

Tipo de artículo: Artículo original
Temática: Desarrollo de aplicaciones informáticas
Recibido: 11/12/2017 | Aceptado: 22/01/2018

Arquitectura tecnológica IoT para la trazabilidad de productos frescos

Technological architecture IoT for the traceability of fresh products

Néstor Eliécer Manosalva Barrera *, Libia Denisse Cangrejo Aljure

Universidad Nacional de Colombia. Av. Carrera 30 No. 45-03 Edificio 453 Oficina 110, Bogotá Colombia.
{nemanosalvab, ldcangrejoa}@unal.edu.co.

*Autor para correspondencia: nemanosalvab@unal.edu.co

Resumen

La trazabilidad de productos frescos implica la implementación, desarrollo y aplicación de los avances tecnológicos como herramientas de soporte en los nuevos procesos que utilizan y adecúan los conceptos clásicos para facilitar el seguimiento a lo largo de las cadenas de suministro. Los avances tecnológicos permiten la implementación de nuevos instrumentos de medición, sensores y dispositivos de comunicación para entregar datos en tiempo real sobre el estado de variables como temperatura, humedad, localización, pitch and roll (giroscopio), entre otros. Utilizando estas variables es posible aumentar la visibilidad de los procesos y generar un mayor volumen de datos para identificar las condiciones que afectan a los productos frescos que no están cubiertos por los enfoques tradicionales de trazabilidad. Esta investigación aborda estos aspectos a través de la consolidación de la arquitectura del sistema IoT, que incluye la adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis y presentación de datos al usuario.

Palabras clave: big data, computación en la nube, DSS, logística, IoT (Internet of Things), sistemas embebidos, trazabilidad.

Abstract

The traceability of farm products implies the development and application of new processes that use and appropriate technological advances based on the classical concepts of traceability to facilitate the tracking along supply chains. Technological advances allow the implementation of new measuring instruments, sensors and communication devices in order to deliver data regarding the status of variables such as temperature, humidity, location (GPS), pitch and roll (gyroscope) in real-time. Using those variables it is possible to increase the visibility of processes and generate a

greater volume of data that can be used to identify conditions that affect fresh products which are not covered by traditional approaches of traceability. This research addresses those aspects through the consolidation of IoT system architecture including data acquisition, storage, processing, analysis and presentation to the end user.

Keywords: *big data, cloud computing, DSS, embedded systems, IoT (Internet of Things), logistics, traceability*

Introducción

Esta investigación se enfoca en el estudio del Internet de las Cosas (IoT por sus siglas Internet of Things), en el ámbito de la cadena de suministro de productos frescos en Colombia, representa algunos resultados parciales de la tesis de Maestría “Construcción de un modelo de plataforma IoT para la trazabilidad del proceso logístico de la fresa dentro del corredor tecnológico agroindustrial Bogotá-Cundinamarca”. En primer lugar, el estudio inicia con la caracterización del proceso logístico de estos productos para obtener los requerimientos funcionales del sistema junto con el modelo de datos. Posteriormente, se realiza un estudio de los protocolos y dispositivos de sensado utilizados en IoT, herramientas requeridas para las etapas de captura, envío y procesamiento de datos, con el fin de construir un prototipo de sistema de trazabilidad. De la implementación propuesta se espera generar analíticas que permitan identificar las posibles causas de pérdida de calidad de los productos, buscar correlaciones y patrones a partir de del análisis de los datos y, finalmente, generar canales de comunicación entre los actores, productos y procesos.

Materiales y métodos o Metodología computacional

La investigación comprende las etapas, definición de diseño experimental, planeación de trabajo de campo, selección de actores y locaciones, construcción de la propuesta de arquitectura de sistema de trazabilidad, adquisición de equipos y dispositivos, construcción de prototipo del sistema de trazabilidad, experimentación, reporte de resultados y análisis. Se hace uso de la metodología de Desarrollo Orientado a Prototipos (DOP) para la construcción de la propuesta de sistema de trazabilidad, ya que permite un desarrollo rápido bajo ciertas restricciones, como tiempos y costos bajos, pero que al final permite obtener un modelo del comportamiento parcial o total del sistema, habilita la evaluación adecuada de los requerimientos funcionales principalmente y, paralelamente, probar las opciones de diseño propuestas.

