

**Implementación de un Sistema de Monitoreo basado en GPS y
Observaciones Terrestres del Talud Ubicado en el km 0 al Ingreso a la
Comuna de San Rosendo, Región del Biobío.**

Cecilia Estefanía Figueroa Olivas



M.Sc. Aharon Samuel Cuevas Cordero

Licenciado Octavio Robles Chávez

Los Ángeles, Marzo 2019.

RESUMEN

Las vías de comunicación en Chile, han de emplazarse en diferentes lugares, para de esta forma lograr la conectividad entre los habitantes, generando condiciones de tránsito más seguras para ellos y mejorar su calidad de vida. En el acceso principal a la comuna de San Rosendo está construido un talud, que es producto del diseño vial de un puente que une esta comuna con la de Laja. Este en reiteradas ocasiones ha sufrido pequeños derrumbes, por el cual Ministerio de Obras Públicas (MOP), ha tenido que reforzar este talud, para de esta forma minimizar el peligro inminente que pone en riesgo la vida de los transeúntes, es por ello que es necesario descubrir si es que están produciéndose deformaciones en el talud. En este trabajo se ha de implementar un sistema de monitoreo geodésico por medio del diseño óptimo de una red tridimensional, mediante la resolución de los cuatro problemas de diseño, además se ha utilizado posicionamiento global (GPS) y observaciones terrestres. Por otro lado con la finalidad de realizar un monitoreo constante en el tiempo, han de monumentarse los puntos de la red, creando de esta forma un campo de prueba. Con respecto a los resultados estos sirven como apoyo a las futuras campañas de monitoreo del objeto de estudio, mostrando la magnitud mínima de deformación observable, de acuerdo a la metodología propuesta, es decir milimétrica.

Palabras claves: San Rosendo, Monitoreo, GPS, Observaciones Terrestres, Talud.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a Dios por su infinita misericordia y concederme una hermosa familia, Madre, hermano y abuelo. Además por permitirme llegar a la universidad a pesar de las diferentes dificultades económicas y los miles ¡No!, que se presentaron para poder ingresar. Además por vivir cada día universitario, que sin duda han sido llenos de situaciones difíciles y hermosas, además de obtener grandes aprendizajes, tanto académicos como personales.

De igual forma este trabajo está dedicado hacia mi Madre Luisa Olivas, mi Hermano Alejandro Correa y mi Abuelo José Olivas.

Los Amo con todo mi corazón

Gracias por tanto

Bendiciones



Observación importante de este proyecto

Este proyecto, tuvo dos orientadores a lo largo de su desarrollo, en primera instancia Don Francisco Contreras Rivas, ex colaborador académico, de la Universidad de Concepción, hasta el mes de Enero del 2019. Posteriormente en Marzo del 2019, asumió como orientador de este proyecto Henry Montecino Castro, docente de la Universidad de Concepción.



AGRADECIMIENTOS

"Tú que habitas al amparo del Altísimo y resides a la sombra del Omnipotente, dile al Señor: "Mi amparo, mi refugio, mi Dios, en quien yo pongo mi confianza"

En este proyecto quiero dar gracias a Dios pues ha sido el pilar fundamental a lo largo de toda mi vida y en especial en mi etapa universitaria, mi refugio y el que me ha concedido todo lo necesario para llegar hasta acá, como la perseverancia, la fuerza, las ganas de aprender, el ser responsable, el amar, el amor por hacer las cosas con pasión y todo lo demás que sin duda es infinito.

Te agradezco Madre Luisa, por todo lo que me has dado, por apoyarme, escucharme, soportarme en esos días cuando todo anda mal, por consolarme y empujar a seguir adelante cada día, por ser mi hombro a donde afirmarse cuando más de una lagrima ha caído, además de concederme todo lo económico para concretar mis sueños, por tus infinitas muestras de amor, por hacerme sentir que soy la mejor hija y totalmente amada por ti, Te amo Mucho. A ti hermano Alejandro Correa te agradezco por ser como eres, el mejor que me pudo tocar, me amas, proteges, retas, y que sin duda me dice sigue adelante cuando no he tenido fuerzas para continuar y que siempre siempre estas para mí, tu sabes que te Amo Mucho. Abuelito a ti también te agradezco por tanto, por estar preocupado de mí, Te amo!, Gracias a mi cuñada Marta por darme tu apoyo siempre y por concederme a una hermosa sobrina y Ahijada Maite.

La familia es donde la vida comienza y el amor nunca termina

Quiero agradecer a la comunidad universitaria que sin duda sin su apoyo, palabra y enseñanza llegar hasta acá no habría sido posible, al Tío Victor y a la Tía Marisol por atenderme siempre en la Biblioteca, escucharme y atenderme con tanta dedicación. A la

Tia Gaby que sin duda es la mejor, que nos apoya y nos da un ratito de su tiempo con su bellas palabras y su gran ternura, gracias Tía. Al Tio Manuel por sus grandes consejos, que me han ayudado mucho, por otro lado al Tio Jorge que siempre me ayudo con los problemas informáticos, muchas gracias .

Quiero agradecer al profe Henry Montecino por guiarme en este trabajo, que a pesar que tomo la responsabilidad de ser mi orientador en la instancia final, siempre estuvo dispuesto a ayudarme. Asimismo ha estado disponible para responder a mis interrogantes, además de darme buenos consejos y escucharme, ¡Muchas Gracias por todo y que Dios siempre guíe su vida !

