

Estación Meteorológica de Código Abierto para la Región de Coquimbo

Martín Avilés (ICI)¹, Javiera Carpio (ICI)¹, Óscar Merino (ICCI)², Francisco Contreras (ICI)¹, Pablo Guzmán (ICCI)², and Jorge Vicencio (ICI)¹

¹Universidad Católica del Norte — Ingeniería Civil Industrial (ICI)

²Universidad Católica del Norte — Ingeniería Civil en Computación e Informática (ICCI)
6 de diciembre de 2025

RESUMEN

Este **informe final** presenta el diseño de una **estación meteorológica y de calidad del aire** de bajo costo y **código abierto**, enfocada en la **Región de Coquimbo** (Norte Chico). Se define un **prototipo muestral** (demostrativo, de interior), con **backend local**, esquema de datos y lineamientos **QA/QC** para uso indicativo, sin pruebas de campo. La **pertinencia territorial** se sustenta en: (i) la **megasequía 2010–presente** con déficit cercano al 30 % en el tramo Coquimbo–La Araucanía [1, 2], (ii) **decretos de escasez hídrica** en la región [3, 4], (iii) la **necesidad de granularidad intraurbana** que complementa la red oficial (SINCA) [5, 6], y (iv) el **alto recurso solar** para futuras etapas fotovoltaicas [7]. El documento integra **PESTEL**, **Fuerzas de Porter** y **FODA**, planificación, sostenibilidad y cumplimiento normativo como base para escalamiento.

1. Contexto

Ámbito territorial: Región de Coquimbo (Elqui, Limarí, Choapa) con referencia al Norte Chico.

Empresa propuesta (sin nombre definitivo): organización **código abierto** para educación STEM y ciencia ciudadana, con futura articulación con colegios y municipios.

Propósito del informe: prototipo muestral con documentación técnica y **lineamientos QA/QC**, sin despliegue.

Descripción breve del proyecto

El proyecto pertenece al **sector IoT ambiental y educativo**. Consiste en una **estación meteorológica y de calidad del aire de bajo costo**, con hardware abierto y sensores accesibles, que mide temperatura, humedad, presión, CO₂ y material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀). Los datos se transmiten a un **backend local** y se visualizan en un panel web simple para uso educativo y comunitario. El diseño es **modular y escalable**, y se plantea una **escala piloto** de 1–3 estaciones en fase muestral, con potencial de red barrial en etapas posteriores.

Modelo estratégico: misión, visión y valores

Misión: diseñar y fabricar estaciones inteligentes que midan clima y calidad del aire, difundiendo datos locales abiertos para fortalecer la educación ambiental y la toma de decisiones.

Visión: liderar soluciones accesibles de monitoreo ambiental comunitario en el Norte Chico, promo-

viendo sostenibilidad y adaptación al cambio climático.

Valores: responsabilidad ambiental, transparencia de datos, innovación sustentable, conservación de recursos y educación ambiental.

Estructura organizacional propuesta

Se propone una estructura mínima que cumpla la rúbrica (personal científico, estudiantes y apoyo). El modelo organizacional se resume en la Figura 1. Los cargos son **provisorios** y pueden reasignarse. **Inv.** indica **invitado**:

- **Dirección General** (ICI): estrategia y relacionamiento territorial.
- **Dirección Técnica** (ICCI): arquitectura, estándares de datos, QA/QC.
- **Asesoría Científica** (académico/a UCN): guía metodológica y validación.
- **Cientista de Datos** (posgrado): depuración, indicadores y documentación de calidad.
- **Líder Hardware y Energía** (ICCI): electrónica, sensórica y prefactibilidad fotovoltaica.
- **Líder Software y Datos** (ICCI): firmware, *backend* local y esquema de datos.
- **Coordinación de Vinculación** (ICI): escuelas, municipios, PARCC.
- **Encargado/a Q-HSEC** (ICI): seguridad, am-

biente y control documental.

