapacidad para concentrarse que se alivia comiendo.</p>	<p>Dificultades personales en el trabajo.</p> <p>Logro personal sobresaliente.</p> <p>Cambio de hábitos sociales.</p> <p>Cambio de rutina.</p> <p>Siente ansiedad, preocupación, miedo, pánico o malestar repentino, incapacidad para controlar la respiración y la aceleración del ritmo cardíaco cuando está molesto (Semanal).</p> <p>Tiene sentimientos de tristeza, depresión, desesperanza, apatía, pesimismo, impotencia, aislamiento, soledad o falta de interés en la interacción social (Semanal).</p> <p>Se enoja, irrita o frustra fácilmente, siente resentimiento u hostilidad hacia los demás con frecuencia (Semanal).</p> <p>Jugar con mascotas.</p> <p>5-6 horas promedio de sueño por noche.</p> <p>¿Siente que sus niveles de energía bajan una hora después de comer? y/o ¿Tiene antojos de dulces o chocolate frecuentes? y/o ¿Tiene dolores de cabeza o incapacidad para concentrarse que se alivia comiendo?</p> <p>Es diabético.</p>
Inflamación y dolor		
<p>Experimenta dolor recurrente (Ninguno).</p>	<p>Experimenta dolor recurrente (Mensual).</p>	<p>Ha experimentado sibilancias, estornudos, secreción nasal, dolor de garganta, ojos llorosos o con picazón, tos y/o congestión nasal más de una vez en un mes.</p> <p>Ha experimentado palpitaciones del corazón o dolores de cabeza después de ciertos alimentos más de una vez en un mes.</p> <p>Experimenta dolor recurrente (Mensual).</p>

Riesgo respiratorio		
	<p>Sufre de una abundante presencia de moco en la garganta.</p> <p>Experimenta sonidos respiratorios de tono alto por la noche, mientras hace ejercicio o mientras realiza actividades de baja intensidad.</p>	<p>Tiene problemas al hacer ejercicio o realizar actividades de baja intensidad.</p> <p>Tose por la noche o inmediatamente después de despertarse.</p> <p>Experimenta ruidos respiratorios agudos durante la mañana.</p> <p>Experimenta sonidos respiratorios de tono alto por la noche, mientras hace ejercicio o mientras realiza actividades de baja intensidad.</p> <p>Sufre de alguna enfermedad respiratoria como asma o EPOC.</p>
Estilo de vida		
<p>Fumador pasivo.</p> <p>Nunca ha fumado.</p> <p>0 bebidas alcohólicas diarias.</p> <p>Vive en una calle principal.</p> <p>Vive en una ciudad.</p>	<p>Ex-fumador.</p> <p>1 bebida alcohólica diaria/7 por semana.</p> <p>Vive en una ciudad.</p> <p>Trabaja con productos químicos.</p>	<p>Fumador pasivo.</p> <p>Fumador actual con menos de 20 cigarrillos/día.</p> <p>0 bebidas alcohólicas diarias.</p> <p>Vive en una ciudad.</p> <p>Vive en una zona industrial con emisiones de gases.</p>
Creación de usuario		
<p>Usuario: LauAGT.</p> <p>Contraseña: 2468.</p> <p>Correo: Lau44@gmail.com</p>	<p>Usuario: Nico362.</p> <p>Contraseña: 246.</p> <p>Correo: NicolasRP@gmail.com</p>	<p>Usuario: DarGonL.</p> <p>Contraseña: 2468.</p> <p>Correo: Dario613GL@gmail.com</p>

Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 5-2. Se puede evidenciar que con un aumento del nivel de riesgo cardíaco o respiratorio, los niveles de riesgo también lo hacen, mostrando progresivamente más alertas tipo media/moderada. Aunque un nivel de riesgo alto no se obtuvo bajo las condiciones planteadas, esta se puede presentar en caso de que la persona tenga mayores niveles de riesgo cardíaco y/o respiratorio o se de un pico de contaminación mayor al planteado pues se ha llegado a alcanzar valores mayores a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La aplicación con el sistema experto difuso integrado se ajusta a las necesidades y comorbilidades del usuario, permitiéndole conocer sus posibles riesgos y cómo evitarlos.

Tabla 5-2: Simulación de niveles de riesgo.