Justificación

El propósito de este trabajo de investigación es desarrollar una solución tecnológica de trazabilidad según el paradigma IoT. A través de la captura, almacenamiento, transmisión y procesamiento de datos, paralelo al desarrollo

del proceso logístico, se busca dar solución a algunas problemáticas del sector como falta de control y monitoreo, poca coordinación entre actores, altos tiempos de respuesta, carencia de la historia de los productos, entre otros. Mediante la revisión de la literatura y estudios de casos se encuentra elementos regulatorios, la calidad, aspectos sociales y económicos (Bagshaw and Ledger, 2000). J. Rene Villalobos menciona la importancia de los registros históricos, que en este contexto radica en la generación de análisis predictivos, con el fin de conocer la demanda del consumidor antes de cosechar y que los actores tengan un proceso de producción más efectivo para dar respuesta a las dinámicas cambiantes de los mercados. De la misma manera, los registros históricos de las condiciones meteorológicas permiten delimitar temporal y espacialmente zonas idóneas de siembra, es decir, variables que puedan incidir en el rendimiento de los cultivos y que permitan realizar análisis predictivos en un Sistema para la toma de decisiones o DSS (en inglés, *Decision Support System*). Los Sistemas de Soporte para la toma de Decisiones también deben permitir la llegada a los mercados finales e identificar cuáles intermediarios agregan o quitan valor. Esta herramienta es motivadora de cambio para los procesos tradicionales. Contemplar aspectos estratégicos, tácticos y operativos contribuye con la obtención de mayores márgenes de ganancia. También es importante dar transparencia a los procesos y productos con el fin de generar relaciones de confianza con los consumidores (Ahumada and Villalobos, 2011). En resumen, incorporar módulos de oferta y demanda en donde productores y consumidores puedan tranzar operaciones, permitirá un aumento en la calidad y precio de los productos.

Por otro lado, en los últimos años se evidencia un crecimiento del IoT. Según pronósticos del IBSG (en inglés, *Internet Business Solutions Group*) se estimó que IoT nació entre el año 2008 y 2009, momento en el que el número de dispositivos conectados a internet era mayor que el de personas. Posteriormente, para el año 2010, la relación ya era de 1.84 dispositivos conectados a internet por cada persona, en comparación con datos del año 2003 donde la relación era de 0.08 (ver Figura 1). Un grupo de investigadores de China, con datos de routing de internet entre los años 2001 a 2006, encontraron datos similares a los pronosticados por la ley de Moore, mostrando que el número de dispositivos conectados a Internet se duplica cada 5.32 años. (Guo-Qing Zhang en PhysOrg.com, 2009).

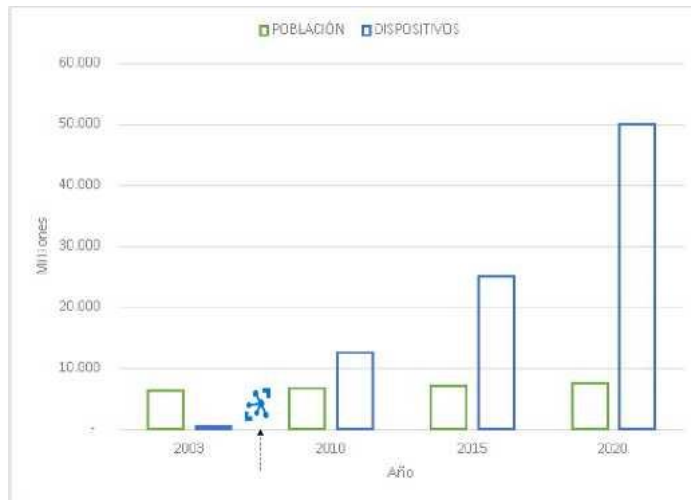


Figura 1. Nacimiento de IoT

Marco teórico

A. Logística de productos frescos

Los productos alimenticios perecederos están en riesgo de sufrir diversos daños a lo largo del proceso logístico. Los actores participantes deben controlar y supervisar las condiciones de los alimentos y garantizar la calidad e inocuidad (Jedermann et al., 2009). Las cadenas de suministro de alimentos actuales están compuestas por sistemas largamente distribuidos geográficamente, con procesos complejos y diversos requerimientos técnicos (Pang et al., 2015). Por lo anterior, se debe hacer énfasis en el desarrollo de interfaces amigables con el usuario, que requieran mínima interacción y de lectura y escritura rápida.

B. Trazabilidad

A pesar de que existen diversas definiciones de trazabilidad y que estas varían según el marco de referencia de los actores de la cadena, (Orjuela-Castro et al., 2017) mencionan que la definición de trazabilidad más aceptada es la que establecen la ISO y el reglamento 178/2002 de la Unión Europea. De acuerdo con esto, la trazabilidad se define como “la capacidad de rastrear y seguir un alimento, un pienso, un animal o una sustancia destinada a ser incorporada en un alimento en todas las etapas de producción, transformación y distribución” (Orjuela- Castro et al., 2017). Por su parte, (Lucia Rincón B et al., 2017) sugieren que un sistema de trazabilidad debe tener las siguientes características y propiedades:

Amplitud: Cantidad de datos o atributos recopilados y conectados a una unidad de rastreo que se debe encontrar asociada a un identificador único.