- **Técnico/a de Laboratorio** (apoyo): prototipado y mantenimiento de banco.
- **Operaciones y Compras** (ICI): logística y abastecimiento.
- **Estudiantes ICI** (4): Avilés, Carpio, Contreras, Vicencio.
- **Estudiantes ICCI** (2): Merino, Guzmán.



Figura 1: Modelo estratégico organizacional del proyecto (Inv. = invitado).

2. Descripción del problema u oportunidad (ampliada)

2.1. Situación actual en Coquimbo / Norte Chico

- **Sequía estructural:** la “megasequía” 2010–presente ha generado un déficit pluviométrico cercano al 30 %, con alta severidad en el Norte Chico [1, 2]. La **escasez hídrica** ha sido reiteradamente decretada por DGA en provincias de Coquimbo [3, 4].
- **Calidad del aire:** la conurbación de La Serena y Coquimbo cuenta con **pocas estaciones oficiales** (SINCA); sirven de referencia regional, pero son **insuficientes** para capturar variaciones *barriales/microclimáticas* útiles en educación y participación ciudadana [5, 6].
- **Viabilidad energética:** el **alto GHI** del Norte Chico (Global Solar Atlas) sugiere que, en fases futuras, los nodos podrían ser autónomos con **energía solar** [7].

2.2. Brechas específicas

1. **Granularidad espacial:** falta *resolución intraurbana* para explorar **islas de calor** y focos locales

de MP (*p.ej.*, vías con alto tráfico, zonas con polvo resuspendido).

2. **Alfabetización climática/ambiental:** se requieren **herramientas educativas** basadas en datos locales para aula y talleres municipales.
3. **Democratización de datos:** escasa disponibilidad de **datos abiertos** locales de fácil uso para docentes y comunidad.
4. **Transparencia y acceso:** se requiere disponer de *firmware* y *software* de código abierto, así como plataformas de datos con documentación clara y API abierta, que permitan auditar, replicar y adaptar las mediciones ambientales por parte de escuelas y comunidades.

2.3. Usuarios y necesidades

- **Escuelas/colegios:** actividades STEM con mediciones reales (*series temporales, comparaciones en aula*).
- **Municipios/SECPLAN/DAOMA:** bases para proyectos de **educación ambiental** y sensibilización.
- **Comunidad:** comprensión de **variabilidad barrial** y **riesgos locales** asociados a calor y MP.

2.4. Justificación e impacto ingenieril-ambiental

La exposición a PM_{2,5} se asocia a carga sanitaria global y múltiples efectos cardiorrespiratorios [8, 9]. Redes de sensores *low-cost*, **con QA/QC, complementan** la red oficial para fines **indicativos**, educación y ciencia ciudadana [10, 11, 12, 13, 14]. El enfoque local en Coquimbo agrega **pertinencia territorial** (sequía, polvo, brisas costeras, confort térmico), habilitando **aprendizaje activo** y una futura red abierta **escalable**.

Además, la adopción de un **firmware de código abierto** y una **plataforma de datos abiertos** no solo mejora la accesibilidad, la transparencia y la reproducibilidad de las mediciones, sino que permite que cualquier actor pueda auditar, adaptar y ampliar la funcionalidad del sistema. Proyectos como *Smart Citizen* demuestran que el uso de licencias abiertas para hardware, software y datos empodera a las comunidades y fomenta la colaboración, facilitando la réplica de estaciones en distintas regiones [15]. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) resalta la disponibilidad de herramientas

de código abierto para procesar y visualizar grandes volúmenes de datos de sensores, reduciendo barreras para implementar redes de monitoreo comunitarias [16]. No obstante, trabajos sobre plataformas abiertas de hardware y ciencia ciudadana subrayan que la fiabilidad, el mantenimiento y la formación local son fundamentales para la sostenibilidad de estas iniciativas [17, 18]. Por ello, el proyecto publicará el firmware bajo una licencia abierta, documentará la API y establecerá un *pipeline* de datos transparente, además de incluir capacitaciones para usuarios, buscando maximizar el impacto educativo y social en la Región de Coquimbo y su escalabilidad al Norte Chico.

