

APLICACIÓN SIG MÓVIL PARA REGISTRO EN LA NUBE Y VISUALIZACIÓN DE DAÑOS EN LA RED VIAL COSTARRICENSE

Ing. Gabriel Jesús Corrales Jiménez^{1,*}

¹Universidad de Costa Rica

Recibido: 30-08-2024

Aceptado: 25-10-2024

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v15i2.19630>

RESUMEN

Costa Rica se ubica en una zona de alta vulnerabilidad, afectada por el impacto de fenómenos naturales que ocasionan serios daños en la infraestructura vial. Este artículo explica el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica que permite registrar y visualizar los daños en la infraestructura de la Red Vial Nacional ocasionados por fenómenos naturales, mediante software de acceso gratuito. El sistema cuenta con tres componentes: una aplicación móvil para el reporte en campo de los daños, un servicio en la nube para el almacenamiento de estos datos y una aplicación web para su visualización. La aplicación móvil se programó utilizando el paquete de desarrollo de software de código abierto *Flutter*, de *Google*; el almacenamiento de los datos obtenidos con la aplicación se implementó en la plataforma *Firebase* a un nivel gratuito de servicio; y la aplicación web de visualización fue desarrollada a partir de capas de puntos en formato *GeoJSON*, mediante el paquete *Shiny* de *R*. Este ejercicio permitió evidenciar algunas de las ventajas del formato *GeoJSON* frente a los *shapefile*, el formato vectorial de datos espaciales más utilizado tradicionalmente. Como resultado, se generaron nuevas herramientas para planificar la atención de daños causados por eventos naturales en la Red Vial Nacional y mejorar la eficiencia de las inversiones públicas, lo que beneficia a la sociedad costarricense en términos económicos y de seguridad vial.

Palabras clave: SIG, infraestructura vial, aplicación móvil, almacenamiento en la nube, visor web.

ABSTRACT

Costa Rica is located in a highly vulnerable area, affected by the impact of natural phenomena that cause serious damage to road infrastructure. This article explains the development of a Geographic Information System that allows recording and visualizing damages in the infrastructure of the National Road Network (Red Vial Nacional or RVN) caused by natural phenomena, by means of free software. The system has three components: a mobile application for field damage reporting, a cloud service for data storage and a web application for visualization. The mobile application was programmed using Google's open-source software development package *Flutter*; the storage of the data obtained with the application was implemented in the *Firebase* platform at a free service level; and the visualization web application was developed from *GeoJSON* points as layers, using the *R* package *Shiny*. This exercise made it possible to demonstrate some of the advantages of the *GeoJSON* format over *shapefiles*, the most traditionally used vector spatial data format. As a result, new tools were generated to plan the attention of damages caused by natural events in the National Road Network and to improve the efficiency of public investments, which benefits the Costa Rican society in terms of economy and road safety.

Keywords: GIS, road infrastructure, mobile application, cloud storage, web viewer.

*gcorralesj@gmail.com.

1 *Introducción*

La institución encargada de la construcción, rehabilitación y conservación de la Red Vial Nacional (RVN) en Costa Rica es el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). Esta institución debe llevar a cabo una planificación tal que permita priorizar la atención de los numerosos daños en la infraestructura vial ocasionados por eventos naturales.

La base de dicha planificación es la obtención en campo de datos como el tipo de daño, su ubicación, el elemento dañado, la magnitud del daño y el evento que lo originó. A partir de esto surgió la necesidad de lograr un proceso eficiente y seguro para el registro y la visualización de estos datos que no implicara una inversión de los recursos del CONAVI, en una época de intensificación de las dificultades económicas del país por consecuencia de la pandemia de Covid-19.

Esa necesidad llevó al planteamiento de la posibilidad de implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permitiera al CONAVI el registro y almacenamiento de datos de los daños en la infraestructura vial que incluyera un proceso automatizado de publicación en un visor web de estos datos mediante software gratuito.

Al no existir una única definición de SIG, este término puede ser empleado para referirse a cuestiones esencialmente distintas entre sí: se tiene SIG como disciplina, SIG como proyecto (cada una de las implementaciones técnicas de la disciplina SIG) y SIG como software (los programas que permiten el desarrollo de esta disciplina y la implementación de sus proyectos) ([del Bosque González et al., 2012](#)).

Sin embargo, una definición completa y precisa es la de un SIG como un sistema integrador de tecnología informática, personas e información geográfica para capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados ([Olaya, 2020](#)).

Partiendo de esa definición, el objetivo del proyecto que se aborda en este artículo fue el desarrollo de un SIG que permita al CONAVI registrar y visualizar los daños causados por eventos naturales en la infraestructura de la RVN de Costa Rica sin necesidad de pagar por licencias de software.

Para alcanzar ese objetivo fue necesario programar una aplicación móvil que permitiera el reporte de los datos de campo, implementar una base de datos para el almacenamiento de esta información y desarrollar una aplicación web para visualizarla en su dimensión geoespacial.

Los usuarios del primer componente del SIG formarán parte del personal del CONAVI que cuente con la capacidad técnica y el criterio para realizar este tipo de reportes de campo a partir de una aplicación móvil. La administración de la base de datos corresponderá al personal de oficina que cuente con la formación necesaria para realizar esta función y los usuarios finales del sistema serán los funcionarios encargados de la planificación del CONAVI, quienes, para la toma de decisiones, se apoyarán en el visor web y en una capa de puntos *GeoJSON* generada por el sistema.

Este proyecto tiene un alcance físico de nivel nacional, ya que el SIG será utilizado para el registro de daños en la RVN, formada por el conjunto de vías administradas por el Estado a través del CONAVI. Por lo tanto, el sistema no contempla las rutas de administración municipal, que forman parte de la Red Vial Cantonal.

La aplicación móvil para el reporte de datos de campo se programó en *Flutter*, un paquete de desarrollo de software o *Software Development Kit* (SDK) de código abierto desarrollado por *Google* para la creación de aplicaciones móviles nativas multiplataforma, sin embargo, la aplicación desarrollada en este proyecto se encuentra disponible únicamente para dispositivos *Android*.

También se recurrió a un producto de *Google* para la implementación de la base de datos: *Firebase*, la plataforma para el desarrollo de aplicaciones, que permite la utilización de servicios de almacenamiento y bases de datos *NoSQL* en la nube (Younis, 2021).

La aplicación web de visualización, el tercer componente de este SIG, se implementó mediante el paquete *Shiny* de *R*, que utiliza la biblioteca *Leaflet* para incluir funcionalidades geoespaciales y consiste en un *dashboard* o tablero que permite la visualización de la ubicación e información actualizada de los reportes de daños realizados desde la aplicación móvil.

A continuación se presenta un resumen de la metodología del proyecto, los requerimientos del sistema, el desarrollo de la aplicación móvil utilizada en el registro de los datos de campo, el almacenamiento de esos datos, el desarrollo de la aplicación web de visualización y otras funcionalidades del sistema como la gestión de usuarios, un proceso de optimización de imágenes que se implementó para reducir los requerimientos de almacenamiento y el envío de los reportes por correo electrónico.

Para ampliar en cualquiera de esos puntos se recomienda revisar el Trabajo Final de Investigación Aplicada que se encuentra publicado en el siguiente enlace: <https://kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/90365>.

2 Metodología

La metodología de este proyecto se introduce a partir del esquema metodológico de la Figura 1, que inicia con los requerimientos del sistema y finaliza con la elaboración de las recomendaciones para su implementación.

2.1 Definición de los requerimientos del sistema

En el CONAVI el registro de los daños causados por eventos naturales consistía en un procedimiento que iniciaba cuando el personal de campo obtenía las coordenadas de cada punto a partir de dispositivos receptores GNSS (Sistema Global de Navegación Satelital) y posteriormente registraba estas coordenadas y los datos adicionales en hojas de cálculo para enviarlos por correo electrónico, junto con fotografías de los daños, al personal de oficina encargado de la recopilación de los registros de todo el país.

Con el fin de sistematizar estas tareas se llevó a cabo un proceso de etnografía, uno de los enfoques de la ingeniería de requerimientos de software que consiste en la inmersión del analista en el entorno laboral donde se utilizará el sistema (Sommerville, 2005), ya que el autor del proyecto abordado en este artículo en ese momento formaba parte de la unidad del CONAVI encargada de recibir y recopilar los datos registrados manualmente por el personal de campo.

Este proceso de definición de requerimientos comprendió la realización de visitas de campo para el levantamiento de datos en sitio y una serie de reuniones con el personal de campo y con los encargados de la toma de decisiones que eventualmente serían los usuarios finales del sistema.

De esa manera se definieron los requerimientos funcionales, que consisten en las declaraciones de los servicios que debía proporcionar el sistema y la forma como debe reaccionar o no en situaciones particulares (Sommerville, 2005); los requerimientos no funcionales, que se refieren a las restricciones de tiempo, del proceso de desarrollo y de estándares que se aplican a algunas características del sistema (Sommerville, 2005); y la descripción detallada de cada uno de los datos requeridos en el sistema desde su levantamiento en sitio hasta su visualización en una aplicación web.