Profundidad: Se define como la información que se puede transferir entre cada eslabón de la cadena.

Precisión: Indica el grado de seguridad que le permite al sistema identificar un movimiento o característica particular de un producto.

Acceso: Velocidad con que la información puede ser comunicada en la cadena de suministro.

Fiabilidad de la identificación de la unidad de trazado: Identificación unívoca de la unidad trazable.

De igual manera, Lucía Rincón B et al. [2017] identifica algunos componentes con los que un sistema de trazabilidad debe contar para integrar las características mencionadas anteriormente. Estos son:

- Sistema de información centralizado
- Interfaces de entrada y salida como medios para el acceso y captura de la información
- Mecanismos para asociar productos y procesos a los propietarios
- Identificadores únicos para las unidades trazables mediante codificación estandarizada (GS1)

C. Internet de las cosas

IoT es el resultado de la convergencia y evolución de un conjunto de tecnologías como la computación ubicua o pervasiva, protocolos de internet, tecnologías de sensado y sistemas embebidos entre otros. Estas tecnologías forman un ecosistema en donde el mundo real y el mundo digital están en continua interacción simbólica [Borgia, 2014].

Internet de las cosas integra componentes como:

- Estándares de comunicación
- Interconexión de dispositivos
- Desarrollo de aplicaciones
- Sensores y actuadores

Este paradigma provee los medios, al permitir la obtención de datos a partir de billones de dispositivos que pueden sensar, enviar y tomar decisiones, para la problemática identificada en la logística actual de productos frescos en Colombia. A partir del estado de variables, se pueden generar registros estructurados, no estructurados o semi-estructurados, que tienen el potencial de generar cambios a partir de la información y conocimiento que se pueda obtener al procesar los datos. (Perera et al., 2014) mencionan el reto que representa lograr lo anterior debido la hetero-

geneidad y descubrimiento de los sensores, por lo que proponen soluciones como la creación de un middleware que permita que la conexión entre los sensores y la nube se haga de manera transparente.

a. Protocolos

Para la comunicación entre los nodos de la red y los periféricos y/o sensores se requieren protocolos ligeros, eficientes en cuanto a uso de recursos como batería, CPU, ancho de banda, entre otros. Producto de la revisión bibliográfica se identifican algunas tecnologías como candidatas para ser implementadas. Las tecnologías de comunicación representan los canales mediante los cuales las cosas se pueden comunicar y así permitir la conexión de dispositivos heterogéneos para la creación de servicios. El propósito de los estándares es facilitar y simplificar la integración entre las aplicaciones, los servicios y demás componentes que hagan parte de una solución tecnológica. IoT no es la excepción: organizaciones como la W3C, IETF, EPCGlobal, IEEE y la ETSI, entre otras, han propendido por esto (Al-Fuqaha et al., 2015). En la Figura 2 se presenta un resumen de los protocolos más utilizados, basados en el stack TCP/IP.

Protocolos de aplicación		DDS	CoAP	AMQP	MQTT	MQTT-NS	XMPP	HTTP REST
		Descubrimiento de servicios		mDNS	DNS-SD			
Protocolos de Infraestructura	Ruteo	RPL						
	Capa de red	6LoWPAN	IPv4/IPv6					
	Capa de enlace	IEEE 802.15.4						
	Capa física	LTE-A	EPC global	IEEE802.15.4	Z-Wave			

Figura 2. Protocolos de comunicación. Fuente: Adaptado de Al-Fuqaha et al. [2015]

Los estudios de (Karagiannis et al., 2015) realizan un diagnóstico y evaluación de los protocolos más utilizados por IoT, junto con sus principales diferencias (ver la tabla 1) puntualmente de la capa de aplicación del modelo de referencia OSI. Esta evaluación fue motivada por “el hecho de que una arquitectura unificada de IoT no ha sido aun claramente definida y no hay acuerdo común en la definición de protocolos y estándares para todas las partes del IoT”. Con el anterior estudio de protocolos, se puede evaluar cuáles son los adecuados para esta implementación, según el resultado del levantamiento de requerimientos.