2.5. Hipótesis y resultados esperados de esta etapa muestral

H1: un *prototipo muestral* bien documentado + guía QA/QC + materiales didácticos aumenta la **alfabetización** en medición ambiental en aula.

H2: con **bajo costo** y **diseño abierto** se puede escalar gradualmente hacia piloto co-ubicado y, luego, **red barrial** con datos abiertos.

3. Análisis del entorno

3.1. PESTEL

- **Político:** avance del **PARCC Coquimbo** (gobernanza climática, educación ambiental, seguridad hídrica/energética) [31, 32, 33].
- **Económico:** restricciones presupuestarias en municipios y escuelas favorecen soluciones **costo-efectivas** y abiertas.
- **Social:** demanda por **participación** y educación basada en datos; proyectos escolares mejoran alfabetización científica [14].
- **Tecnológico:** sensórica *low-cost* viable para uso **indicativo** con calibración y QA/QC [11, 13, 12].
- **Ambiental:** **megasequía** persistente en Norte Chico [1, 2]; interés por microclima urbano y eventos de MP.
- **Legal:** **escasez hídrica** (DGA) y marco de calidad del aire; permisos de instalación (aplicables en futuras fases) [3, 4, 5].



Figura 2: Análisis PESTEL del contexto regional.

3.2. Fuerzas de Porter

- **Rivalidad:** baja–media; oferta comercial costosa vs. propuesta *open* educativa (no regulatoria).
- **Nuevos entrantes:** media; barreras tecnológicas moderadas, mayores en QA/QC y articulación territorial.
- **Sustitutos:** estaciones oficiales y satelitales; no entregan por sí solos **granularidad barrial** ni aprendizaje activo.
- **Poder de proveedores:** medio; variabilidad entre sensores *low-cost* exige selección y calibración [11].
- **Poder de clientes/usuarios:** medio–alto; sensibilidad a precio, soporte y **utilidad educativa**.



Figura 3: Fuerzas de Porter aplicadas al proyecto.

3.3. FODA

- **Fortalezas:** diseño abierto; costo accesible; modularidad; valor pedagógico; documentación de QA/QC.
- **Oportunidades:** alineamiento con **PARCC**; posible escalamiento a **red barrial** con energía solar (alto GHI) [7].
- **Debilidades:** sesgos por HR/temperatura y deri-

va; requiere **co-ubicación/calibración** para usos cuantitativos [11, 13].

- **Amenazas:** percepción pública si no se comunica el carácter *indicativo*; vandalismo en despliegues futuros; cambios normativos.



Figura 4: Matriz FODA de la iniciativa.

4. Planeación administrativa del proyecto (ampliada)

4.1. Objetivo general (OG)

Desarrollar un **prototipo muestral** (interior) de estación meteorológica y de calidad del aire con un *firmware de código abierto* y *plataforma de datos transparente*, documentando su **arquitectura**, **BOM**, **firmware**, **esquema de datos** y **lineamientos QA/QC**, junto con **materiales didácticos** introductorios, como base para etapas de **piloto co-ubicado** y **red barrial** en la Región de Coquimbo.

4.2. Objetivos específicos (OE) — claros y medibles

1. **OE1 — Prototipo físico de mesa:** ensamblar y verificar en banco un prototipo con BME280 (clima) y sensor óptico de MP (PM_{2,5}/PM₁₀), logrando **≥95 %** de *completitud de datos* en sesiones de 2–4 h. *Entregables:* BOM, esquema eléctrico, fotos y checklist de verificación.
2. **OE2 — Firmware y adquisición:** desarrollar un **firmware de código abierto** y un script de adquisición local (CSV/SQLite), que incluya un **diccionario de datos**, documentación de la API y marcado de *flags* de calidad (status), publicando el código en un repositorio abierto con licencia permisiva. *Entregables:* repositorio con código comentado, guía de uso y especificación de la API.