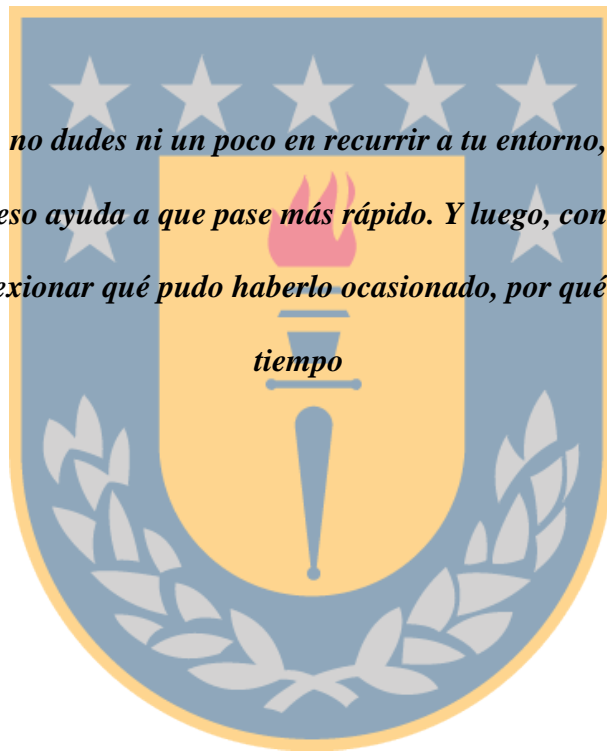
A mi orientador inicial de este trabajo Francisco Contreras, por su gran disposición y apoyo.

Además quiero agradecer a los profesores que me han hecho clases que sin duda ha sido personas fundamentales en mi formación: Guido Staub, Aharon Cuevas, Cristian Pérez, Sixto Martínez, Claudio Aedo, María Ester. Disculpen por tantas preguntas jajaja y por copar sus horarios de consulta!. Quiero agradecer a mis amigos que de alguna u otra forma han contribuido en mi etapa universitaria: Matias, Miguel, Kevin, Lucho, Carlos Garrido, Carlos Pérez, Marcelo C, Soledad y Florencia, los quiero Mucho. Por otro lado agradezco a Irvin por apoyarme y calmarme más de una vez , Gracias.

También a mi grupo de oración de la parroquia, que sin duda mis días con ustedes son hermosos en compañía de Dios.

Cada mañana tiene dos asas, podemos tomar el día por el asa de la ansiedad o por el asa de la fe

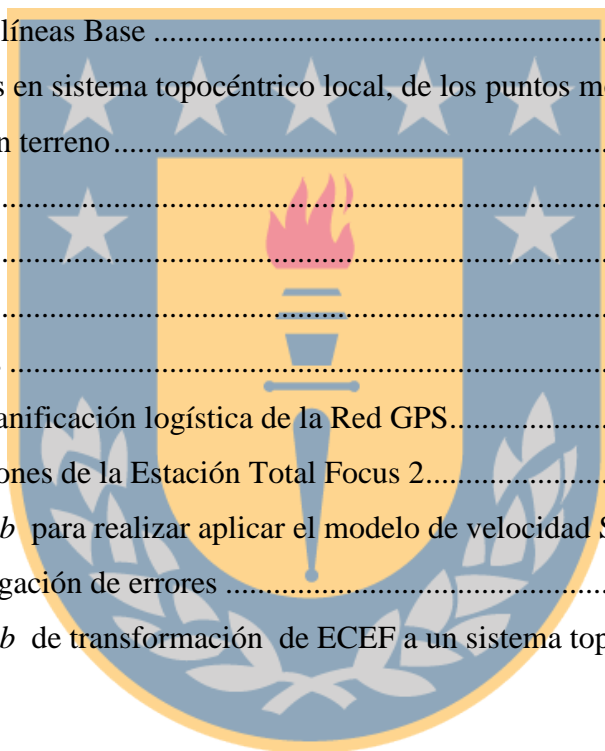
Siempre que puedas, no dudes ni un poco en recurrir a tu entorno, amigos, familia, en lo posible, porque eso ayuda a que pase más rápido. Y luego, con tranquilidad, con tiempo, tratá de reflexionar qué pudo haberlo ocasionado, por qué aparece cada tanto



Índice de Contenidos

1.	Planteamiento del problema.....	14
2.	Introducción	16
2.1.1.	Objetivo General.....	17
2.1.2.	Objetivos específicos	17
3.	Marco teórico	18
3.1.	Talud y sus partes.....	18
3.2.	Deformaciones	18
3.2.1.	Descripción de deformaciones.....	19
3.2.2.	Estudio de las deformaciones.....	20
3.2.3.	Tipo de desplazamientos.....	21
3.3.	Monitoreo de deformaciones.....	21
3.3.1.	Revisión de antecedentes del caso (Objeto y región de estudio):.....	22
3.3.2.	Determinar la clasificación de la deformación	22
3.3.3.	Implementación de una Red óptima de monitoreo	23
	Propagación de errores.....	23
4.	Metodología	30
4.1.	Antecedentes geográficos, geométricos y otros del objeto de estudio.....	30
4.2.	Antecedentes geográficos, geológicos y otros de la zona de estudio.....	34
4.3.	Determinación del tipo de deformación posible a encontrar.....	36
4.4.	Realización de análisis de propagación de errores.....	37
4.5.	Implementación de una Red óptima de monitoreo (Resolver los problemas de diseño de los 4 ordenes).....	40
4.5.1.	Resolución del problema de diseño de orden cero (ZOD):.....	40
4.5.2.	Resolución del problema de diseño de orden uno (FOD).....	42
4.5.3.	Resolución del problema de Diseño de Orden dos (SOD).	43

4.5.4.	Resolución del problema de Diseño de orden tres (THOD)	44
4.6.	Descripción de las etapas de terreno	45
4.6.1.	Monumentación de los puntos de la Red.	45
4.6.2.	Realización de la Red GPS	46
4.6.3.	Realización de la campaña de monitoreo en terreno	49
4.7.	Proposición del modelo de deformación	52
4.8.	Procesamiento de Red GPS.....	52
5.	Resultados	55
5.1.	En el procesamiento de red GPS:.....	55
5.2.	Propagación de Errores	57
5.3.	Pesos de las líneas Base	58
5.4.	Coordenadas en sistema topocéntrico local, de los puntos monitoreados.....	59
5.5.	Monitoreo en terreno	61
6.	Conclusiones	63
7.	Bibliografía	66
8.	Anexo	69
8.1.	Monografías	69
8.2.	Tablas de planificación logística de la Red GPS.....	73
8.3.	Especificaciones de la Estación Total Focus 2.....	74
8.4.	<i>Script Matlab</i> para realizar aplicar el modelo de velocidad SIRGAS VEMOS.74	74
8.5.	Script Propagación de errores	74
8.6.	<i>Script Matlab</i> de transformación de ECEF a un sistema topocéntrico local... 76	76