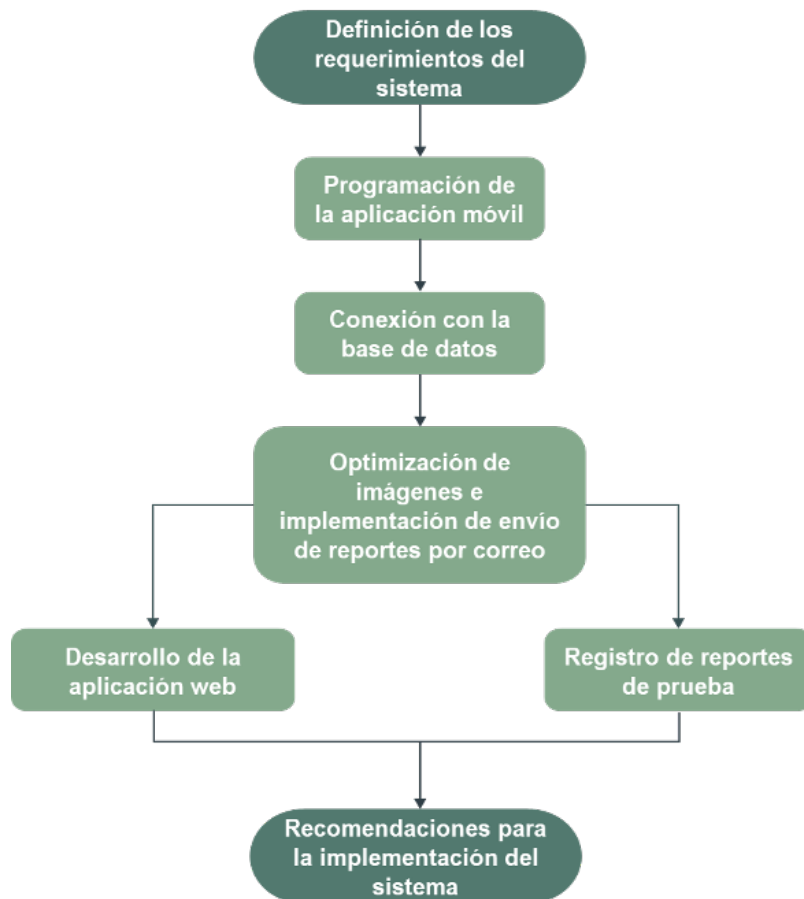


Figura 1: Esquema metodológico aplicado al desarrollo del sistema.

2.2 Programación de la aplicación móvil para registro de datos de campo

La aplicación móvil para el registro de datos de campo fue programada mediante el SDK de código abierto *Flutter*, que utiliza el lenguaje de programación *Dart* y permite la programación de los elementos de la aplicación móvil mediante el uso de aplicaciones de archivos livianos conocidas como *widgets*. Por estas características se le atribuye el alto rendimiento de sus productos y la reducción de complejidad en comparación con otras herramientas.

Las funciones más utilizadas y la información visual de la aplicación móvil fueron programadas utilizando *widgets* y su desarrollo se ligó a la estructura de la base de datos definida mediante los requerimientos del sistema y que almacenará los datos de campo. *Flutter* permite la conexión de manera sencilla con las bases de datos no relacionales de la plataforma *Firebase* (tanto *Flutter* como *Firebase* son productos de *Google*), a través de paquetes o bibliotecas de acceso libre.

El código fuente de esta aplicación se escribió en el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) *Visual Studio Code* y en este proceso se utilizó *GitHub* como sistema de control de las distintas versiones del código para facilitar la recuperación de versiones anteriores y el respaldo de los archivos.

2.3 Conexión con la base de datos

En este proyecto se optó por la base de datos *Firestore Database* de la plataforma *Firebase*, una base de

datos no relacional o NoSQL, que significa “*Not Only SQL*” o “*No Solo SQL*”, ya que este tipo de bases de datos no hace uso del lenguaje de consultas SQL (Acens, 2014). *Firestore* es una base de datos con almacenamiento en la nube que no contiene tablas ni filas, sino que se orienta a documentos (Younis, 2021). Cada documento cuenta con un conjunto de pares clave-valor donde se almacenan los datos. Estos documentos a su vez se organizan en colecciones.

Adicionalmente, junto con *Firestore* se utilizó también el servicio *Firebase Storage* para el almacenamiento en la nube de las fotografías generadas por la aplicación móvil.

La conexión de la aplicación móvil con *Firestore* y *Storage* se realizó mediante el uso de paquetes de *Flutter* que permiten la ejecución de acciones desde el código fuente de la aplicación. Esta combinación dio como resultado la posibilidad de que los datos de los reportes de daños en la RVN se envíen desde la aplicación hasta la base de datos a través de una conexión a Internet.

2.4 Optimización de imágenes e implementación de envío de reportes por correo

Como parte de los requerimientos del sistema se definió la necesidad de que la aplicación permitiera la captura de dos a diez fotografías en cada reporte de daños. Con el fin de reducir los requerimientos de almacenamiento se implementó un proceso de optimización de estas imágenes que dio como resultado una importante reducción de su peso sin sacrificar su calidad.

Ese proceso fue posible mediante la utilización de la extensión *Resize Images* de *Firebase*, en combinación con ciertos ajustes en el código fuente de la aplicación de *Flutter*. De esta manera se logró reducir el peso de las fotografías a menos de 150 *kilobytes* (kB) en todos los casos, lo que se traduce en un aumento general en la eficiencia del sistema.

Adicionalmente, se implementó el envío de correos electrónicos con la información de los reportes de daños y los enlaces de descarga de las fotografías, que se muestra en la Figura 2. Este proceso se realiza de forma automática cuando se añade un documento a la colección de la base de datos *Firestore*, es decir, cada vez que se finaliza un reporte de daños en la aplicación móvil.

Esa implementación se llevó a cabo utilizando la extensión *Trigger Email from Firestore* de *Firebase*, junto con sencillos ajustes en el código fuente de la aplicación de *Flutter*. Los correos electrónicos pueden ser dirigidos a cada usuario de campo de la aplicación móvil, a sus superiores jerárquicos o al personal de oficina que administrará el sistema.

2.5 Desarrollo de aplicación web para la visualización de los datos

Esta aplicación consiste en una página web que se ejecuta desde los servidores en la nube del sitio *shinyapps.io* y da acceso a un tablero compuesto de herramientas para facilitar la visualización, lectura y filtrado de los datos de cada daño reportado en la RVN desde la aplicación móvil.

La implementación de esta aplicación web se llevó a cabo mediante el paquete *Shiny* de *R*. *R* es un lenguaje de programación enfocado en el análisis estadístico que, por tratarse de un proyecto de software libre, facilita el desarrollo de paquetes como *Shiny*, que es utilizado para la implementación de aplicaciones web interactivas con funcionalidades geoespaciales (Vargas, 2021).

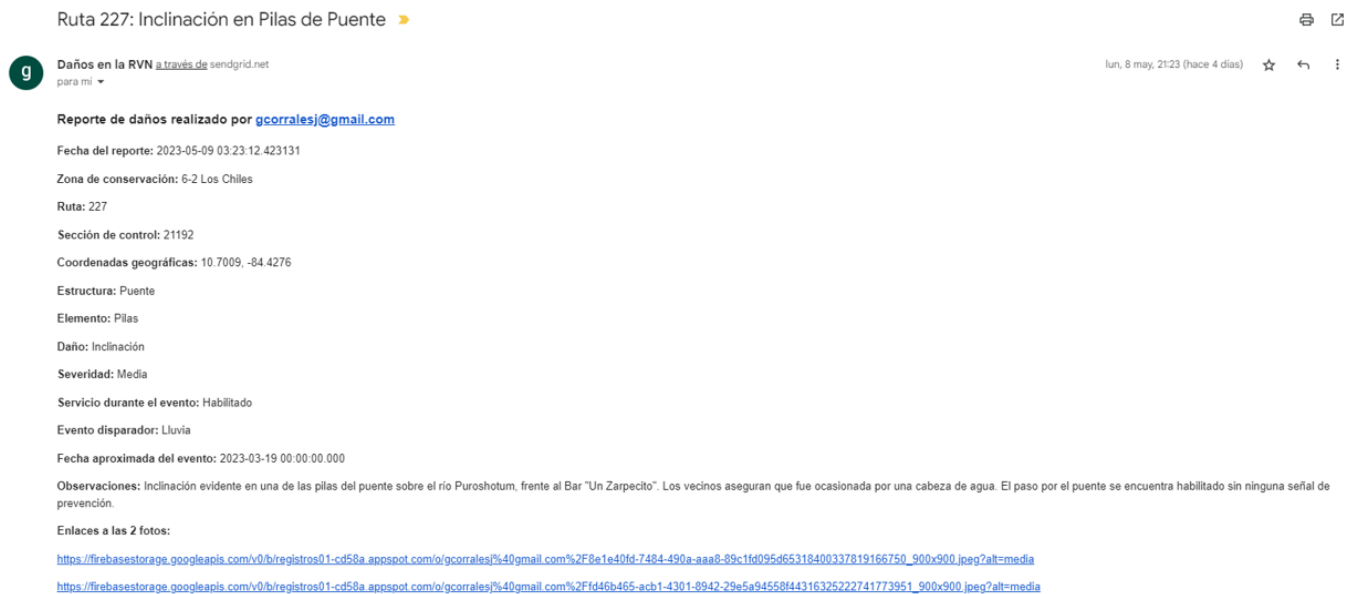


Figura 2: Ejemplo de envío de reportes por correo electrónico.