3. **OE3 — QA/QC v0.1:** redactar lineamientos de **aseguramiento y control de calidad** para usos *indicativos* (rango físico, %validez, reloj, bitácora; guía de co-ubicación futura). *Entregables:* documento QA/QC (2–3 págs) con checklist.

4. **OE4 — Visualización:** producir un **mock** de *dashboard* (estático) con 3 vistas mínimas: *serie temporal*, *resumen diario* y *tarjetas de variables*. *Entregables:* imágenes o HTML estático y breve guía.

5. **OE5 — Guía docente:** elaborar **2 actividades** de aula (una de *gráfica temporal* y otra de *comparación intra-aula*) con objetivos, materiales, pasos, preguntas guía y rúbrica corta. *Entregables:* PDF (2–3 págs).

6. **OE6 — Ruta de escalamiento:** definir hoja de ruta a *piloto co-ubicado* (sin ejecutarlo) y *red barrial* (alto nivel), incluyendo **prefactibilidad solar** (uso de GHI regional) y pasos de calibración relativa. *Entregables:* documento (2 págs) con hitos y supuestos.

7. **OE7 — Licenciamiento y datos abiertos:** proponer licencias abiertas adecuadas para el *software* (MIT o AGPL), el *hardware* y los *datos* (CC BY, ODbL), asegurando que el firmware, el diseño del hardware y el esquema de base de datos sean reutilizables y auditables; y elaborar una **política de datos** con metadatos, actualizaciones, control de versiones y acceso mediante API pública. *Entregables:* archivos LICENSE y DATOS.md, junto con documentación de acceso abierto.

4.3. Alcance (de esta etapa muestral) — límites claros

Incluye:

- Prototipo **muestral** de interior (sin exposición ambiental).
- Documentación técnica (BOM, esquemas, firmware), **esquema de datos** y QA/QC v0.1.
- **Mock** de visualización y **guía docente** (2 actividades).
- Nota de **viabilidad y escalabilidad** (ruta a piloto y red; prefactibilidad solar y co-ubicación).

Fuera de alcance (ahora):

- Pruebas de campo, piloto urbano y publicación

de datos abiertos en producción.

- Energía solar definitiva y comunicaciones inalámbricas.
- Carcasa exterior IP y validación metrológica completa.

Planificación (Carta Gantt)

La planificación se estructura con hitos de arquitectura HW/SW, firmware, prototipo físico, web beta, pruebas y calibración, y redacción del paper. La carta Gantt se presenta en la Figura 5.



Figura 5: Carta Gantt del proyecto.

Criterios de aceptación (para cierre del Avance 1)

- **CA1:** prototipo en banco operando con $\geq 95\%$ de completitud en sesión de 2–4 h (log de adquisición + checklist).
- **CA2:** documentación mínima: BOM, esquema, diccionario de datos y guía QA/QC v0.1.
- **CA3:** mock de dashboard con 3 vistas y guía docente con 2 actividades.
- **CA4:** ruta de escalamiento y propuesta de licenciamiento/datos abiertos entregadas.

Supuestos, restricciones y riesgos (síntesis)

Supuestos: acceso a laboratorio/aula; disponibilidad de PC para adquisición local; horarios coordinados.

Restricciones: sin pruebas de campo; componente low-cost con sesgos; tiempo acotado del semestre.

Riesgos y respuesta:

- *Deriva/sesgo sensor MP:* uso **indicativo**, QA/QC v0.1 y guía de co-ubicación futura [13, 12].
- *Fallas de adquisición y registro:* pruebas unitarias, %validez y almacenamiento redundante (CSV + bitácora).
- *Sobrecarga del equipo:* dividir tareas por OE y

cierre incremental de entregables.

Identificación de recursos necesarios

Humanos: 6 estudiantes (ICI/ICCI) y roles invitados para QA-QHSEC, legal y análisis de datos.

Tecnológicos:

ESP32-S3, BME280, DHT22 y SCD4x; sensor óptico de MP; fuente USB; materiales de carcasa.