Tabla 1. Cuadro comparativo de protocolos. Fuente: Tomado de [Karagiannis et al., 2015]

PROTOCOLO	TARNSPORTE	QoS	Arquitectura	Seguridad	2G,3G,4G(1000s)	Recursos de computo	LowPower and Lossy (1000s)
CoAp	UDP	SI	Req/Resp	DTLS	Excelente	10Ks/RAM Flash	Excelente
MQTT	TCP	SI	Req/Resp	TLS/SSL	Excelente	10Ks/RAM Flash	Bueno
XMPP	TCP	NO	Req/Resp, Pub/Sub	TLS/SSL	Excelente	10Ks/RAM Flash	Pobre
REST	HTTP	NO	Req/Resp	HTTPS	Excelente	10Ks/RAM Flash	Pobre
WebSocket	TCP	NO	Pub/Sub	HTTP			

b. Computación

Tal como lo menciona (Al-Fuqaha et al., 2015), la capacidad de cómputo representa el cerebro de las cosas, al proveer capacidad de procesamiento y almacenamiento. A continuación, se listan algunas de las alternativas comerciales más populares y que son comúnmente utilizados para desarrollos de productos IoT. La capacidad de cómputo es importante en entornos donde los canales de acceso a la nube son deficientes, debido a la falta de cobertura de redes de datos.

c. Arquitecturas

Como modelo de representación, (Pang et al., 2015) sugieren la utilización de una arquitectura de 3 capas, basada en IoT, para la gestión de la cadena de suministro en la que se presenta también una división a nivel de procesos (ver figura 5). De igual manera, (Al-Fuqaha et al., 2015) mencionan algunas otras arquitecturas emergentes (ver figura 3), en donde se pueden apreciar las capas de percepción, redes y aplicación de la arquitectura de 3 capas, que se seleccionó como modelo para esta solución tecnológica. En el modelo de representación propuesto, se evidencia una de las principales características de IoT, en la que cada objeto físico tiene una representación virtual a través de una adecuada infraestructura de red y de cómputo que la soporte, tal como se puede ver en la Figura 5.

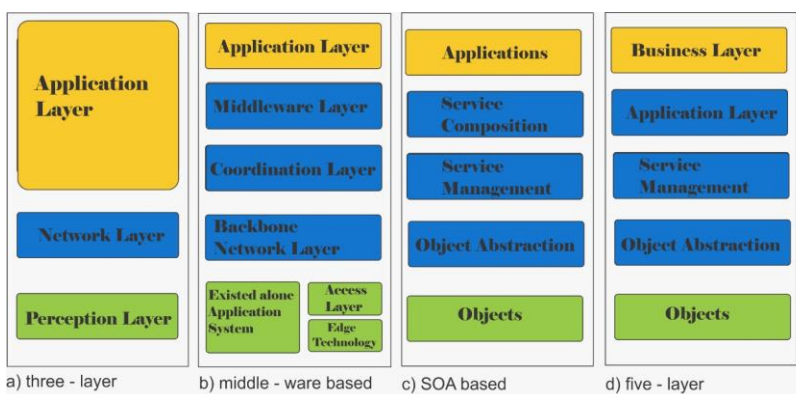


Figura 3. Arquitecturas IoT. Fuente: Tomado de Al-Fuqaha et al. [2015]

Construcción del prototipo de arquitectura

Mediante la implementación de un conjunto de nodos, se realiza la captura de datos, transmisión, procesamiento y posterior presentación según su contexto, ya que el procesamiento se podría dar previamente a la transmisión. Se utiliza como referencia la Figura 6 y se sigue un enfoque de IoT EDGE o Internet de las Cosas en el borde. A continuación, se describe la tipología de los nodos desarrollados según los lineamientos de la arquitectura propuesta y la capa en la que se encuentran.