Intensidad: 3				Intensidad: 7				Intensidad: 10			
PM _{2.5}	Caso 1	Caso2	Caso3	PM _{2.5}	Caso1	Caso 2	Caso 3	PM _{2.5}	Caso 1	Caso 2	Caso 3
20				20				20			
40				40				40			
90				90				90			

Caso 1: Persona sana

Caso 2: Persona con comorbilidades moderadas

Caso 3: Persona con altas comorbilidades

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se identificaron las principales variables para un sistema experto difuso que pueda calcular el nivel de riesgo para una persona en un ambiente contaminado cuando realiza una actividad física. Conociendo su ubicación en la ciudad de Medellín y las comorbilidades de la persona permitió diseñar e implementar un sistema de alertas personalizadas y geolocalizadas. El tiempo y la intensidad de la actividad se fijaron como entradas. Solo se trabajó con el contaminante $PM_{2.5}$ debido a que este según la literatura genera mayor número de consecuencias negativas para la salud humana comparado con los demás contaminantes. La posición de la persona permitió acceder al valor de $PM_{2.5}$ de los puntos de monitoreo del SIATA y de ciudadanos científicos más cercanos a él. Se diseñó un cuestionario para calcular el posible riesgo cardíaco y/o respiratorio que esta puede tener la persona como comorbilidades. Los resultados de este cuestionario se fijaron también como entradas del sistema.

Dos etapas conforman el sistema diseñado. La primera etapa calcula la ventilación pulmonar que la persona puede tener por medio del tiempo y la intensidad. Con este nuevo dato y las demás entradas se encuentra el nivel de riesgo en la segunda etapa. Un backend funcional con Flask y una base de datos SQL se implementaron para el manejo de la anterior información.

Para interactuar con el usuario, obtener los datos de trabajo e informar a este su nivel de riesgo y las medidas de autocuidado que puede seguir, se diseñó un frontend con ReactJS. Cinco componentes conforman la aplicación con los cuales el usuario puede crear su cuenta, ingresar, ver recomendaciones y consultar su nivel de riesgo.

Se implementaron varios casos de uso para validar la funcionalidad del sistema propuesto. Primero se crearon tres usuarios. Niveles de riesgo cardíaco y respiratorio bajo, medio y alto se simularon como diferentes comorbilidades de los usuarios. Cada persona se

evaluó con tres niveles de intensidad y de $PM_{2.5}$. Los resultados permitieron concluir que el sistema se ajusta a los objetivos planteados y que la aplicación es funcional.

Los resultados se pueden mejorar considerando otro tipo de comorbilidades de los usuarios o mejorando el cálculo de los niveles de riesgo cardíaco y respiratorio. Una búsqueda exhaustiva de información permite complementar el sistema con datos clínicos o mediciones de sensores biomédicos que proporcionen datos como temperatura corporal, pulso cardíaco, nivel de azúcar, entre otros. Además un modelo espacio-temporal se puede generar a partir de las mediciones del SIATA y de los ciudadanos científicos para obtener un dato más preciso del nivel de concentración de $PM_{2.5}$ y de otros contaminantes en diferentes puntos geográficos de la ciudad de Medellín.

7. REFERENCIAS

- [1] *Artificial Intelligence Fuzzy Logic Systems Tutorialspoint*
- [2] *CARDIOVASCULAR RISK ASSESSMENT QUESTIONNAIRE*
- [3] *Condiciones especiales del valle de aburrá*
- [4] *eMathTeacher: Mamdani's fuzzy inference method Membership functions*
- [5] *Physiologic support systems and exercise*
- [6] *SIATA - Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá*
- [7] *The Ongoing Challenge of Managing Carbon Monoxide Pollution in Fairbanks, Alaska.*
National Academies Press, aug 2002
- [8] *Air Pollution and Your Health | NIEHS. 2021*
- [9] Aguilar, David ; Correa, Mauricio A.:*Evaluación del impacto de la contaminación atmosférica por PM2.5 sobre la mortalidad de la población en el valle de Aburrá,*
Universidad de Antioquia, Maestría, 2020. – 54 p.
- [10] American Lung Association. *Sulfur Dioxide | American Lung Association.* 2020
- [11] Área Metropolitana del Valle de Aburrá ; Clean Air Institute. *Plan integral de gestión de localidad del aire para el área metropolitana del Valle de Aburrá 20172030.* 2017