Financieros: estación piloto estimada entre **CLP 100.000–150.000**, considerando sensores, microcontrolador y materiales básicos.

Localización del proyecto

Se propone un **piloto en la Universidad Católica del Norte, Campus Guayacan**, con montaje en azotea o área techada, acceso a energía, resguardo físico y permisos municipales. El sitio permite control de ingreso y vínculo directo con actividades STEM. Coordenadas de referencia del campus: $-29,9593$, $-71,3232$.

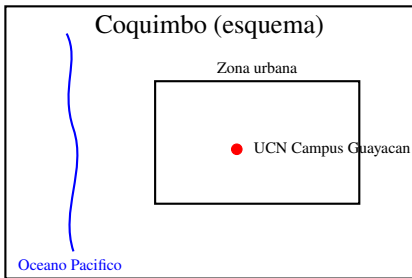


Figura 6: Localización esquemática del piloto en UCN Campus Guayacan, Coquimbo.

5. Sustentabilidad y cumplimiento

Estrategias de sostenibilidad

El proyecto prioriza **energía solar** en fases futuras, reutilización de materiales para carcasa y **ciencia ciudadana** como base de apropiación local. Se alinea con ODS 13 y con la **NDC de Chile** al aportar datos para adaptación climática [19].

Estrategias de producción limpia

Se aplican principios de producción limpia con herramientas de ingeniería: **ecodiseño** (modularidad y reparación), matriz de prevención de residuos y **ACV simplificado** (ISO 14040) para priorizar mejoras en materiales y transporte. Se seleccionan componentes de bajo consumo, se reduce residuo electrónico y se planifica logística con traslados mínimos y soldadu-

ra sin plomo. Estas acciones traducen compromisos climáticos a mejoras operativas, en línea con APL y normativa de producción limpia [20, 21].

Huella de carbono e hídrica (estimación)

Huella de carbono: estimación preliminar de **15–20 kg CO₂e por estación/año** en fase de producción y transporte, calculada con enfoque GHG Protocol (alcances 2 y 3 simplificados). En operación se busca **emisión casi nula** mediante energía solar [22].

Huella hídrica: baja en producción (fabricación de componentes) y nula en operación; se reporta con la guía de Water Footprint Network para distinguir huella azul/verde/gris a nivel indicativo [23].

Economía circular y ecología industrial

Se adopta un enfoque circular con **carcasa reutilizable**, reemplazo de módulos y programa de recuperación de sensores. Se promueve la integración con talleres locales para reducir transporte y facilitar remanufactura, coherente con los principios de economía circular y ecología industrial revisados en el curso.

Sistema integrado Q-HSEC

El plan Q-HSEC integra calidad, seguridad, medioambiente y comunidad bajo referencia a ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001. Incluye: (i) protocolos de instalación segura, (ii) bitácora de mantenimiento, (iii) manejo responsable de residuos electrónicos, (iv) indicadores de incidentes, (v) verificación de calidad de datos con QA/QC v0.1 y (vi) revisión trimestral de cumplimiento. Indicadores propuestos: tasa de fallas por mes, % de registros válidos, % de mantenimiento ejecutado y % de residuos electrónicos gestionados correctamente [24, 25, 26].

Comunidad y entorno

El proyecto se implementa con **participación temprana** de comunidades educativas, talleres de alfabetización climática y publicación de datos abiertos. Se propone un plan de relacionamiento con: (i) reunión inicial con directivos y apoderados, (ii) taller bimestral con estudiantes, (iii) publicación mensual de reportes y (iv) canal de retroalimentación comunitaria. Indicadores: número de participantes, número de talleres y nivel de satisfacción (encuesta corta). La experiencia de conflictos socioambientales en Chile

refuerza la necesidad de transparencia, trazabilidad y co-diseño con actores locales.

Legislación vigente y cumplimiento

Ambiental: se considera la Ley 19.300 (SEIA, participación y responsabilidad por daño ambiental) y la Ley Marco de Cambio Climático 21.455, que orienta metas de mitigación y adaptación [29, 30]. Por la escala piloto, se anticipa que no requiere EIA, pero se revisan permisos y condiciones locales.