Una de las principales funcionalidades geoespaciales aprovechadas por esta aplicación web es el uso de mapas base de la plataforma *OpenStreetMap*, un proyecto de datos abiertos para crear y proveer gratuitamente mapas e información espacial (Bennett, 2010). En estos mapas se despliega una capa de puntos georreferenciada sobre el territorio nacional que se almacena en la base de datos *Firestore* en formato *GeoJSON*. Esta capa es la que permite la consulta y visualización de los daños reportados en la RVN.

2.6 Registro de reportes de prueba

Este proyecto pasó por una etapa de registro de reportes de daños ficticios para probar el funcionamiento del sistema, simulando las condiciones del uso de la aplicación móvil que experimentarían los eventuales usuarios en el campo.

Para realizar los reportes es necesario activar el sistema de ubicación de los dispositivos móviles y contar con acceso a Internet durante el proceso de obtención de coordenadas y el de la finalización del registro para su almacenamiento en la base de datos en la nube. El proceso de obtención de coordenadas debe realizarse de manera estática, es decir, no deben tomarse puntos mientras el dispositivo se esté desplazando de un lugar a otro.

Algunos de los reportes de prueba se realizaron en espacios cerrados a lo interno de edificaciones. Esta condición no se presentaría en la vida real para el reporte de daños en la RVN. Sin embargo, esto no debe considerarse un error metodológico, pues de esta manera se determinó que los resultados en estos casos fueron satisfactorios en términos de la exactitud en la ubicación.

Los dispositivos móviles no cuentan con la exactitud de los equipos especializados de navegación satelital, pero para la ubicación de los daños en la RVN, objetivo de este proyecto, no se requiere una mayor exactitud que la disponible en los dispositivos móviles con los estándares tecnológicos actuales.

Dado que los sistemas de ubicación de los dispositivos móviles se apoyan en redes satelitales, las condiciones en espacios abiertos que se presentarían en escenarios de reportes de daños reales contarán con una mayor exactitud en su ubicación.

3 Resultados

De los tres componentes del sistema desarrollado, se consideran en la sección de resultados la aplicación móvil y la aplicación web de visualización, dado que el servicio en la nube para el almacenamiento de datos no forma parte de la experiencia de usuario, sino que es un elemento de apoyo de los otros dos componentes, que se explicación a continuación.

3.1 Aplicación móvil

La aplicación móvil permite el registro en campo de los daños en la RVN causados por eventos naturales. Para cada uno de los datos requeridos en la realización de estos reportes existe una pantalla específica, como se explica a continuación.

3.1.1 Fotografías

La primera parte de los reportes en aplicación móvil es la que permite al usuario la captura de las fotografías del sitio donde se presentó el daño. Como parte de sus requerimientos funcionales, el sistema debe permitir la captura de entre dos y diez fotografías en cada reporte. Este rango se muestra como mensaje en la primera pantalla de la aplicación (Figura 3):

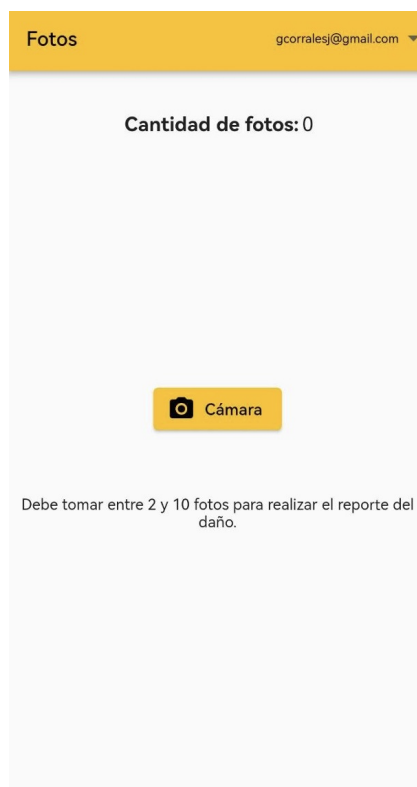


Figura 3: Pantalla de inicio del reporte antes de la toma de fotografías.

En cada oportunidad, la aplicación presentará una vista previa de la fotografía por tomar, de manera que el usuario pueda confirmarla o rechazarla.



Figura 4: Vista previa de la fotografía por tomar.

Una vez iniciado este proceso, la aplicación presentará en pantalla la cantidad de fotografías tomadas, así como una vista previa en miniatura de cada una (Figura 4). A partir de la segunda fotografía también presentará las opciones de avanzar hacia la siguiente pantalla o de reiniciar el proceso para eliminarlas y empezar la captura desde cero, como se muestra en la Figura 5.

Al finalizar el proceso de toma de fotografías, el usuario podrá avanzar presionando el botón "Siguiete" para continuar con la pantalla "Estructura".

3.1.2 Estructura

La pantalla "Estructura" permite al usuario el registro del tipo de estructura en la que se presenta el daño reportado de acuerdo con la clasificación utilizada por el CONAVI, mediante un menú desplegable donde se selecciona uno de cuatro diferentes tipos: carretera, puente, alcantarilla mayor y puente peatonal (Figura 6).

En las siguientes dos pantallas de la aplicación las opciones desplegadas en el menú se encuentran en función del tipo de estructura elegido, por tratarse de elementos de esta y el tipo de daño sufrido por ellos.

3.1.3 Elemento

La pantalla "Elemento" de la aplicación móvil es la que permite la selección del elemento dañado de la estructura seleccionada previamente, por tanto, los elementos que se muestran en la lista desplegable se encuentran en función del tipo de estructura.

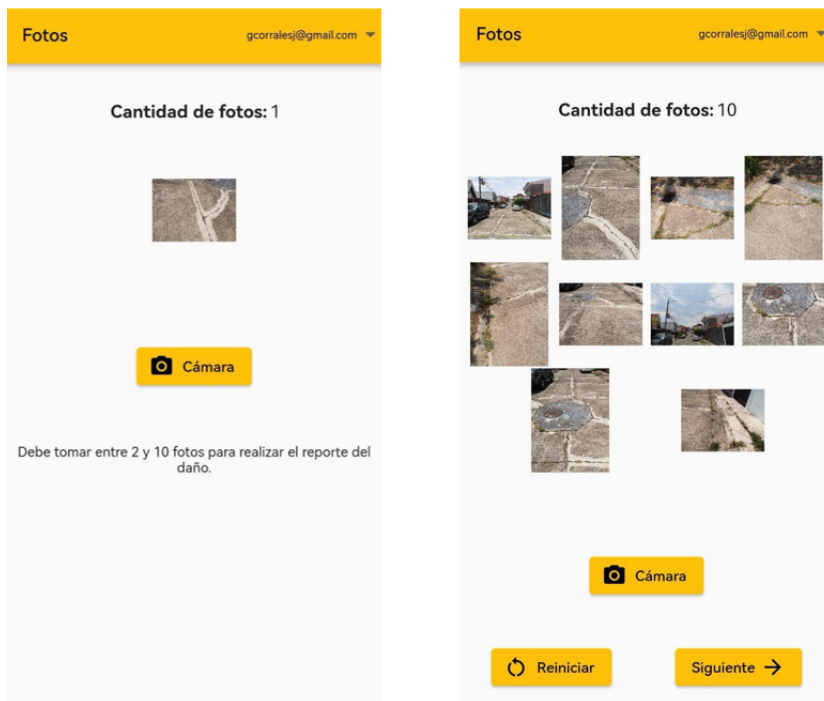


Figura 5: Pantallas del proceso de toma de fotografías.

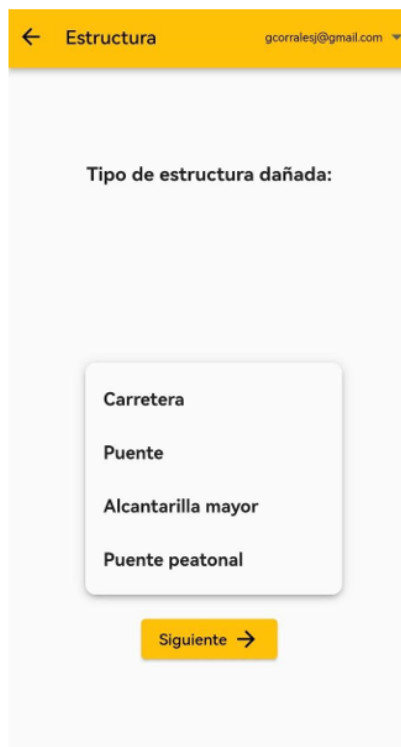


Figura 6: Pantalla de selección de la estructura dañada.