Lista de Tablas

Tabla 1: Tabla de Validación de la Red GPS	45
Tabla 2: Tiempos de observación para mediciones GPS.....	49
Tabla 3: Libreta de monitoreo.....	51
Tabla 4: Coordenadas cartesianas geocéntricas de los de la Red	56
Tabla 5: Precisiones en las coordenadas de un Sistema de Referencia Topocéntrico.	57
Tabla 6: Pesos de las líneas bases generadas en la Red GPS.....	58
Tabla 7: Coordenadas en un sistema topocéntrico local de los puntos monitoreados	60
Tabla 8: Observaciones de monitoreo obtenido.....	61

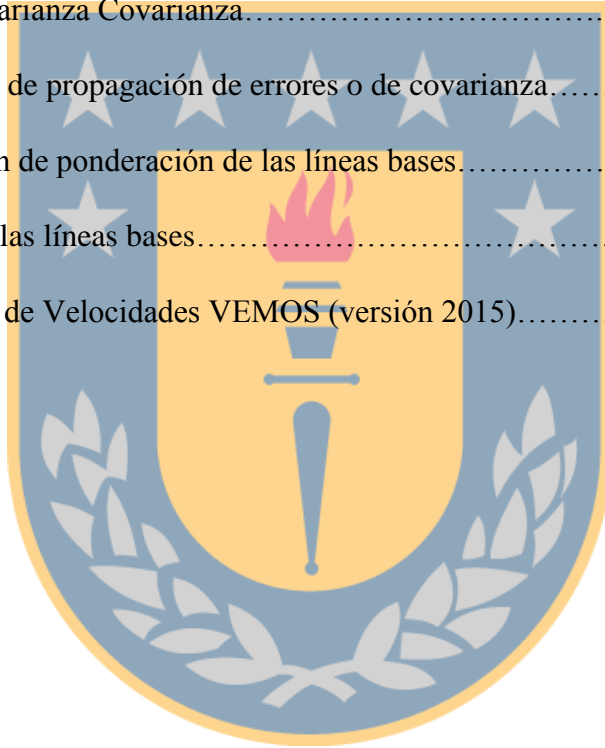


Lista de Figuras

Figura 1 : Comuna de San Rosendo, Región del Biobío.	14
Figura 2: Talud entrada a San Rosendo, Región del Biobío.....	15
Figura 3: Talud antes de contrato de emergencia	31
Figura 4: Talud entrada a San Rosendo, Región del Biobío.....	32
Figura 5: Talud San Rosendo, Mayo 2018	32
Figura 6: Talud con tratamiento del MOP, Mayo 2018.....	33
Figura 7: Talud en Noviembre 2018.....	33
Figura 8: Mapa geológico zona de estudio, unidades morfológicas San Rosendo.	35
Figura 9: Mapa Geológico de Laja	36
Figura 10: Distribución de los puntos en la zona de estudio	38
Figura 11: Distribución de los puntos de la red y las estaciones fiduciales.....	41
Figura 12: Puntos de la red	43
Figura 13: Sesión 1 y 2 de mediciones GPS	47
Figura 14: Sesión 3 y 4 de mediciones GPS, Fuente: Elaboración propia	47
Figura 15: Quinta sesión	48
Figura 16: Red con todas líneas bases	48
Figura 17: Puntos de monitoreo	50
Figura 18: Puntos de Monitoreo del talud, tercera terraza.....	50

Listado de ecuaciones

Ecuación 1: La expresión general de la ley de propagación de errores.....	24
Ecuación 2: Peso de las observaciones.....	28
Ecuación 3: Coordenada del <i>Target Point</i>	39
Ecuación 4: Expresión de la matriz Jacobiana	39
Ecuación 5: Matriz Jacobiana.....	39
Ecuación 6: Matriz Varianza Covarianza.....	39
Ecuación 7: Ecuación de propagación de errores o de covarianza.....	39
Ecuación 8: Expresión de ponderación de las líneas bases.....	43
Ecuación 9: Pesos de las líneas bases.....	44
Ecuación 10: Modelo de Velocidades VEMOS (versión 2015).....	53



Lista de Nomenclatura o Abreviaciones

DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global position system
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
SIRGAS	Sistema Geocéntrico para las Américas
SLR	Satellite Laser Ranging
SGRG	Sistema Geodésico de Referencia Global
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
ZOD	Zero Order Design
FOD	First Order Design
SOD	Second Order Design
THOD	Third Order Design
MVC	Matriz Varianza Covarianza



1. Planteamiento del problema

La seguridad de las personas que se encuentran o transitan en las cercanías de una obra de ingeniería es un aspecto que debería preocupar a las autoridades. En algunas ocasiones no existen planes ni protocolos que se encarguen de esto, tanto en lo que se refiere al establecimiento de las actividades de mantención, como el control de estas.

La comuna de San Rosendo, ubicada a 50 kilómetros al Noroeste de la ciudad de Los Ángeles, Región del Biobío de Chile (ver figura 1), tiene escasos accesos viales hasta ella, siendo el principal el que conecta mediante el puente “Laja” con la comuna de Laja, y en consecuencia de la construcción de este último, se ha realizado un talud (ver Figura 2, recuadro rojo).