Administración y laboral: se consideran el Código del Trabajo (DFL 1/2003) y la Ley 16.744 sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales para garantizar seguridad y cumplimiento en actividades de montaje y operación [27, 28].

6. Arquitectura del sistema

El prototipo se organiza en tres capas que operan en un flujo continuo de datos: **(i) hardware sensórico** basado en ESP32-S3 y sensores ambientales; **(ii) firmware** que adquiere, valida y fusiona mediciones, y las envía por HTTP; y **(iii) backend local** que almacena los datos en formato JSONL y sirve una interfaz web para visualización básica. El ESP32 crea un punto de acceso Wi-Fi y el PC se conecta a esa red para recibir mediciones.

Flujo de datos

1. Lectura periódica de sensores (temperatura, humedad, presión, CO₂, GPS).
2. Fusión y cálculo de promedios, con estimación de incertidumbre.
3. Envío de JSON al backend por HTTP (POST).
4. Persistencia en mediciones.jsonl y actualización de API.
5. Visualización en página web con gráficos y estado del sistema.

7. Diseño de hardware y conexionado

El prototipo muestral es de interior y se alimenta desde USB. La selección de sensores prioriza bajo costo y disponibilidad, manteniendo redundancia para temperatura y humedad.

Componentes principales

- **ESP32-S3**: microcontrolador con Wi-Fi integrado.
- **BME280**: sensor para temperatura, humedad y presión; bus I2C (0x76/0x77).
- **DHT22**: temperatura y humedad (GPIO).
- **SCD4x**: CO₂, temperatura y humedad (I2C).
- **GPS**: posición y número de satélites (UART).

Pines y buses

- **I2C**: SDA = GPIO 17, SCL = GPIO 18.
- **DHT22**: DATA = GPIO 7.
- **GPS**: RX = GPIO 40, TX = GPIO 41 (Serial1 a 9600 bps).

Recomendaciones de montaje

- Evitar corrientes de aire directas y fuentes de calor puntuales.
- Mantener los sensores a la misma altura para coherencia de lectura.
- Separar el SCD4x de superficies que acumulen calor.
- GPS requiere cielo abierto para fijar satélites.

8. Firmware y lógica de medición

El firmware realiza lecturas frecuentes, acumula promedios y genera un JSON agregado que representa el estado oficial del último intervalo. Además, implementa un **auto-test** inicial para verificar la disponibilidad de sensores.

Frecuencias de muestreo

- Lectura de sensores cada 2 s, intervalo de medida INTERVALO_MEDIDA_MS = 2000.
- Envío de JSON agregado cada 20 s al backend local (INTERVALO_JSON_MS = 20000).

Fusión de temperatura y humedad

Se combinan tres fuentes (BME280, DHT22 y SCD4x). Si las lecturas son coherentes, se usa el

promedio; si hay dispersión, se prioriza el sensor más confiable.

- **Temperatura**: umbral de rango 2 °C. Si el rango ≤ 2 , se promedia; si no, se elige SCD4x > BME280 > DHT22. Incertidumbre base: 0.8 / 0.5 / 1.0 °C.
- **Humedad**: umbral de rango 10 %HR. Si el rango ≤ 10 , se promedia; si no, se elige SCD4x > BME280 > DHT22. Incertidumbre base: 3 / 3 / 5 %HR.

Estructura del JSON

El ESP32 genera un JSON con las variables fusionadas y metadatos. El backend agrega id y timestamp al persistir.

9. Backend, almacenamiento y visualización

El backend está implementado en Node.js con Express. Recibe JSON vía /api/mediciones, guarda cada medición en data/mediciones.jsonl y mantiene un buffer en memoria para respuestas rápidas. La interfaz web consume la API y grafica temperatura, humedad, presión y CO₂.