Esta es la primera de las pantallas en cuya sección superior se muestra un resumen de los datos obtenidos por la aplicación en las pantallas anteriores. Hasta este paso solo se ha seleccionado el tipo de estructura,

por lo que esta información se muestra en la esquina superior izquierda de la pantalla, como se muestra en la Figura 7:

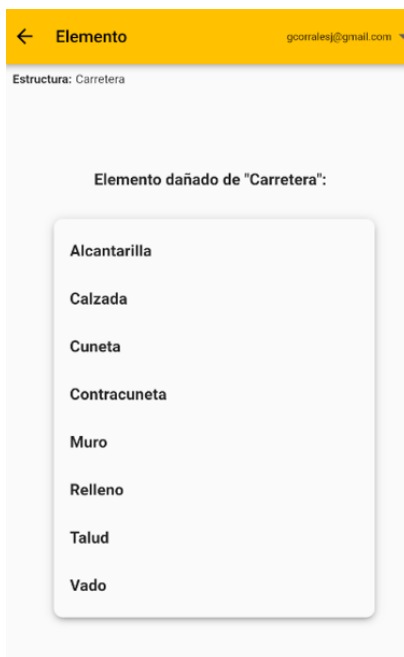


Figura 7: Pantalla de selección del elemento según la estructura.

De la misma manera en que el tipo de elemento se encuentra en función de cada estructura, el tipo de daño que puede sufrir un elemento es diferente en cada caso, como se explica a continuación.

3.1.4 Daño

En la pantalla "Daño" de la aplicación móvil se debe definir el tipo de daño del elemento de la estructura afectada por un evento natural en la RVN. Para esto, se debe seleccionar el tipo de daño de una lista desplegable que se muestra en función del tipo de elemento seleccionado previamente, según la clasificación de daños por elemento definida por el CONAVI (Figura 8).

Como se definió en los requerimientos funcionales, el sistema debe permitir el registro de la magnitud del daño registrado según el criterio del usuario, como se muestra en la siguiente pantalla.

3.1.5 Severidad

En la pantalla "Severidad" el usuario de la aplicación móvil debe realizar una valoración de la severidad del daño reportado como "Baja", "Media" o "Alta", seleccionando una de estas opciones, como se muestra en la Figura 9. Por lo tanto, es necesario que estos usuarios cuenten con formación técnica y experiencia en labores de atención de infraestructura vial, ingeniería civil o disciplinas similares, para realizar la evaluación preliminar de la magnitud de los daños que será registrada en estos reportes y así servirá como parte de los criterios de priorización en la atención de los daños.

Otro elemento de los criterios de priorización en la atención de los daños que se considera en esta aplicación, es la posible afectación en el servicio de la vía que pueda haber ocasionado el daño.

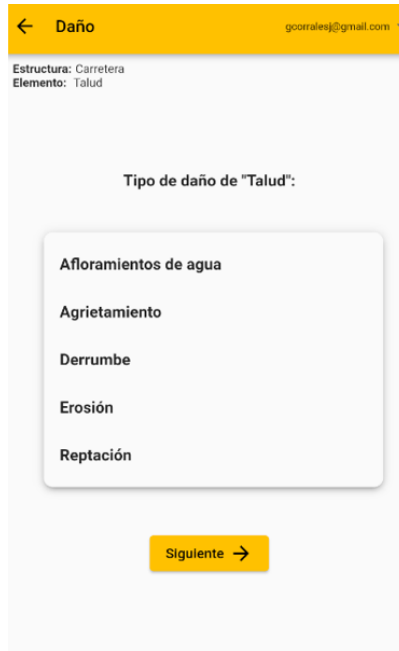


Figura 8: Pantalla de selección del daño según elemento.

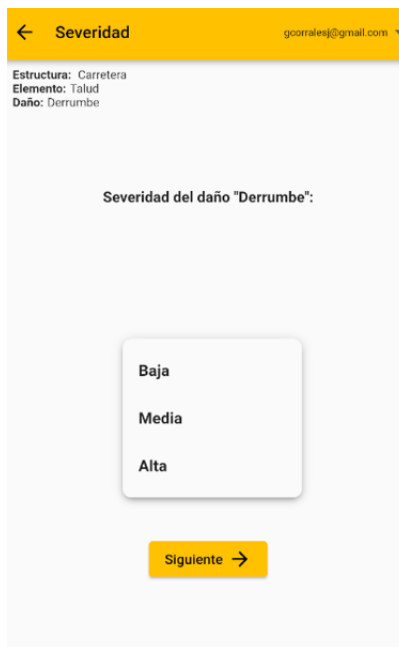


Figura 9: Pantalla de selección de la severidad del daño.

3.1.6 Servicio

En la pantalla "Servicio" el usuario de la aplicación debe registrar la afectación ocasionada por el daño en el servicio de la vía. El menú de esta pantalla únicamente despliega las siguientes tres opciones: "Habilitado" (el servicio siempre estuvo habilitado), "Regulado" (se dieron cierres parciales o paso regulado) o "Cerrado" (el daño ocasionó el cierre de la vía en algún momento), como se aprecia en la Figura 10.

Otro de los requisitos funcionales de este sistema es registrar el elemento disparador del evento natural

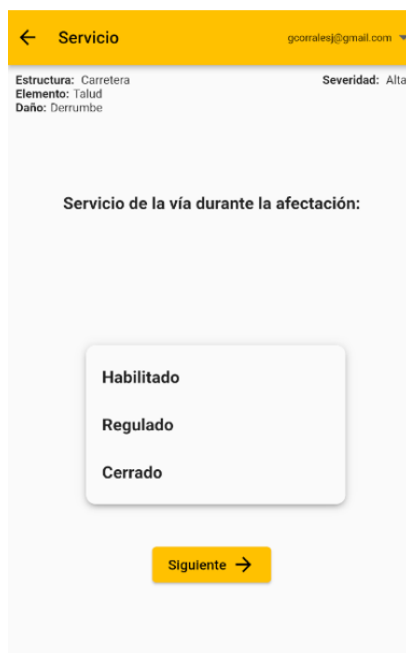


Figura 10: Pantalla de selección del estado del servicio de la vía.

que ocasionó el daño, para determinar su origen. Este requisito se aborda en la siguiente pantalla de la aplicación.

3.1.7 Evento

En la pantalla “Evento” el usuario de la aplicación debe seleccionar el tipo de evento natural desencadenante o disparador del daño reportado en la RVN, entre las siguientes cuatro categorías definidas por CONAVI: “Lluvia”, “Marea alta”, “Sismo” y “Vulcanismo”, que se muestran en la Figura 11.

Otro dato necesario para la realización de los futuros análisis sobre los daños en la RVN es la fecha en que se presentó el evento natural desencadenante de estos daños.

3.1.8 Fecha

En la pantalla “Fecha” el usuario de la aplicación móvil debe ingresar la fecha probable de la ocurrencia del daño en la estructura de la RVN. Es común que durante una visita de campo no se tenga certeza, sino un aproximado, de la fecha de ocurrencia del evento generador del daño, de ahí que esta pantalla solicite una fecha aproximada.

La fecha por defecto en la aplicación es la del día en que se realiza el reporte del daño y de esta manera aparece indicada en la pantalla (Figura 12). Para modificarla es necesario ingresar al calendario a través del botón del mismo nombre y seleccionar una fecha probable.

Además del tiempo, también se debe registrar el lugar en que se reporta el daño. El CONAVI divide al país en 22 zonas para facilitar la administración de la conservación vial de sus rutas nacionales. Este es el primer dato espacial que se registra en la aplicación, como se muestra a continuación.

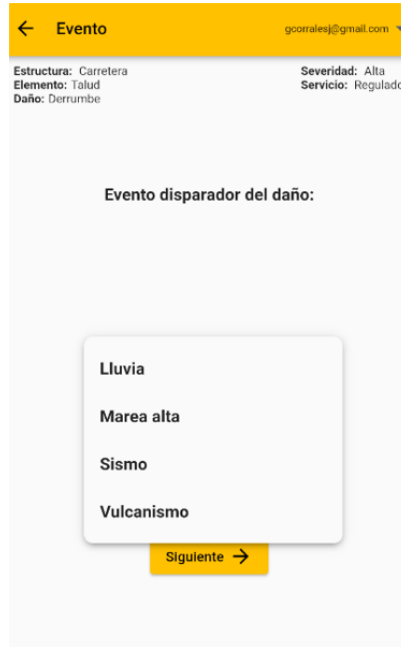


Figura 11: Pantalla de selección del evento disparador del daño.