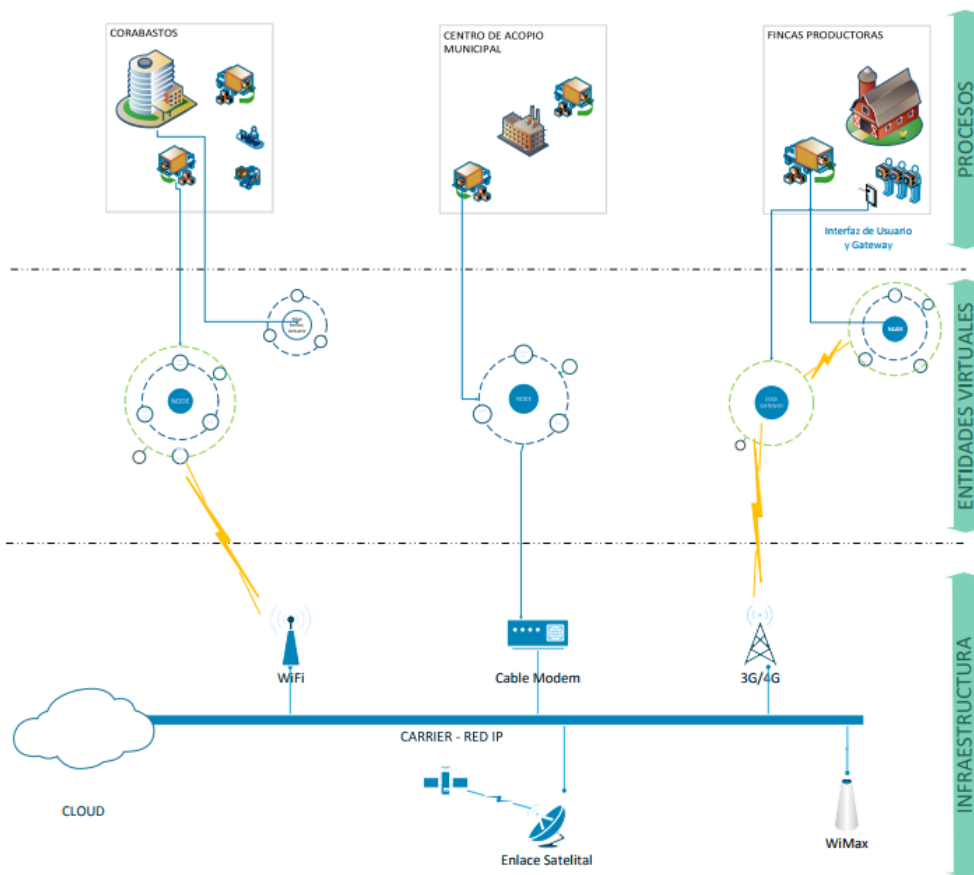


Figura 5. Modelo de representación

Tipologías de nodos

La figura 6 hace referencia a los protocolos e interfaces utilizados por los nodos IoT. Los nodos EDGE Gateway requieren el uso de interfaces definidas bajo el estándar IEEE 802.15.4, ya que proveen la definición a nivel físico, al mencionar aspectos de señalización, codificación, voltajes. También provee control del acceso al medio

direccionamiento a nivel de capa MAC2 y LLC3. Esto habilita el tráfico sobre IP para los protocolos de aplicación MQTT y REST utilizados para el envío de datos capturados por los nodos IoT hacia la nube. Como SBC (en inglés, *Single Board Computers*) se ha seleccionado la referencia Raspberry PI 3 (ver Figura 7) porque representa la alternativa comercial más atractiva de procesamiento y almacenamiento en dispositivos embebidos, por su fácil adquisición, comercialización, configuración y mayor compatibilidad en el mercado. Esta referencia soporta los protocolos UART, i2c y onewire, utilizados por los módulos GPS, NFC + ADXL345 y DHT22 respectivamente.

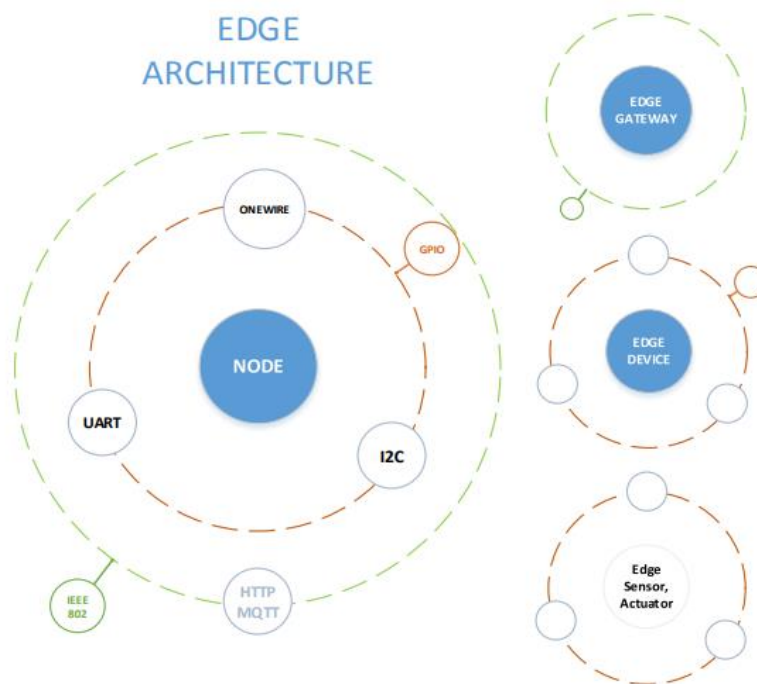


Figura 6. Tipología de Nodos

A. Capa de sensado

En la primera capa (sistemas embebidos y sensores), el dispositivo Raspberry sensa de manera digital las lecturas de las variables a través de un conjunto de sensores instalados para la captura de datos crudos o raw data que servirán como insumo para los diferentes servicios proveídos por la solución tecnológica en la nube. Siguiendo el enfoque de IoT EDGE, se realiza la configuración de los protocolos de aplicación para la conexión entre el dispositivo y los servicios AWS, CARTO y PUBNUB, dado que node-red soporta el stack REST-full, utilizado por el dispositivo para el envío de registros con una frecuencia ajustable en formato json el cual contiene las lecturas de toda la sensórica. El dispositivo, también provee una página web4 para acceder desde una tablet o Smartphone que haga la función de

estación base de una red wifi para el dispositivo Edge Device. Sobre la capa de sensado actúan en conjunto los siguientes componentes:

- **EDGE DEVICES:** Es un dispositivo de propósito general que soporta sistemas operativos para dispositivos embebidos. En cuanto a la fuente poder, no es de gran autonomía debido a su alta movilidad. Toma decisiones a partir de los cálculos que realiza sobre los datos de entrada tomados de los sensores, puede ejecutar comandos sobre los actuadores.
- **EDGE SENSOR Y ACTUADOR:** Comprende dispositivos de propósito especial o particular, no soportan la ejecución de sistema operativo. Pueden ser:

Ambientales

Sensor de humedad y temperatura - DHT22

Acelerómetro y giroscopio - ADXL345

Georreferenciación

Módulo de GPS - Adafruit Fona SIM808

Comunicaciones

Conexión a redes wifi - Adaptador 801.11

Conexión a redes GSM - Adafruit Fona SIM808

Autenticación

NFC - SL030

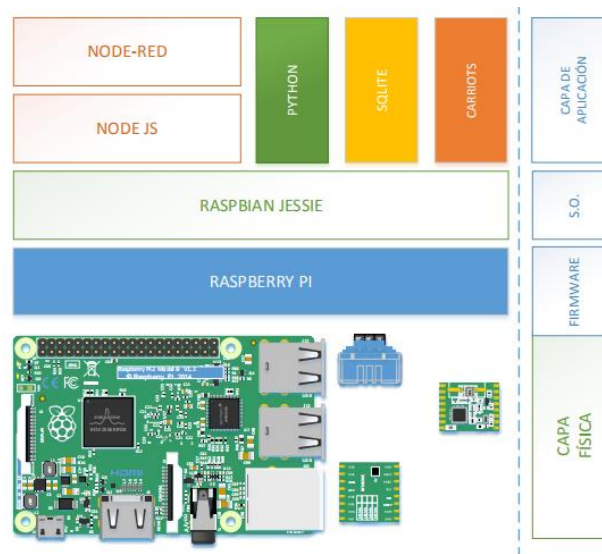


Figura 7. Arquitectura de Nodo

B. Capa de red

El rol de gateway o puerta de enlace para el modelo de arquitectura es asumido por cualquier dispositivo que permita la opción de creación de puntos de anclaje WiFi y que, por medio del respectivo ISP, le dé al nodo salida a internet. Dada la heterogeneidad, amplitud y profundidad de la arquitectura propuesta algunos nodos, dependiendo de la disponibilidad de redes de telefonía celular, tendrán la capacidad de hacer uso de módulos GSM para el envío y recepción de datos en Internet sin depender de otros nodos. En la figura 8 se puede apreciar la topología de red compatible con la presente solución tecnológica. Esta topología hace uso de diferentes mecanismos de conexión a la red, partiendo desde WiFi, redes de telefonía celular hasta enlaces satelitales con el propósito de alcanzar los servicios alojados en la nube.

- **EDGE GATEWAY:** Comprende dispositivos con capacidad de procesamiento, almacenamiento, memoria y fuente de poder de alta capacidad, soporta sistema operativo. Puede ser cualquier dispositivo que permita la opción de creación de puntos de anclaje WiFi.