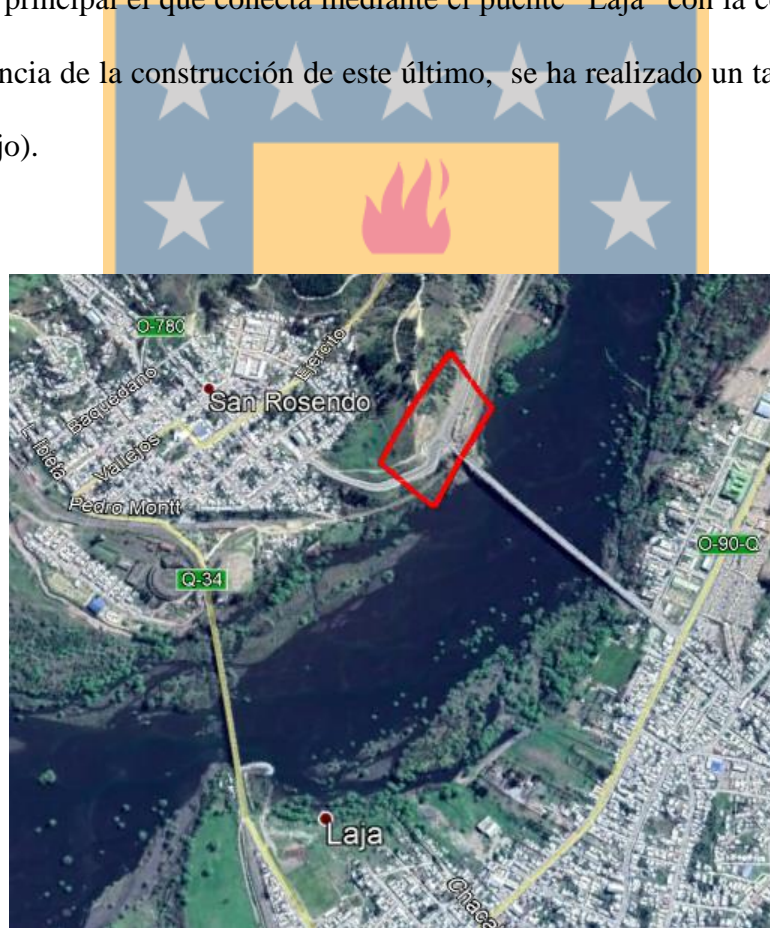


Figura 1 : Comuna de San Rosendo, Región del Biobío.

Fuente: Extracción de Google Earth

A los días de ser inaugurado el puente, la municipalidad de San Rosendo anuncia la existencia de derrumbes en el talud (Municipalidad de Laja, 2014), luego el 17 de Mayo de 2016 debido a que “este talud ha tenido diversos sucesos de derrumbe los que se mantienen en las terrazas construidas previamente y otras se encuentra con posibilidad de desprendimiento, la extensión del sector es de al menos unos 100 m, en la salida norte de Puente Laja “ (Ministerio de Obras Públicas, 2015), es que el ministerio de obras pública anuncia una obra de mejoramiento.

El problema es que no existe información de lo que está ocurriendo con la estructura ni antecedentes relacionados con el monitoreo. Es decir, si se está viendo afectado por algún tipo de deformación y cuanto se está deformando. Es por ello que, para alcanzar esto, es importante la implementación de un sistema para el monitoreo.



Figura 2: Talud entrada a San Rosendo, Región del Biobío

Fuente: Fotografía tomada por el autor

2. Introducción

Las obras civiles de carácter vial son realizadas con el propósito de conectar las diferentes localidades, permitiendo el ahorro de costos como tiempo y dinero. Producto de lo antes mencionado se obtienen rutas en mejores condiciones, lo cual contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas, que las van a utilizar.

El puente inaugurado en el año 2014, que une la comuna Laja con San Rosendo, tuvo lugar a la creación de un talud de una extensión de 100 metros, debido a topografía de la región de estudio. Donde “El talud ha tenido diversos sucesos de derrumbe los que se mantienen en las terrazas construidas previamente y otras se encuentra con posibilidad de desprendimiento, la extensión del sector es de al menos unos 100 metros, en la salida norte de Puente Laja “ (Ministerio de Obras Públicas, 2015). Producto de esto último es que se realizó una obra de emergencia por parte del MOP, la cual tuvo lugar al contrato denominado “Conservación periódica obras de emergencia, acceso norte puente Laja, comuna de San Rosendo, Región del Biobío”, para reforzar el talud.

Actualmente no existe un sistema de monitoreo para el objeto de estudio (talud), por lo cual este proyecto permite plasmar la creación de un sistema de monitoreo Geodésico. Este último parte con la recopilación de todos los antecedentes, la obtención de una red tridimensional óptima a través de la resolución de los problemas de diseño de diferentes órdenes (cero, uno, dos y tres) de modo encontrar deformaciones episódicas. Además considerando la utilización de instrumental GPS (de precisión milimétrica), y además de la creación de un campo de prueba para una posterior realización de la primera campaña de monitoreo.

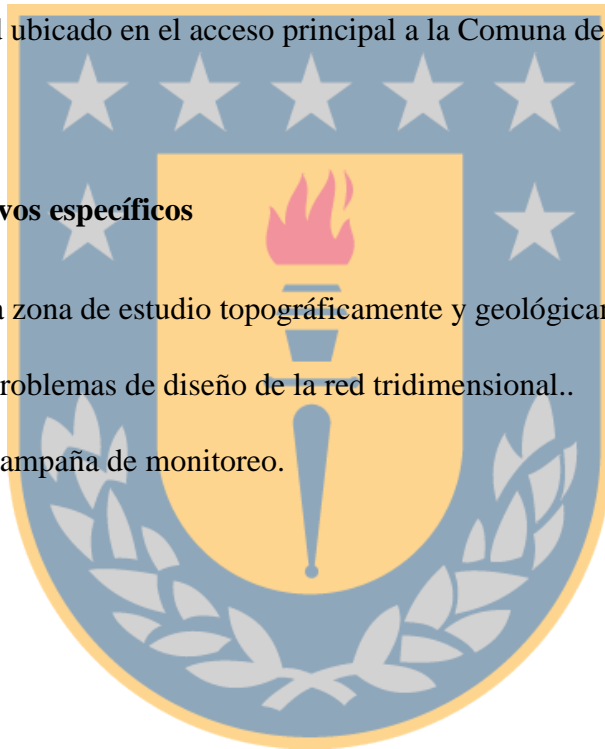
Aunque existen metodologías para monitorear, como las plasmadas por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, entre otros textos, es importante contar con un sistema para una situación en específico (objeto a monitorear). Lo anterior debido a que las metodologías marcan directriz pero no pueden considerar las situaciones específicas existentes.