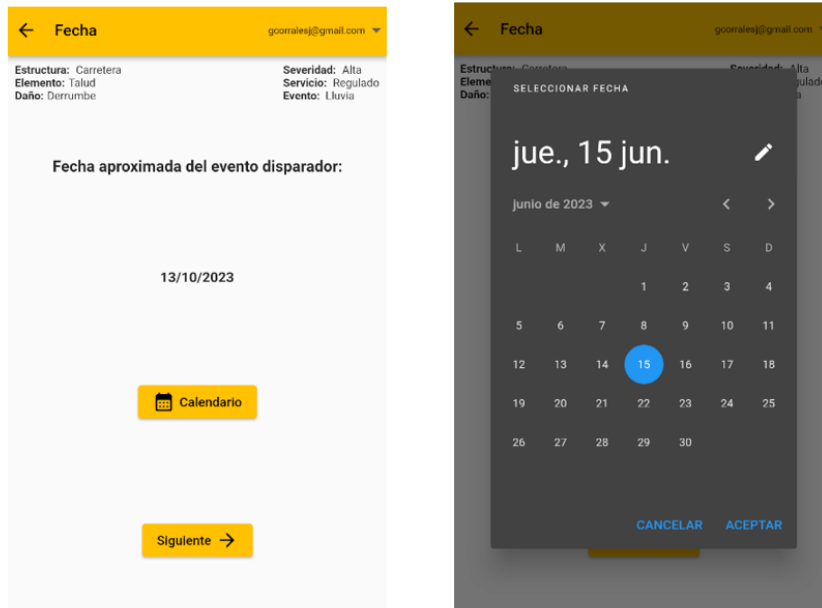


Figura 12: Pantalla de selección de la fecha aproximada del evento disparador.

3.1.9 Zona

En la pantalla "Zona" el usuario de la aplicación móvil debe seleccionar del menú desplegable la zona de conservación vial donde se ubica el daño reportado. Este menú presenta una lista con la numeración y el nombre de cada una de las 22 zonas de conservación del país. En la Figura 13 se muestra el menú con parte de estas zonas, al resto se accede mediante la barra de desplazamiento.

Dentro de estas zonas hay rutas nacionales locales y otras que atraviesan diferentes zonas, por lo que hay

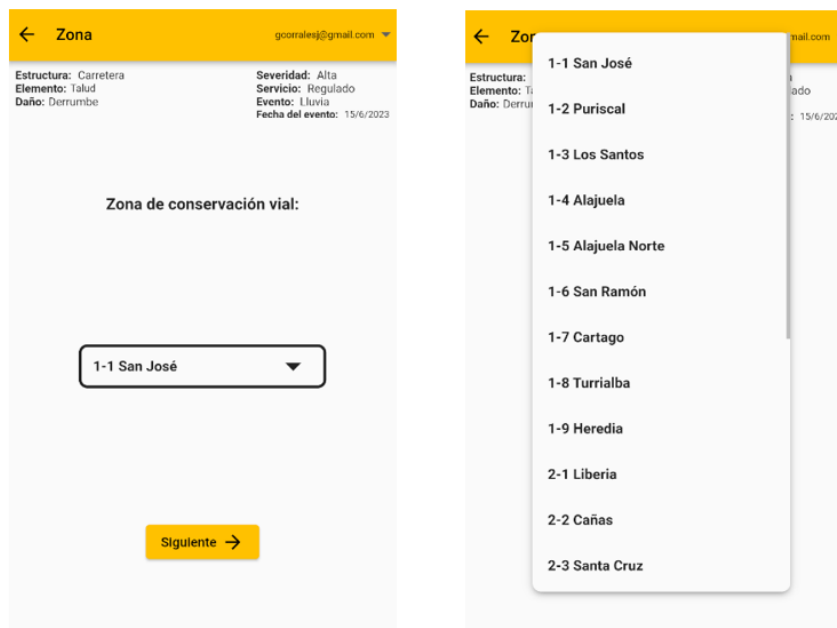


Figura 13: Pantalla de selección de la zona de conservación vial.

rutas compuestas por secciones que pertenecen a diferentes zonas de conservación. La ruta nacional es el siguiente registro en la aplicación.

3.1.10 Ruta

En la pantalla "Ruta" el usuario de la aplicación móvil debe seleccionar la ruta de la RVN donde se ubica el daño reportado de un menú desplegable con las rutas pertenecientes a la zona previamente seleccionada, como se muestra en la Figura 14.

El filtro de rutas por zona se programó en *Flutter* mediante la capa de la RVN utilizada por el CONAVI en su versión actualizada a noviembre de 2022. Esta capa cuenta con 1331 secciones de control, que son las unidades en las que se divide cada ruta y las cuales se registran en la siguiente pantalla de la aplicación.

3.1.11 Sección

En la pantalla "Sección" el usuario de la aplicación móvil debe seleccionar del menú la sección de control de la ruta de la RVN donde se ubica el daño reportado (Figura 15). La lista del menú se encuentra en función de la zona de conservación y de la ruta seleccionadas en las dos pantallas anteriores de la aplicación.

3.1.12 Ubicación

En la pantalla "Ubicación" de la aplicación móvil se obtienen las coordenadas del daño en el sistema de referencia de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326). El usuario debe activar los servicios de ubicación del dispositivo móvil, asegurarse de que este cuente con una conexión a Internet y mantenerse en un punto fijo para solicitar esta acción mediante el botón "Coordenadas". Una vez llevado a cabo este paso la aplicación muestra en pantalla los datos separados en latitud y longitud, como se aprecia en la Figura 16.

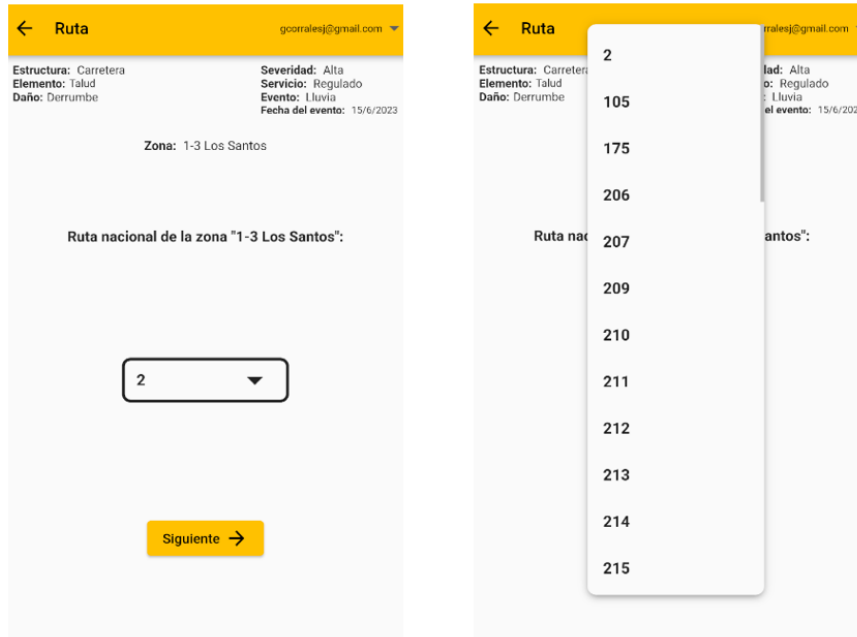


Figura 14: Pantalla de selección de la ruta nacional según la zona de conservación vial.

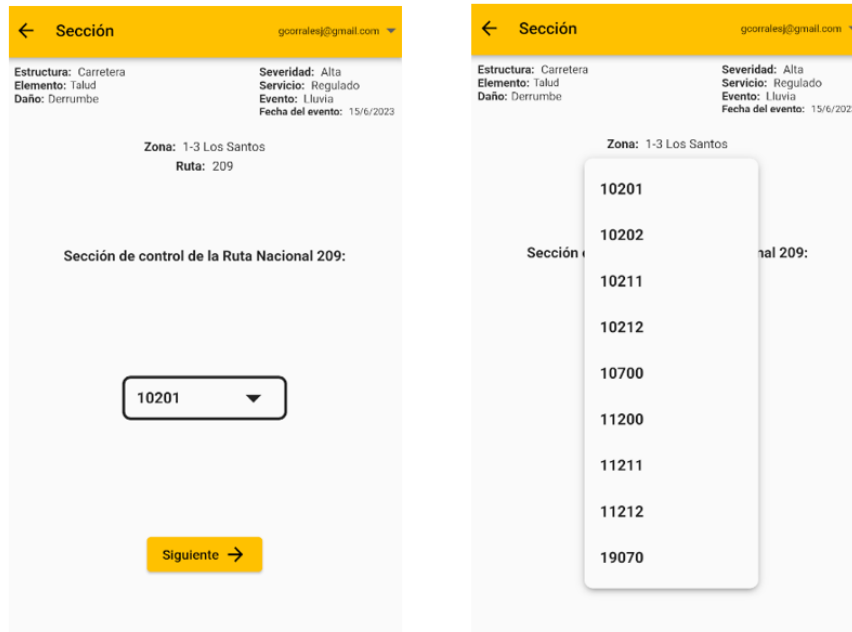


Figura 15: Pantalla de selección de la sección de control según la ruta nacional.

La exactitud de esta ubicación dependerá de la conexión a Internet y de elementos de la tecnología propia de cada dispositivo móvil. La aplicación permite repetir este paso en caso de ser necesario, antes de avanzar a la última pantalla donde se tiene la opción de realizar observaciones generales y guardar el reporte, para lo cual también es necesaria la conexión a Internet del dispositivo móvil.