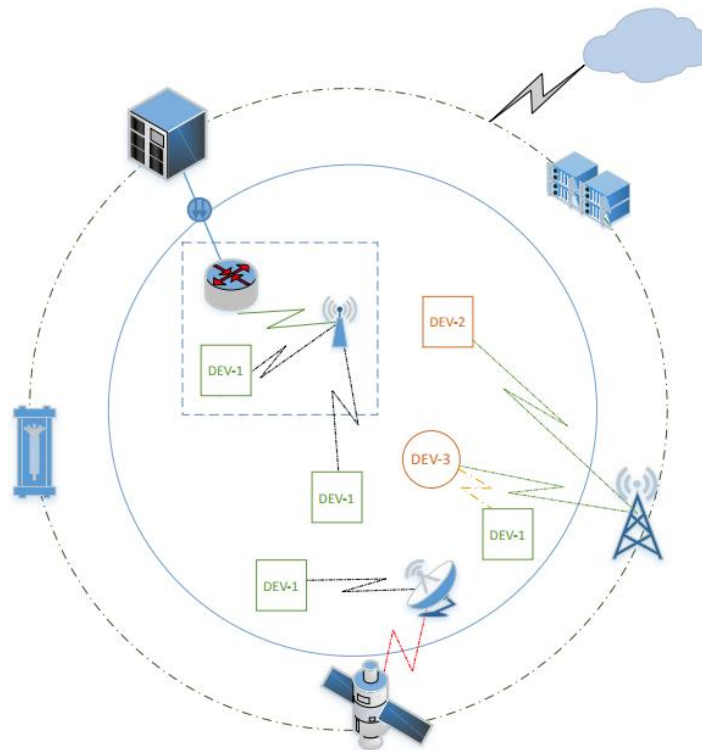


Figura 8. Topología

C. Capa Cloud

Esta capa provee los microservicios del DSS, aprovisionado sobre infraestructura de Amazon, la visualización y generación de indicadores en la plataforma CARTO y la generación de dashboard o tablero de control. Están orientados a la localización en PUBNUB-eon, conectado a Mapbox por medio de un esquema de publicación y suscripción similar al utilizado por MQTT, tal como se puede apreciar en la Figura 9. De forma experimental se usa la herramienta IniaitalState para construir un histórico de registros sobre línea de tiempo. A los microservicios creados por estas plataformas acceden los EDGE *devices* de la capa de sensado para el envío de los registros almacenados en sus memorias locales, aprovechando las capacidades de almacenamiento y procesamiento de estos nodos.

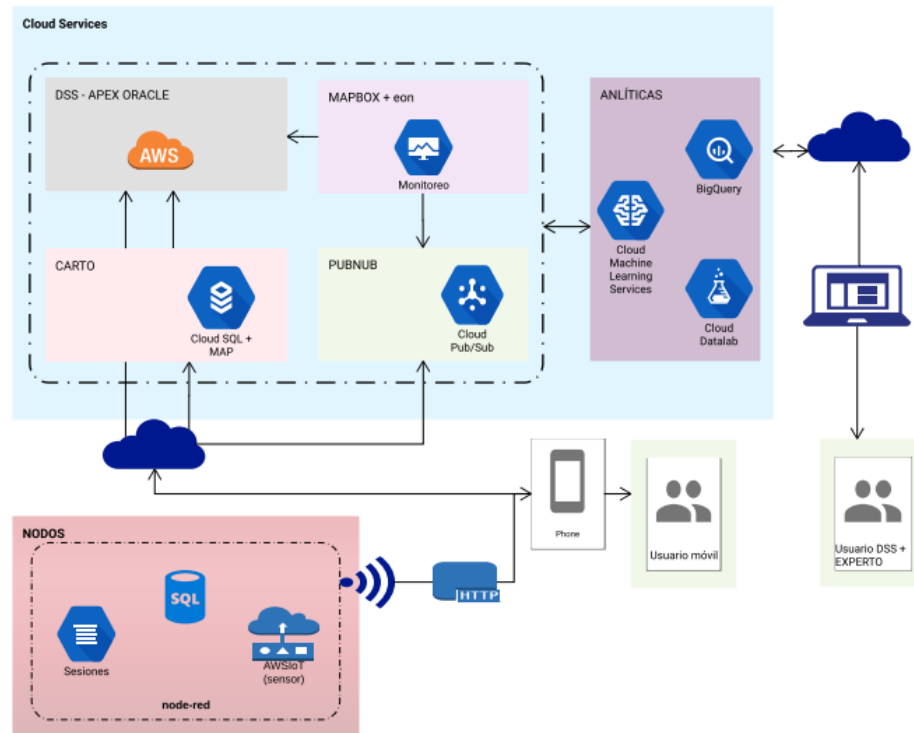


Figura 9. Arquitectura de referencia

Conclusiones

En la Figura 10 se pueden apreciar algunas vistas de las interfaces de usuario, tanto de la aplicación en la nube como del servicio de página web publicado por el *EDGE DEVICE*, (ver subsección 6.2), desde el cual el usuario transportista se puede conectar para visualizar el estado de las diferentes variables monitoreadas por los nodos. Las conclusiones listadas a continuación son resultado directo de los procesos de visualización y generación de analíticas de los servicios web mencionados en la sección 6.4.