Endpoints principales

- **GET** /api/status: estado del servidor y última medición.
- **GET** /api/mediciones: listado completo o limitado con ?limit.
- **GET** /api/mediciones/ultimo: última medición almacenada.
- **POST** /api/mediciones: ingreso de nueva medición desde el ESP32.

10. Esquema de datos

El archivo JSONL contiene una medición por línea. Los campos principales y unidades se presentan en la Tabla 1.

11. Lineamientos QA/QC v0.1

Se propone un conjunto mínimo de controles para garantizar trazabilidad y calidad indicativa:

- **Rangos físicos**: validar intervalos plausibles

Cuadro 1

Campos del esquema de datos

Campo	Descripción / Unidad
temperatura_aire_celsius	Temperatura del aire fusionada (°C)
incertidumbre_temperatura_celsius	Incertidumbre estimada de temperatura (°C)
humedad_aire_porcentaje	Humedad relativa fusionada (%HR)
incertidumbre_humedad_porcentaje	Incertidumbre estimada de humedad (%HR)
presion_atmosferica_hPa	Presión atmosférica (hPa)
concentracion_CO2_ppm	Concentración de CO ₂ (ppm)
latitud_grados	Latitud (grados decimales)
longitud_grados	Longitud (grados decimales)
numero_satelites	Número de satélites GPS
timestamp	Fecha y hora ISO-8601 (agregado por backend)
id	Identificador incremental (agregado por backend)

(p.ej., temperatura –10 a 60 °C, humedad 0–100 %HR, presión 800–1100 hPa, CO₂ 350–5000 ppm).

- **Complejidad:** porcentaje de registros válidos por sesión y por sensor.
- **Consistencia temporal:** verificación de intervalos de muestreo y *gaps*.
- **Coherencia intersensor:** monitoreo del rango entre sensores para detectar deriva.
- **Bitácora:** registrar reinicios, fallas de red, cambios de ubicación y calibraciones.

12. Puesta en marcha y operación

Preparación

1. Conectar sensores según pines definidos.
2. Cargar firmware con BACKEND_URL ajustada a la IP del PC.
3. Conectar el PC a la red Wi-Fi creada por el ESP32.

Ejecución

1. Iniciar el backend en el PC (puerto 3001).
2. Verificar /api/status y la interfaz web.
3. Observar flujo de datos en mediciones.jsonl.

Limitaciones actuales

- Prototipo de interior, sin protección ambiental ni validación metrológica completa.
- Sensores de bajo costo requieren calibración por co-ubicación para usos cuantitativos.
- GPS puede no fijar posición en interiores.

13. Conclusiones

El enfoque **muestral** reduce riesgos y crea capacidades técnicas y pedagógicas pertinentes a la **realidad hídrica y climática** de Coquimbo. La evidencia regional (megasequía, escasez hídrica, cobertura limitada de estaciones) y el **alto potencial solar** fundamentan la **viabilidad** y el **impacto formativo** para una futura red abierta y **escalable** por etapas.

14. Referencias

Referencias

- [1] CR2 — Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. *Informe a la Nación: La megasequía en Chile*. Disponible en: <https://www.cr2.cl/megasequia/>.
- [2] CR2 (2015). *La megasequía 2010–2015: una lección para el futuro*. Disponible en: <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>.
- [3] Dirección General de Aguas (2025). *Decretos de Escasez Hídrica*. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/derechos-de-agua/proteccion-de-las-fuentes/decretos-de-escasez-2/>.
- [4] BCN (2025). *Decreto MOP N°75/2025: prórroga de escasez hídrica, Provincia de Elqui*. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/Navegar?idNorma=1215707>.
- [5] MMA (s. f.). *SINCA — Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire*. Disponible en: <https://sinca.mma.gob.cl/>.
- [6] MMA (s. f.). *SINCA — Estación La Serena*. Disponible en: <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/estacion/index/id/95>.