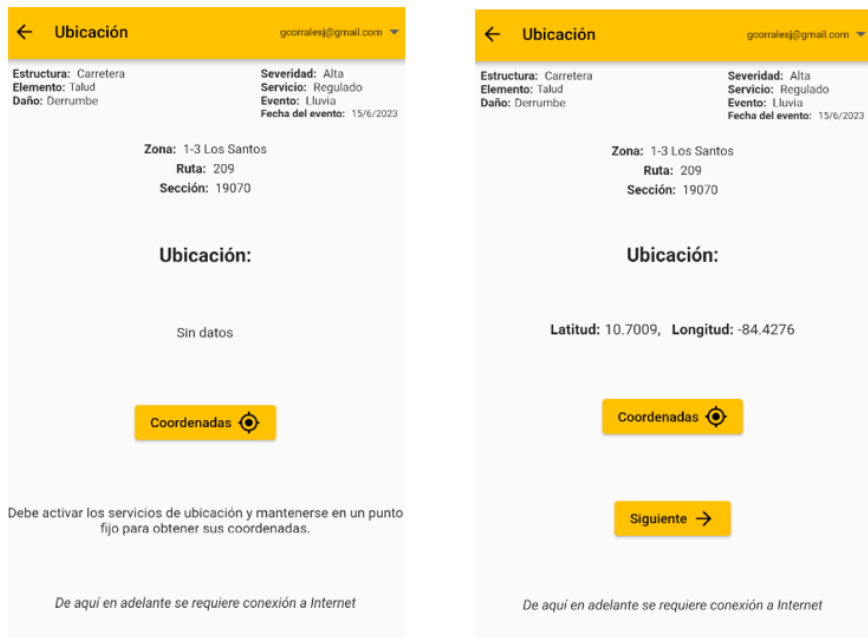


Figura 16: Pantalla del proceso de ubicación con coordenadas geográficas.

3.1.13 Observaciones

La pantalla "Observaciones" es la última de la aplicación móvil (Figura 17). Cuenta con un espacio donde se puede introducir como máximo 254 caracteres de texto para que el usuario realice observaciones y comentarios generales como la descripción del daño, particularidades del evento, complicaciones de la visita de campo o la descripción coloquial de la ubicación del sitio. Estas observaciones son opcionales, no necesariamente deben ser completadas en todos los casos, sino que se deja a criterio del usuario.

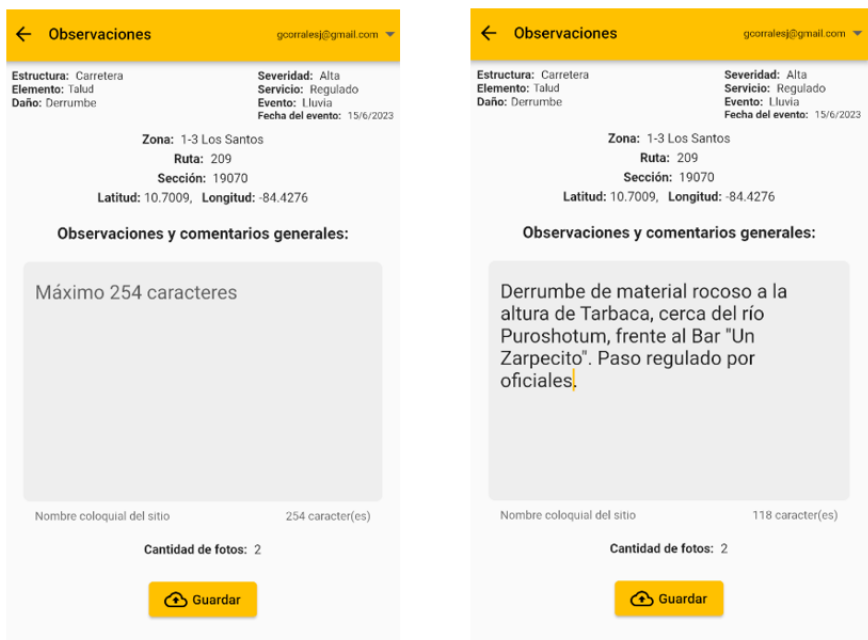


Figura 17: Pantalla para el ingreso de observaciones del reporte.

Por tratarse de la última pantalla de la aplicación, en ella se incluye el botón de "Guardar", mediante el cual se finaliza el reporte. La aplicación entonces consulta al usuario si desea realizar otro reporte o salir de la aplicación.

Al finalizar cada reporte la información es almacenada en la nube mediante los servicios de *Firebase* y se actualiza la aplicación web de visualización, que se explica a continuación.

3.2 Aplicación web de visualización

La aplicación web de visualización de los daños reportados en la RVN consiste en un tablero de control desarrollado a partir de *Shiny*, el paquete de *R* que incluye funcionalidades espaciales a través de la biblioteca *Leaflet*.

A esta aplicación se accede desde un enlace URL y está diseñada para su uso en computadoras, por las dimensiones de pantalla requeridas y por la necesidad de manejo desde un *mouse* o ratón para aprovechar de manera óptima sus funcionalidades. Por lo tanto, no se recomienda su utilización en dispositivos con pantallas de tamaños similares a los disponibles en los teléfonos móviles de uso convencional actual.

El tablero o *dashboard* de esta aplicación cuenta con un mapa de ubicación donde los daños se representan como puntos, una tabla de registros de los daños y un menú de selección de filtros que se encuentran en función de datos de los reportes de daños, como muestra la Figura 18. Estos tres componentes son consistentes entre sí, es decir, cuando se aplica uno de los filtros, el resultado se refleja mediante la modificación de los puntos mostrados en el mapa de ubicación y en la tabla de registros.

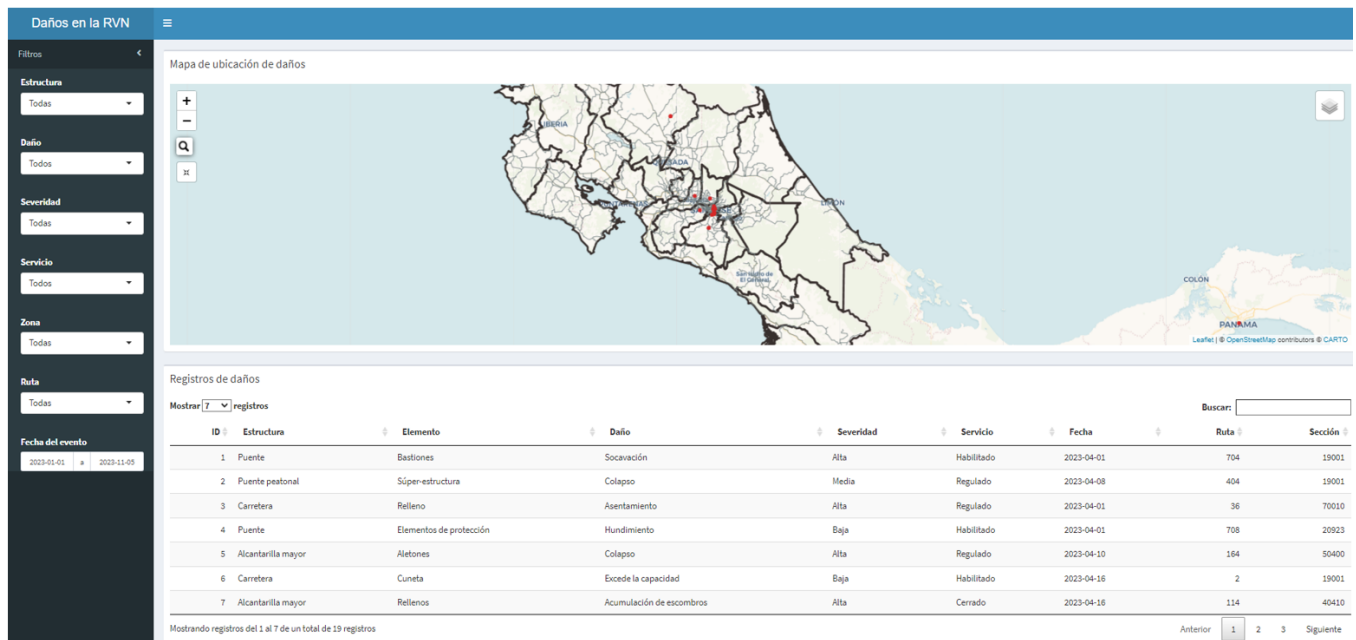


Figura 18: Tablero de control de daños en la RVN.

3.2.1 Mapa de ubicación de los daños

El mapa de ubicación de los daños consiste en un mapa base cuyo sistema de referencia de coordenadas es el WGS84 (EPSG: 4326), sobre el cual se superponen las tres capas vectoriales: la capa de polígonos de

las zonas de conservación vial, la capa de líneas de la RVN y la capa de puntos con los daños reportados en la RVN.