2.1.1. Objetivo General

Implementar un sistema de monitoreo geodésico basado en observaciones GPS y terrestres del talud ubicado en el acceso principal a la Comuna de San Rosendo.

2.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la zona de estudio topográficamente y geológicamente.
- Resolver los problemas de diseño de la red tridimensional..
- Realizar una campaña de monitoreo.



3. Marco teórico

3.1. Talud y sus partes

Talud es definido como “cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de la tierra” (Matteis, 2003). La construcción de un talud, es principalmente con motivo, de sostener una gran cantidad de tierra, como lo es un cerro o una superficie de gran elevación.

Dentro de las diferentes obras viales que se desarrollan con el objetivo de lograr una mejor conectividad entre los habitantes de las diferentes localidades, ya sean países, regiones, provincias o comunas, la construcción de taludes es bastante común. Producto de esto, es que, en algunas ocasiones, muchos lugares deben ser intervenidos para lograr con el objetivo deseado.

3.2. Deformaciones

Deformación se define como cualquier cambio en la forma o posición sufrido por una estructura debido a la aplicación de esfuerzos (Martinez, 2003), por otra parte según U.S. Army Corps of Engineers (2018) el objetivo principal del monitoreo y análisis de las deformaciones estructurales es:

- Para verificar si el comportamiento de la estructura investigada y su entorno siguen el patrón predicho para que se puedan detectar deformaciones imprevistas en una etapa temprana,
- En el caso de comportamiento anormal, para determinar los factores causantes que desencadenan la deformación y para ayudar en el diseño posterior.

3.2.1. Descripción de deformaciones

Una deformación existente en una estructura, debe ser descrita de forma planimétrica y altimétrica (Rosas, 2012).

Descripción planimétrica:

“Si la posición inicial, el tiempo t_0 , definida por una serie de puntos de una estructura deformable es diferente a la posición final, el tiempo t_1 , resultando en distintos valores con respecto a los mismos puntos vinculados a la estructura deformable” (Rosas, 2012).

Considerando esto, una deformación se puede describir de la manera que sigue a continuación:

- Desplomo: Se refiere al desplome de la estructura.
- Desplazamiento: desplace de la estructura deformable.
- Rotación: es la rotación de algunos puntos de la estructura, cambiando la ubicación de estos.
- Torsión: cambio total de puntos establecidos de la estructura.

Descripción Altimétrica: Se da un cambio en la verticalidad pero de forma que se mantienen la forma de la estructura, pero si cambia su posición por lo cual se define a través de hundimiento y se puede dar la siguiente forma (Rosas, 2012):

- Hundimiento local
- Hundimiento regional

3.2.2. Estudio de las deformaciones

“El estudio de las deformaciones son clasificadas según dos criterios principalmente, siendo alcance y tiempo” (Rosas, 2012). El estudio de las deformaciones se puede realizar según los siguientes criterios:

Estudio por alcance:

1. Local: Se refiere al estudio de las deformaciones ocurridas, ya sea en estructura de obras civiles o terrenos donde se realice extracción de algún tipo de material.
2. Regional: Aquel estudio referido a las deformaciones ocurridas en los lugares donde están ubicadas las placas tectónicas.
3. Continental: Estudio referido a los movimientos producidos por el polo terrestre, es decir variación del movimiento de la tierra y el movimiento relativo entre las placas.

a) Estudio por tiempo (modelos):

1. Modelo estático de deformación: se identifica si ha ocurrido una deformación local y en el caso de existir se cuantifica. Por ejemplo en una estructura, se produce una deformación en un momento y lugar específico, la cual es cuantificada.
2. Modelo cinemático de deformación: se cuantifica las deformaciones ocurridas en un cierto intervalo de tiempo, sin determinar la causa de esta, solo se estudia la deformación existente y el movimiento que se ha producido.

3. Modelo dinámico de deformación: En este caso son estudiadas las deformaciones a través del tiempo, con observaciones de forma periódica, con el objetivo de conocer las magnitudes y las causas de las deformaciones.

3.2.3. Tipo de desplazamientos

Conforme a U.S. Army Corps of Engineers (2018), pueden ser de dos tipos:

1. Desplazamientos absolutos:

- Desplazamientos horizontales: Corresponden a aquellos desplazamientos bidireccionales (Dos dimensiones), cuando se utilizan métodos geodésicos convencionales, las técnicas se realizan empleando puntos de control con coordenadas ya conocidas.
- Desplazamientos verticales: Estos son medidos en relación con los puntos de referencia estables del proyecto.

2. Desplazamientos Relativos: Son aquellos que determinan si que el objeto de monitoreo presenta movimientos diferenciales en aquellos puntos representativos del objeto.

3.3. Monitoreo de deformaciones

Según U.S. Army Corps of Engineers (2018) el monitoreo consiste en mediciones e inspecciones visuales. Para facilitar el monitoreo de las estructuras deben estar permanentemente equipados con la instrumentación adecuada y / o puntos de monitoreo para los objetivos de la observación, el tipo y tamaño de la estructura y las condiciones del sitio.

El monitoreo de una estructura, cualquiera que sea esta, se debe desarrollar bajo un sistema planificado y justificado, por ende han de establecerse pasos, los cuáles deben ser desarrollados de forma ordenada y cronológicamente con el objetivo que el sistema, contenga y considere todos los aspectos necesarios, para así alcanzar resultados certeros.

3.3.1. Revisión de antecedentes del caso (Objeto y región de estudio):

3.3.2. Determinar la clasificación de la deformación

Según Vanicek & Krakiwsky (1995) y otros textos afirman que la forma de la tierra varia en el tiempo, tanto local como globalmente y por lo tanto es necesario dar cuenta de lo temporal.

Por otro lado según los mismos Vanicek & Krakiwsky (1995), las posiciones de los puntos sobre la tierra varían a consecuencia que la forma de la tierra tambien varía, produciendo que las variaciones y/o deformaciones se clasifiquen de la siguiente forma:

- Seculares: esta puede ser del tipo lineal, lenta o progresiva
- Periódica: con periodos que van desde fracciones de segundo hasta decenas de años.
- Episódicas: de repente aceleradas y abruptas.