- [7] World Bank Group (s. f.). *Global Solar Atlas — Chile*. Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/download/chile>.
- [8] World Health Organization (2024). *Ambient air quality and health — Fact sheet*. Disponible en: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- [9] Health Effects Institute & IHME (2024). *State of Global Air 2024*. Disponible en: <https://www.healthdata.org/sites/default/files/2024-06/soga-2024-report.pdf>.
- [10] Morawska, L. et al. (2018). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment. *Atmospheric Environment*. OA: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6145068/>.
- [11] Karagulian, F. et al. (2019). Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere*, 10(9):506. <https://www.mdpi.com/2073-4433/10/9/506>.
- [12] Watne, Å.K. et al. (2021). Tackling Data Quality When Using Low-Cost Air Quality Sensors in Citizen Science. *Frontiers in Environmental Science*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2021.733634/full>.
- [13] Giordano, M.R. et al. (2021). From low-cost sensors to high-quality data: challenges and best practices for calibrating PM sensors. *Preprint/Review*. https://www.researchgate.net/publication/352956639_From_low-cost_sensors_to_high-quality_data.
- [14] Barros, N. et al. (2023). SchoolAIR: A Citizen Science IoT Framework Using Low-Cost Sensors in Schools. *Sensors*, 24(1):148. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/148>.
- [15] Smart Citizen (s. f.). *Smart Citizen: plataforma abierta de monitoreo ambiental*. Disponible en: <https://smartcitizen.me/>. Consultado en: abril de 2024.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency (s. f.). *Air Sensor Data Tools*. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-data-tools>. Consultado en: abril de 2024.
- [17] Parker, A., Dosemagen, S., Hoeberling, K., & Novak, A. (2023). *Open Science Hardware: A Shared Solution to Environmental Monitoring Challenges*. Science & Technology Innovation Program, The Wilson Center. Disponible en: https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/media/uploads/documents/STIP_230501%20Open%20Science%20Hardware%20V3.pdf. Consultado en: abril de 2024.
- [18] Buytaert, W., Dussaillant, A., & Aguilar, F. (2024). *Leveraging open hardware for community-based monitoring, innovation, and capacity development*. AGU Fall Meeting Abstract. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024AGUFMSY41E2609B/abstract>. Consultado en: abril de 2024.
- [19] Ministerio del Medio Ambiente (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile*. Disponible en: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020.pdf.
- [20] Instituto Nacional de Normalización (2024). *NCh2797:2024 Acuerdos de Producción Limpia*. Norma técnica chilena.
- [21] International Organization for Standardization (2006). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- [22] Greenhouse Gas Protocol (2011). *Corporate Value Chain (Scope 3) Standard*. Disponible en: <https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>.
- [23] Water Footprint Network (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. Disponible en: <https://waterfootprint.org/en/resources/publications/water-footprint-assessment-manual/>.
- [24] International Organization for Standardization (2015). *ISO 9001: Quality management systems – Requirements*.
- [25] International Organization for Standardization (2015). *ISO 14001: Environmental management systems – Requirements with guidance for use*.
- [26] International Organization for Standardization (2018). *ISO 45001: Occupational health and safety management systems – Requirements with guidance for use*.
- [27] Biblioteca del Congreso Nacional (2003). *DFL I: Código del Trabajo*. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=207436>.
- [28] Biblioteca del Congreso Nacional (1968). *Ley 16.744: Seguro Social contra Riesgos de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales*. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28650>.
- [29] Biblioteca del Congreso Nacional (1994). *Ley 19.300: Bases Generales del Medio Ambiente*. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>.
- [30] Biblioteca del Congreso Nacional (2022). *Ley 21.455: Ley Marco de Cambio Climático*. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177091>.

- [31] Gobierno Regional de Coquimbo (s. f.). *Plan de Accion Regional de Cambio Climatico (PARCC) Coquimbo*. Documento institucional.
- [32] Gobierno Regional de Coquimbo (s. f.). *Acta de avances y gobernanza del PARCC Coquimbo*. Documento institucional.
- [33] Gobierno Regional de Coquimbo (s. f.). *Anteproyecto del PARCC Coquimbo*. Documento institucional.