- [12] Badnjevic, Almir ; Gurbeta, Lejla ; Custovic, Eddie: An Expert Diagnostic System to Automatically Identify Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease in Clinical Settings. En: *Scientific Reports* 8 (2018), Nr. 1, p. 1–9. – ISSN 20452322
- [13] Bruce, Richard. M.: The control of ventilation during exercise: a lesson in critical thinking. En: *Advances in Physiology Education* 41 (2017), dec, Nr. 4, p. 539–547. – ISSN 1043–4046
- [14] Chakraverty, Snehashish ; Sahoo, Deepti M. ; Mahato, Nisha R.: Defuzzification. En: *Concepts of Soft Computing*. Springer Singapore, 2019, p. 117–127
- [15] Czabanski, Robert ; Jezewski, Michal ; Leski, Jacek: Introduction to fuzzy systems. En: *Studies in Fuzziness and Soft Computing* Vol. 356. Springer Verlag, 2017. – ISSN 14349922, p. 23–43
- [16] Dragan, Z ; Saletic ; Velasevic, Dusan ; Mastorakis, Nikos: Analysis of Basic Defuzzification Techniques. En: *Proceedings of the 6th WSES international multiconference on circuits, systems, communications and computers* (2002), 01
- [17] GhoraniAzam, Adel ; RiahiZanjani, Bamdad ; BalaliMood, Mahdi: Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. 2016 (1). – Informe de Investigación
- [18] Giles, Luisa V. ; Brandenburg, Jason P. ; Carlsten, Christopher ; Koehle, Michael S.: Physiological responses to diesel exhaust exposure are modified by cycling intensity. En: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 46 (2014), Nr. 10, p. 1999–2006. – ISSN 15300315
- [19] Guarnieri, Michael ; Balmes, John R.: Outdoor air pollution and asthma. En: *The Lancet* 383(2014), Nr. 9928, p. 1581–1592. – ISSN 1474547X

[20] Junta Metropolitana del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Acuerdo Metropolitano N°4*. 2018

[21] Landrigan, Philip J.: Air pollution and health. En: *The Lancet Public Health* 2 (2017), Nr. 1,p. e4–e5. – ISSN 24682667

[22] Mackenzie, Jillian. *Air Pollution Facts, Causes and the Effects of Pollutants in the Air* |NRDC. 2016

[23] Nathanson, Jerry. *Air pollution | Effects, Causes, Definition, Facts* | *Encyclopedia Britannica*

[24] Newby, David E. ; Mannucci, Pier M. ; Tell, Grethe S. ; Baccarelli, Andrea A. ; Brook, Robert D. ; Donaldson, Ken ; Forastiere, Francesco ; Franchini, Massimo ; Franco, Oscar H. ;Graham, Ian ; Hoek, Gerard ; Hoffmann, Barbara ; Hoylaerts, Marc F. ; Künzli, Nino ; Mills, Nicholas ; Pekkanen, Juha ; Peters, Annette ; Piepoli, Massimo F. ; Rajagopalan, Sanjay ; Storey, Robert F.: Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease. En: *European Heart Journal* 36 (2015), Nr. 2, p. 83–93. – ISSN 15229645

[25] Pasqua, Leonardo A. ; Damasceno, Mayara V. ; Cruz, Ramon ; Matsuda, Monique ; Martins, Marco G. ; Lima Silva, Adriano E. ; Marquezini, Mônica ; Saldiva, Paulo Hilário, N. ; Bertuzzi, Romulo: Exercising in air pollution: The cleanest versus dirtiest cities challenge. En: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (2018), Nr. 7. – ISSN 16604601

[26] Pershagen, G.: *Air pollution and cancer*. 1990 (104). – 240–251 p.. – ISBN 9789283221661

[27] Powers, Kyle A. ; Dhamoon, Amit S.: *Physiology, Pulmonary, Ventilation and Perfusion*. StatPearls Publishing, sep 2019

[28] Qin, Fei ; Yang, Yan ; tao Wang, Song ; nan Dong, Ya ; xiao Xu, Min ; wei Wang, Zhong ; Xiu Zhao, Jie. *Exercise and air pollutants exposure: A systematic review and metaanalysis*, feb 2019

[29] World Health Organization. *Ambient (outdoor) air pollution*. 2018

[30] World Health Organization Regional Office for Europe: *Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future*. Copenhagen : WHO, 2017. – 39 p.. – ISBN 9789289052306

[31] Zhang, Xin ; Chen, Xi ; Zhang, Xiaobo: The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. En: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (2018), Nr. 37, p. 9193–9197. – ISSN 10916490