Considerando esta clasificación y los antecedentes del caso se debe seleccionar el tipo de deformación que se quiere encontrar y estimar su magnitud. La estimación puede ser grosera o no, va a depender de la situación, los antecedentes y su clasificación.

3.3.3. Implementación de una Red óptima de monitoreo

Para llevar a cabo el monitoreo de una estructura, es necesario la implementación de una red, ya sea 1D, 2D, o bien 3D, la cual debe obedecer a un diseño óptimo, de manera de no generar resultados equivocados o conclusiones erradas.

Contar con la estaciones de referencia dentro de una red es muy importante pues permite mejorar la confiabilidad de las épocas de monitoreo.

El diseño óptimo de una red o la optimización de la red, es comprendido como el diseño de una configuración de red óptima y un plan de observación óptimo que satisfaga la calidad de la red predeterminada con el mínimo esfuerzo (Kuang, 1996). Para establecer la calidad es necesario realizar propagación de errores.

Propagación de errores

Para llevar a cabo este paso previamente se debe seleccionar una red de monitoreo óptima (descrito más adelante). Posteriormente a la selección y estudio de la red óptima de monitoreo, se debe realizar un análisis de propagación de errores.

Según Ghilani & Wolf (2006), todas observaciones de levantamiento están sujetas a errores de diferentes fuentes, y por lo tanto, dado que todas las cantidades que se miden directamente contienen errores, cualquier valor computado a partir de ellos también contendrá errores. Esta intrusión, o propagación de errores que ocurren en cantidades computadas a partir de mediciones directas se llama propagación de errores. Es importante destacar que al realizar propagación, deben ser eliminados los errores accidentales y sistemáticos.

Dos técnicas estrechamente relacionadas para procesar datos de monitoreo son pre-análisis y ajuste de redes geodésicas (U.S. Army Corps of Engineers, 2018).

El análisis es una técnica de diseño de medición que se usa para verificar estadísticamente si una encuesta de monitoreo propuesta cumple con los requisitos de precisión preestablecidos. Requiere que el usuario elija coordenadas aproximadas para cada punto de levantamiento, planifique una configuración de medición deseada y asigne una desviación estándar a cada medición según las especificaciones del instrumento. El análisis previo produce una precisión esperada para cada estación de monitoreo en la red para un diseño de encuesta dado (U.S. Army Corps of Engineers, 2018).

La expresión general de la ley de propagación de errores o propagación de covarianza es definida por la siguiente expresión:


$$\Sigma_y = G \Sigma_x G' \quad (1)$$

Donde Σ_x = Matriz Varianza Covarianza

G = Matriz Jacobiana

G' = Matriz Jacobiana Transpuesta

Teniendo el valor de la propagación de errores, se puede concluir la cantidad mínima de observación en el monitoreo, es decir cuánto es la cantidad mínima observable, por ejemplo si se trabaja con coordenadas de cualquier tipo expresada en metros, se podría decir que la cantidad mínima para percibir es de un 1 cm, 1mm, etc.

El ajuste de observaciones por su parte es considerado como una parte de la matemática, donde tiene por objetivo encontrar una solución única.

Por otro lado la optimización de las redes de posicionamiento geodésico se refiere a la precisión, confiabilidad y economía del esquema de la encuesta como criterios de diseño.

El diseño de esquemas de monitoreo de deformación es más complejo y difiere en muchos aspectos del diseño de redes de posicionamiento simples. (U.S. Army Corps of Engineers, 2018).

En general, para diseñar una red de manera óptima, se deben abordar los siguientes aspectos de optimización para dar solución a esta tarea:

1. Determinación óptima de la ubicación de los puntos que conforman la red.
2. Selección correcta de la técnica de medición
3. Realizar el cálculo de la distribución óptima en base a las precisiones obtenidas

Debido a la complejidad de esta tarea, en el pasado era muy difícil, si no imposible, resolver todos los aspectos de optimización de una red en un procedimiento matemático sencillo (Kuang, 1996). Por lo cual esto se ha dividido en resolver cuatro sub problemas, donde la clasificación de estos es la que sigue (Grafarend, 1974):

Zero-Order Design (ZOD): Elección de un óptimo sistema de referencia.

Ejemplos de sistemas de referencia son:

1. Sistema cartesiano Geocéntrico
2. Sistema Geodésico local
3. Sistema Astronómico local
4. Entre otros

First-Order Design (FOD): Elección de la óptima localización de los puntos y estaciones de la Red.

Corresponde a establecer la mejor forma de localizar los puntos de la red.

Considerando la guía emitida por SIRGAS para instalar estaciones (SIRGAS, 2013) , se indican a continuación los aspectos a tomar en cuenta para localizar los puntos de la red tridimensional medida con instrumental GPS:

1. La estación debe ubicarse en un bloque regional estable, debe evitarse la cercanía de fallas activas u otras fuentes de deformación, subsidencia, etc.
2. La estación debe ubicarse sobre material estable, preferiblemente basamento rocoso. Deben evitarse los suelos vulnerables a deslizamientos, hundimientos, variaciones verticales por agua subterránea, rondas de afectación fluvial, etc.
3. El horizonte en torno a la estación debe estar libre de obstáculos sobre un ángulo de elevación mayor que 5 grados. Entre 0 y 5 grados, la presencia de obstáculos debe ser mínima.
4. El lugar seleccionado para la estación no debe verse afectado por cambios futuros en su entorno, por ejemplo por crecimiento de árboles, construcción de edificios, adiciones en tejados, mástiles para antenas, etc.
5. El lugar seleccionado para la estación debe estar libre, de la mejor manera posible, de radio interferencias y de superficies reflectivas u otras fuentes de señal reflejada (multipath).
6. La ubicación de la estación no debe verse afectada por vibraciones excesivas, ya sean naturales o causadas por el hombre, como por ejemplo mareas oceánicas o tráfico vehicular pesado.