La capa de polígonos se utiliza para resaltar en el mapa los límites de las zonas de conservación vial; la de líneas para resaltar las rutas que forman parte de la RVN y cuyo número de ruta se despliega en una etiqueta personalizada al colocar el cursor sobre la línea; y la capa de puntos para representar los daños reportados desde la aplicación móvil.

En la Figura 19 se puede apreciar un punto cercano al límite entre dos zonas de conservación vial (la 1-1 y la 1-3), la etiqueta desplegada con el número de ruta (en este ejemplo la Ruta Nacional 2) y de fondo la información geográfica aportada por el mapa base *Voyager* del proveedor *CartoDB* (plataforma que provee mapas en línea y otras herramientas geográficas), al cual se tiene acceso gratuitamente mediante el uso del paquete *leaflet*.

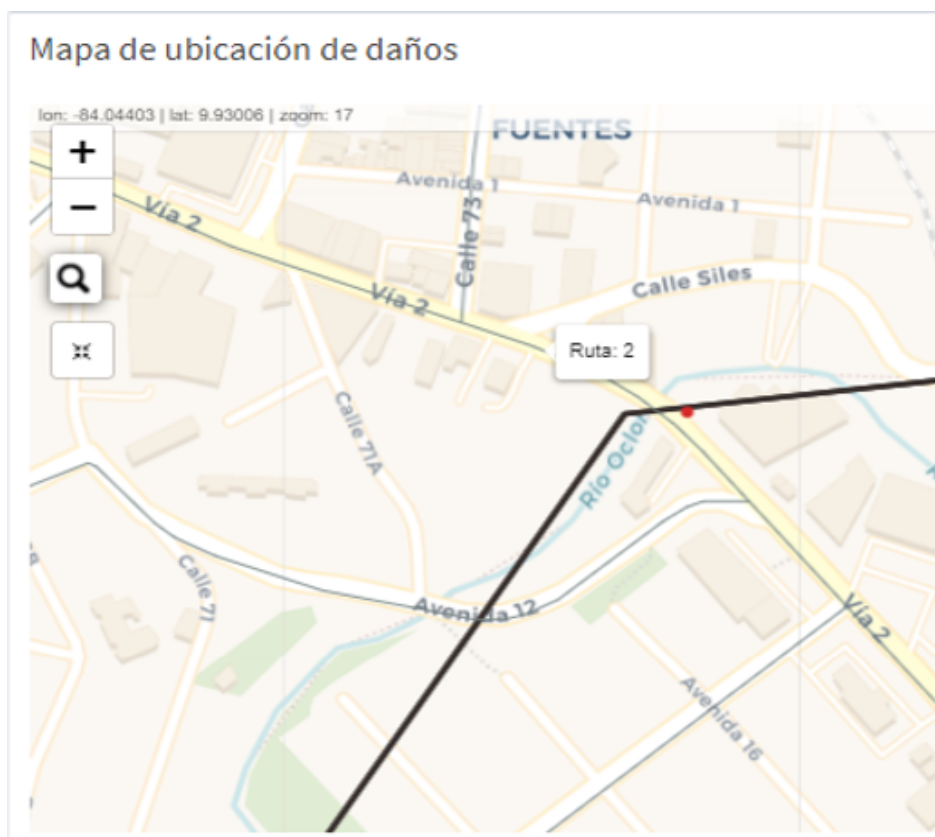


Figura 19: Ubicación de daños sobre mapa base *Voyager*.

En la esquina superior izquierda del mapa de ubicación de daños se indican las coordenadas geográficas de los puntos por donde se desplaza el cursor del ratón. Adicionalmente, cuenta con distintos botones como los de *zoom*, que permiten acercarse o alejarse del mapa; el botón para regresar a la vista inicial del mapa con el nivel de *zoom* y la ubicación inicial definidos previamente (en este caso el punto de coordenadas con longitud -84.08 y latitud 9.83, en el centro de Costa Rica, y un nivel de *zoom* igual a 8); y el botón de búsqueda que permite el ingreso de ubicaciones o direcciones de referencia para su búsqueda en las bases de datos de OpenStreetMap.

Voyager se utilizó como mapa base predeterminado en el tablero, dada la legibilidad y comprensión de los datos que le aporta su estilo moderno y limpio. Sin embargo, en el tablero se implementó un control de

combinaciones de filtros, cuyos resultados en todos los casos se actualizan y se ven reflejados en la cantidad de puntos rojos del mapa de ubicación de daños y en la cantidad de registros de la tabla de daños. Esta tabla de registros se explica a continuación.

3.2.3 Tabla de registros de los daños

La tabla de registros de los daños es una herramienta de apoyo en el tablero de la aplicación web (ver Figura 18). Esta tabla está compuesta por nueve columnas: ID, Estructura, Elemento, Daño, Severidad, Servicio, Fecha, Ruta y Sección. Ocho de estas variables corresponden a datos de los daños reportados en la aplicación móvil, mientras que la primera de ellas, ID, corresponde a un número consecutivo generado por el sistema en cada reporte.

El usuario del tablero puede ordenar los registros de la tabla por columna de manera ascendente o descendente y solo por una de sus columnas a la vez. De manera predeterminada la tabla de registros de daños se agrupa en un máximo de 7 registros. Sin embargo, este número máximo puede aumentar a 10, 25, 50 o 100 registros, según las preferencias del usuario del tablero.

La tabla de registro es una herramienta de complemento para la visualización de daños, ya que no puede ser descargada por el usuario para gestionar, analizar o manipular los datos en procesos posteriores.

Sin embargo, el SIG desarrollado en este proyecto permite la descarga de la capa geográfica de puntos en formato *GeoJSON* generada a partir del reporte de los daños en la aplicación móvil.

3.2.4 Descarga del archivo *GeoJSON*

El archivo *GeoJSON* generado del reporte de los daños se almacena en la carpeta "capa" de *Firebase Storage* y puede ser descargado de su enlace URL en el sistema de referencia de coordenadas WGS84 (EPSG: 4326).

De esa manera es posible para el usuario el manejo de la capa de puntos en un software de información geográfica como *QGIS* y con ello el aprovechamiento de todas sus funcionalidades en el manejo de datos. La tabla de atributos de esta capa cuenta con una mayor cantidad de información que la tabla de registros de daños de la aplicación web de visualización.

Adicionalmente, la descarga de la capa hace posible la exportación a otros formatos de archivo para su uso y manipulación en diferentes tipos de software, como los de hojas de cálculo, en formatos con extensiones *.xlsx* o *.ods*, lo cual facilita la generación de gráficos a partir de la información de los daños en la RVN, por ejemplo.

4 Discusión

Esta discusión abordará tres puntos importantes en el desarrollo del sistema: 1) el mejoramiento de procesos, 2) la comparación con otras herramientas existentes y 3) las limitaciones del sistema.

4.1 Mejoramiento de procesos

Luego de detectada la necesidad del registro, por parte del CONAVI, de los daños en la Red Vial Nacional producto de eventos naturales, se inició en la Institución un proceso de registro dividido en tres etapas: 1) las visitas de campo, 2) la digitalización y agrupación de la información, y 3) la creación o actualización de capas de información geográfica.

En la primera etapa, la toma de datos de campo consistía en la toma de fotografías de los daños y su entorno; la ubicación de los puntos en coordenadas geográficas, mediante el uso de dispositivos GNSS (Sistemas Globales de navegación satelital, por sus siglas en inglés); y la elaboración de notas en papel con los datos que se consideraban necesarios.

En una segunda etapa del proceso, los datos en papel posteriormente se digitalizaban, haciendo uso de tablas creadas en hojas de cálculo. De esta manera era posible integrar la información de cada reporte de daños: fotografías, ubicación y datos de texto.

Una vez se disponía de la información integrada, en la tercera y última etapa era posible generar o actualizar capas de información geográfica. Estas capas se manejaban en formato *shapefile*, el más tradicional en el ámbito SIG.

El proceso descrito no solamente es ineficiente e implica retrabajo para el personal, sino que es susceptible a errores humanos en cualquiera de sus etapas. Esta situación permitió identificar la necesidad de contar con un proceso automatizado que mejorara eficacia y eficiencia, y, por lo tanto, dio origen al desarrollo del sistema expuesto en este artículo.

Como resultado del desarrollo de este sistema, las tres etapas en que se dividía el proceso de registro de daños fueron automatizadas en una sola actividad consistente en la visita al sitio y el uso de un dispositivo con la aplicación móvil instalada, mediante la cual se realiza todo el proceso, pero que además añadió una cuarta etapa, también automatizada, para publicar la información en un visor web.

Por lo tanto, el proceso se simplificó considerablemente y los objetivos de eficacia y eficiencia se alcanzaron en el desarrollo de este sistema, el cual está planteado para dos tipos distintos de usuarios: los usuarios de la aplicación móvil que toman datos de campo y los usuarios del visor web, que por lo general realizan trabajo de oficina.