- El sistema tiene la capacidad de recuperar la historia del producto, desde la puerta de la finca hasta la llegada al centro de acopio mayorista. En términos de autonomía, realizados varios recorridos, se encuentra en aproximadamente 24 horas con una batería de 10400 mAh. Las pruebas encuentran que el dispositivo tiene capacidad de operación en modo offline, que compara las horas de captura de los datos en los nodos con la hora de registro en el aplicativo en la nube.
- Del prototipo desarrollado y aplicado se concluye que la arquitectura de trazabilidad es una alternativa apropiada para convertirse en una tecnología habilitante al permitir la recuperación de la historia del proceso,

paralelamente a la gestión de la cadena de suministro. También se encuentra la correlación que existe entre los altos niveles de golpeteo registrados por el acelerómetro y giroscopio en las vías secundarias y terciarias, al igual que bajas velocidades en estos tramos.

- En términos de temperatura y humedad, existe una alta correlación entre los datos de temperatura y humedad en el microclima de la carrocería y el exterior, posiblemente porque se trata de carrocerías tipo estacas. En algunos momentos se registran valores de temperatura que están por fuera de los rangos recomendados.

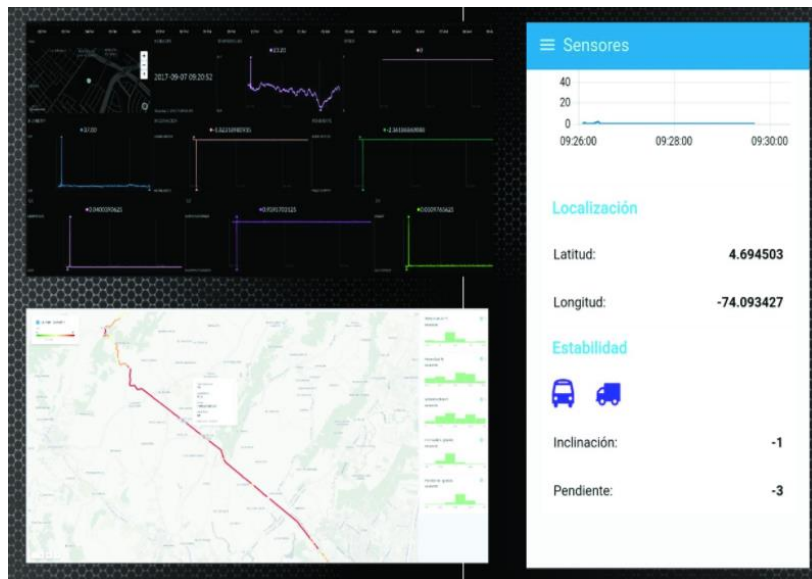


Figura 10. Interfaces de usuario

Referencias

- [Ahumada and Villalobos, 2011] Ahumada, O. and Villalobos, J. R. (2011). A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Ann Oper Res*, 190:339-358.
- [Al-Fuqaha et al., 2015] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., and Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4):2347-2376.
- [Bagshaw and Ledger, 2000] Bagshaw, J. and Ledger, S. (2000). Quality management systems in Australian vegetable and fruit industries. *Preface 11 Opening Address 12*.

- [Borgia, 2014] Borgia, E. (2014). The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54:1-31.
- [Jedermann et al., 2009] Jedermann, R., Ruiz-Garcia, L., and Lang, W. (2009). Spatial temperature profiling by semi-passive RFID loggers for perishable food transportation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2):145-154.
- [Karagiannis et al., 2015] Karagiannis, V., Chatzimisios, P., Vazquez- Gallego, F., and Alonso-Zarate, J. (2015). A Survey on Application Layer Protocols for the Internet of Things. *Transaction on IoT and Cloud Computing*.
- [Lucia Rincón B et al., 2017] Lucia Rincón B, D., Esteban Fonseca Ramirez, J., and Arturo Orjuela Castro, J. (2017). Towards a Common Reference Framework for Traceability in the Food Supply Chain. Hacia un Marco Conceptual Común Sobre Trazabilidad en la Cadena de Suministro de Alimentos. *Revista Ingeniería Universidad Distrital*.
- [Orjuela-Castro et al., 2017] Orjuela-Castro, J. A., Herrera-Ramírez, M. M., and Adarme-Jaimes, W. (2017). Warehousing and transportation logistics of mango in Colombia: A system dynamics model. *Revista Facultad de Ingeniería (Rev. Fac. Ing. Enero-Abril)*, 26(44):71-84.
- [Pang et al., 2015] Pang, Z., Chen, Q., Han, W., and Zheng, L. (2015). Value-centric design of the internet-of-things solution for food supply chain: Value creation, sensor portfolio and information fusion. *Information Systems Frontiers*, 17(2):289-319.
- [Perera et al., 2014] Perera, C., Jayaraman, P. P., Zaslavsky, A., Georgakopoulos, D., and Christen, P. (2014). Sensor discovery and configuration framework for the Internet of Things paradigm. In *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 94-99. IEEE.
- [PhysOrg.com, 2009] PhysOrg.com (2009). Internet Growth Follows Moore's Law Too.