7. En el caso de localización sobre terrazas de construcciones, deberá verificarse que el edificio haya superado el período de asentamiento (normalmente mayor que 5 años de construcción), no presentar daños estructurales ni procesos notables de fracturamiento o hundimiento. Se prefiere que el monumento coincida con una viga/columna estructural del edificio.

De igual forma otro aspecto que se debe considerar es la regionalización que abarca la red, para lo cual es muy importante aquí la revisión de los antecedentes. En consideración a lo anterior, se debe verificar si es que existen fallas geológicas que puedan afectar el monitoreo y de esta forma determinar si el movimiento de la red es solidario con el objeto monitoreado o no.

Además otro aspecto a tomar en cuenta es que esta red, es decir la figura pueda ser ajustada, para de esta forma obtener mejor calidad de resultados, por lo cual la cantidad de observaciones deben ser suficientes para generar redundancia y de esta forma poder ajustarla y así se genera una red robusta.

Monumentación

Por otro lado las consideraciones para monumentar los puntos son tomadas de la misma guía de SIRGAS (SIRGAS, 2013) :

1. La estación debe satisfacer los requerimientos estándar definidos para un monumento geodésico de primer orden en cuanto a estabilidad, durabilidad, mantenimiento a largo plazo, documentación y accesibilidad.
2. Debe garantizarse la calidad de la señal capturada por los receptores GNSS, es decir, debe evitarse al máximo la recepción de señales electromagnéticas

provenientes de otras fuentes como multipath, radares, televisión, telefonía móvil, etc.

3. Los materiales empleados en la monumentación, tal como concreto, mástiles metálicos, tensores, soportes, pinturas, etc. deberán ser resistentes a los efectos ambientales en el largo plazo y no ser propensos a la oxidación, erosión, etc.

Second-Order Design (SOD): Elección del tipo de observación y las respectivas precisiones

Es la elección del tipo de observación y su desarrollo, pues la precisión alcanzada dependerá del peso de cada observación. Lo anterior puede ser entendido, considerando que el peso de una observación es una medida de su valor relativo en comparación con otras mediciones. Es por esto, que cuando se recopilan las observaciones, generalmente deben ajustarse a un conjunto dado de condiciones geométricas, de modo de representar a la situación real y de esta manera obtener la precisión deseada.

Los pesos se utilizan para controlar los tamaños de las correcciones aplicadas a las mediciones en un ajuste (Ghilani & Wolf, 2006). Una observación será más precisa cuanto mayor sea su peso; es decir su variación es menor, mayor es su peso, por lo cual se puede afirmar intuitivamente que los pesos son inversamente proporcionales a las variaciones.

Cuanto las observaciones no están correlacionadas el peso de las observaciones viene dado por la siguiente formula:

$$P = \frac{1}{\sigma^2} \quad (2)$$

Third-Order Design (THOD): Validación de la Red y la posibilidad de incorporar nuevas observaciones

Para resolver este problema lo que se pretende realizar es validar la red existente, de acuerdo a la resolución de los problemas anteriores.

Para realizar la validación se deben evaluar las precisiones obtenidas, es decir el rango de error versus la magnitud de la deformación que se quiere observar, es decir la obtención de una coordenada con su respectiva precisión, esta última no debe ser superior al valor mínimo de deformación que se pretende encontrar.



4. Metodología

4.1. Antecedentes geográficos, geométricos y otros del objeto de estudio

El talud está ubicado en la comuna de San Rosendo, Región del Biobío. Se encuentra en la intersección del camino hacia Turquía (localidad de Yumbel) y el sector urbano de San Rosendo. La construcción del talud es producto del emplazamiento de un puente que une las comunas Laja y San Rosendo, este último inaugurado en mayo del año 2010. Como coordenadas UTM de referencia Norte 5873460 y Este 702482.

Desde el punto de vista geométrico el talud tiene una longitud de 100 metros, una altitud de 29 metros, que se encuentra dividido en 3 terrazas, donde la primera tiene una altura (inferior) de 10 metros aproximados y las otras dos (superiores) de 6 metros. Considera la parte estructural, el talud es piedra rocosa, arcilla y además de los materiales incorporados por la obra del MOP, lo cual se describe más adelante.

Como anteriormente se indico el talud, presento derrumbes posteriores a su inauguración, por lo cual, el MOP, creo una obra de emergencia con el objetivo de reforzar y prevenir accidentes con consecuencias de gravedad. Esta obra se denomino “Conservación periódica obras de emergencia, aceos norte puente laja, comuna de San Rosendo, Región del Biobío”, el cual fue realizado por la empresa COSIGMA Ltda. Su fecha de recepción (provisoria) el día 6 de noviembre del 2016 (Ministerio de obras Públicas, Formulario para la calificación del contratista recepción provisoria, 2016). Se realizaron las siguientes labores:

- Relleno Estructural Permeable
- Imprimación

- Estructuras con: Hormigón H-5, Hormigón h-30, realización de Armadura A-6342H. y Moldajes
- Embudos para la descarga de Agua
- Descargas de Agua en tubos corrugados en media caña D= 0,60 m
- Revestimiento de canales, fosos y contrafosos.
- Suministro y colocación de barreras de hormigón
- Mallas para hormigón proyectado en talud
- Otras.

A continuación, se muestra una figura que muestra el talud, antes de la realización de la obra de emergencia:



Figura 3: Talud antes de contrato de emergencia

Fuente: <https://www.lajino.cl/2015/07/vialidad-realizara-estudio-para-terminar-con-rodados-desde-ladera-sanrosendina-en-acceso-a-puente-sobre-rio-laja/>, Recuperado 17-12-2018

Sin embargo, pese a los trabajos realizados, con el fin de reforzar el talud, este sigue teniendo ocasiones de derrumbes, como se aprecia en las figuras siguientes, las cuales fueron tomadas en el mes de Mayo del 2018.