Lo anterior no implica que los usuarios de campo no puedan serlo también del visor web, ya que el acceso a este puede ser inclusive de uso público. Este es un asunto que quedará a criterio de la Institución. Sin embargo, en este artículo se incluye el siguiente enlace, a manera de ejemplo, de un visor con los datos obtenidos en la etapa de registro de reportes de prueba (ver Sección 2.6):

<https://gabriel-corrales.shinyapps.io/danosRVN/>

Adicionalmente, se comparte otro enlace que permite la descarga de la capa de puntos en formato GeoJSON utilizada en el visor web de muestra:

https://firebasestorage.googleapis.com/v0/b/registros01-cd58a.appspot.com/o/capa%2Fdanos_wgs84.geojson?alt=media

De manera análoga el CONAVI podrá realizar la descarga de la capa con los datos oficiales. Esta capa puede ser manipulada en software de información geográfica como *QGIS*, lo que permite la consulta de la tabla de atributos y además su exportación a archivos de hojas de cálculo con formato *.xlsx* o *.ods* (típicamente para ejecutarse en *Microsoft Excel*), de manera que posteriormente es posible un fácil filtrado de la información, la generación de estadísticas, gráficos y otras funcionalidades disponibles en las hojas de cálculo.

Por lo tanto, el sistema brinda herramientas adicionales al personal del CONAVI involucrado en diferentes niveles con la planificación institucional, desde los analistas hasta los tomadores de decisiones, esto mediante el uso de software gratuito.

Llegado a cierto nivel de almacenamiento, los servicios en la nube dejan de ser gratuitos, sin embargo, y como se menciona en las conclusiones, los cobros son completamente accesibles una vez superado ese límite, para lo cual será necesario realizar primero alrededor de 3000 registros de daños de manera gratuita.

4.2 Otras herramientas existentes

Actualmente existe software que permite la creación de formularios para la toma de datos de campo que tienen características similares al sistema desarrollado en este proyecto, algunos en software gratuito como *QField*. Sin embargo, en todos los casos se requiere personal con cierto grado de especialización, tanto para generar los formularios como para manipular sus resultados.

Adicionalmente, los ejemplos más completos y que permiten llegar hasta la etapa en que se genera un visor web de manera automatizada, como *Survey123* o *ArcGIS Collector* de *ESRI*, que permiten la recopilación y actualización de información en el campo con o sin conexión ([Morales, 2020](#)), son aplicaciones con licencias comerciales que requieren una inversión considerable por parte de las instituciones y adicionalmente presentan desventajas en relación con el sistema desarrollado para el caso de estudio, como un número limitado de usuarios, cobros proporcionales a su utilización y la necesidad de instalación de aplicaciones pesadas en los dispositivos móviles para ejecutar los formularios.

El SIG presentado en este artículo fue desarrollado para ajustarse de manera personalizada a las necesidades de registro de daños en la institución y, además de ser gratuito, cuenta con las siguientes ventajas o características:

- Una interfaz de usuario sencilla y amigable.
- No existe un límite de cantidad de usuarios y permite la trazabilidad, ya que en cada reporte se identifica su autor.
- Las fotografías generadas por la aplicación son optimizadas mediante un proceso que reduce el peso de los archivos, pero conserva la calidad de las imágenes.
- Cuenta con un mecanismo automatizado de envíos por correo al crear cada reporte con todos los datos y fotografías, para informar tanto al usuario de campo como al personal de oficina sobre el nuevo punto registrado.
- La aplicación es liviana, tiene un peso aproximado de 8 MB.
- La capa de puntos puede descargarse de una manera sencilla a través de una URL.
- El formato de la capa de puntos *GeoJSON* cuenta con ventajas sobre los *shapefile*, como se explica en las conclusiones.

4.3 Limitaciones

La principal limitación en el uso de este sistema es que la aplicación móvil puede ser instalada únicamente en dispositivos que funcionen sobre la base del sistema operativo *Android* que deben tener conexión a Internet.

5 Conclusiones

- Se programó una aplicación móvil para el registro en campo de los daños en la RVN causados por eventos naturales, siguiendo una estructura de datos de acuerdo con los requerimientos del sistema definidos por el CONAVI y la información de la capa geográfica de la RVN actualizada por esa institución en noviembre de 2022.
- El almacenamiento de los datos registrados en la aplicación móvil de registro de datos de campo se llevó a cabo mediante el servicio en la nube de la plataforma *Firebase*, que ofrece un nivel gratuito de utilización de sus servicios, así como también planes de pago para acceder a características adicionales y capacidades avanzadas. En relación con el almacenamiento de datos, *Firebase* pone a disposición de sus usuarios el servicio *Storage* sin costo hasta los 5 GB. A manera de comparación, la aplicación gratuita para levantamiento de datos de campo *Input*, permite solamente 100 MB sin costo en su servicio de almacenamiento en la nube
- Con el fin de aumentar el aprovechamiento del uso gratuito del *Storage*, así como de reducir los costos por almacenamiento una vez superados los 5 GB, se implementó un proceso de optimización de las imágenes capturadas en la aplicación móvil de registro de daños en la RVN, a través de la extensión *Resize Images* de *Firebase*. De acuerdo con los resultados de la etapa de registro de reportes de prueba, descrita en la metodología (ver Sección 2.6), las imágenes optimizadas se reducen a menos de 150 kB.
- El máximo espacio requerido en *Storage* por cada reporte de daños, considerando el límite de 10 fotografías permitidas por la aplicación móvil, sería de alrededor de 1,5 MB. Por lo tanto, se puede estimar de manera conservadora que este SIG podría llegar a los 3000 registros sin superar los 5 GB de almacenamiento, que es el límite del nivel gratuito, a partir del cual se debe pagar 0.026 dólares estadounidenses por cada GB adicional.
- Para la visualización de la información obtenida en campo de los daños en la infraestructura de la RVN causados por eventos naturales, se implementó una aplicación web mediante el paquete *Shiny* de R. Esta aplicación consiste en un *dashboard* o tablero que se ejecuta desde servidores del sitio *shinyapps.io* de manera gratuita, y que se compone de tres elementos: un mapa de ubicación de los daños, un menú de selección de filtros y una tabla de registro de los daños.
- El mapa de ubicación de los daños de la aplicación web de visualización cumple con los requisitos cartográficos básicos y de calidad como sencillez, contenido, exactitud, optimización, objetividad, estética, simbología y dinamismo que debe satisfacer la información geográfica publicada en Internet
- La utilización de la capa de puntos en formato *GeoJSON* en este sistema permitió evidenciar algunas de sus ventajas frente al *shapefile*, el formato vectorial de datos espaciales más utilizado tradicionalmente, tales como su facilidad para la publicación de información geográfica en Internet, dado que requiere solamente la manipulación de un único archivo, a diferencia del *shapefile* que consiste en un mínimo de 5 archivos, así como la longitud de las cadenas de texto que pueden ser ingresadas en los campos de atributos, dado que el *shapefile* cuenta con un límite de 254 caracteres por campo, mientras que *GeoJSON* no tiene un máximo establecido.
- Como una función adicional a los requerimientos del sistema definidos previamente por el CONAVI, se implementó el envío por correo electrónico de los reportes de los daños en la RVN realizados en la aplicación móvil.

- El resultado de este proyecto fue el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (visto como tal desde el enfoque de SIG como proyecto) para registrar y visualizar los daños causados por eventos naturales en la infraestructura de la Red Vial Nacional de Costa Rica sin necesidad de pagar por licencias de software.
- El SIG desarrollado en este proyecto funcionará como una herramienta a disposición del CONAVI para la planificación de las intervenciones en la RVN, que facilitará la toma de decisiones enfocadas en evitar la reconstrucción de las vulnerabilidades físicas a partir de la identificación los daños reportados, su magnitud y sus causas, y de esta manera procurar la inversión de los recursos públicos de manera eficiente, priorizada y segura, así como la ejecución de soluciones reales que reduzcan la necesidad de acciones correctivas a futuro, lo que representa un beneficio económico y en términos de seguridad vial para toda la sociedad.

6 Referencias

Acens (2014). Base de datos NoSQL. Qué son y tipos que nos podemos encontrar. Technical report, Acens. Recuperado de: <http://www.acens.com/wp-content/images/2014/02/bbdd-nosql-wp-acens.pdf>.

Bennett, J. (2010). *OpenStreetMap: Be Your Own Cartographer*. Packt Publishing. ISBN: 1847197507, 9781847197504.

del Bosque González, I., Fernández Freire, C., Martín-Forero Morente, L., y Pérez Asensio, E. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica y la Investigación en Ciencias Humanas y Sociales*. Confederación Española de Centros de Estudios Locales.

Morales, A. (2020). Las mejores aplicaciones SIG para Android en 2020. Obtenido de: <https://mappinggis.com/2012/08/las-mejores-aplicaciones-sig-para-android/>.

Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado de: <https://volaya.github.io/libro-sig/>.

Sommerville, I. (2005). *Ingeniería del software*. Pearson Educación. ISBN: 8478290745, 9788478290741.

Vargas, M. (2021). Programación de Aplicaciones Geoespaciales en R. Obtenido de: <https://tpb728o-programaciongeoespacialr.github.io/2021ii/>.

Younis, W. (2021). What is Firebase? Firebase Tutorials. Obtenido de: <https://firebasetutorials.com/what-is-firebase/>.