Figura 4: Talud entrada a San Rosendo, Región del Biobío

Fuente: Fotografía tomada por el autor



Figura 5: Talud San Rosendo, Mayo 2018

Fuente: Fotografía tomada por el autor



Figura 6: Talud con tratamiento del MOP, Mayo 2018



Figura 7: Talud en Noviembre 2018

Fuente: Fotografía tomada por el autor

4.2. Antecedentes geográficos, geológicos y otros de la zona de estudio.

La región de estudio está comprendida en las comunas de San Rosendo y Laja, pues en ambas comunas han de influir en el estudio del talud.

Laja: Comuna ubicada en la Región del Biobío, provincia del Biobío, limita al norte con la comuna de Yumbel y San Rosendo; al sur este con la comuna de Los Ángeles y al oeste con la comuna de Nacimiento. Desde el punto de vista geomorfológico está “se localiza en un área de contacto entre la depresión central y la cordillera” (Municipalidad de Laja, PLADECO, 2014). Además esta comuna “presenta el aspecto de una planicie suavemente ondulada, plana en algunos lugares” (Municipalidad de Laja, PLADECO, 2014). Por otro lado considerando la hidrología de la comuna, se localiza en las subcuencas del río Laja y río Bio Bío.

San Rosendo: Esta comuna se ubica la Región del Biobío y pertenece a la provincia del Biobío, tiene como límite sur la Comuna Laja, al Este Yumbel y Sur Este Los Ángeles. Además “Su relieve constituido por la depresión intermedia como unidad morfológica principal, a que se caracteriza por una topografía ondulada de acumulación fluvio-glacio-volcánica, donde se acentúa más el carácter glacial” (Hernandez de Aragón Reyes, 2016). Es importante mencionar que tiene una topografía irregular, donde se presenta una serie de lugares accidentados, siendo muy variada su topografía, asimismo presenta un suelo no drenante (arcillas y limos)

“Actualmente, la ciudad de San Rosendo está formando una conurbación con La Laja, capital (sector urbano) de la vecina comuna de Laja”.

A continuación se muestran los diferentes mapas que caracterizan de mejor forma la región de estudio.

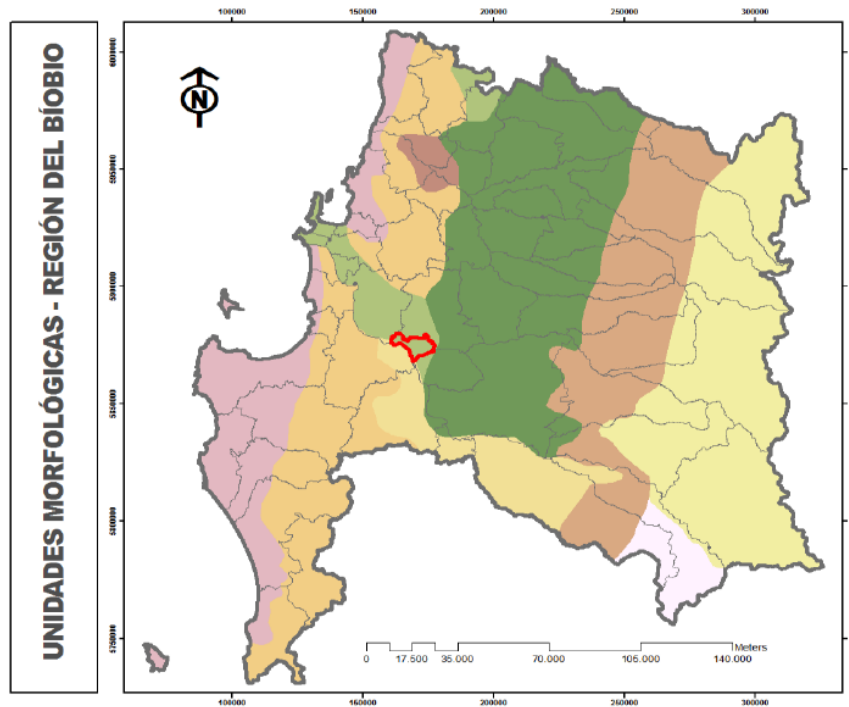
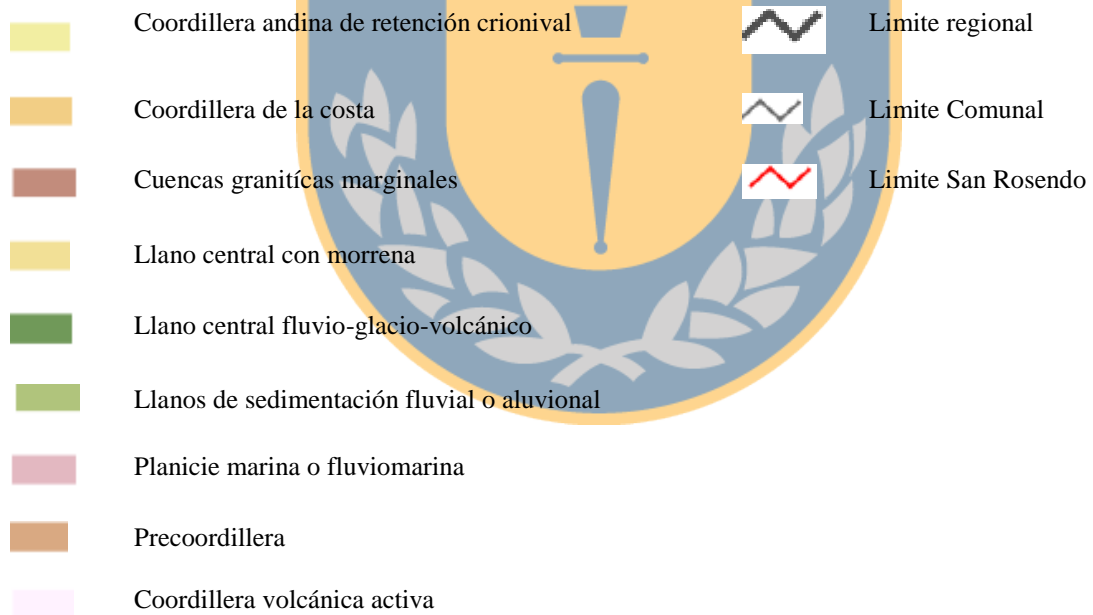
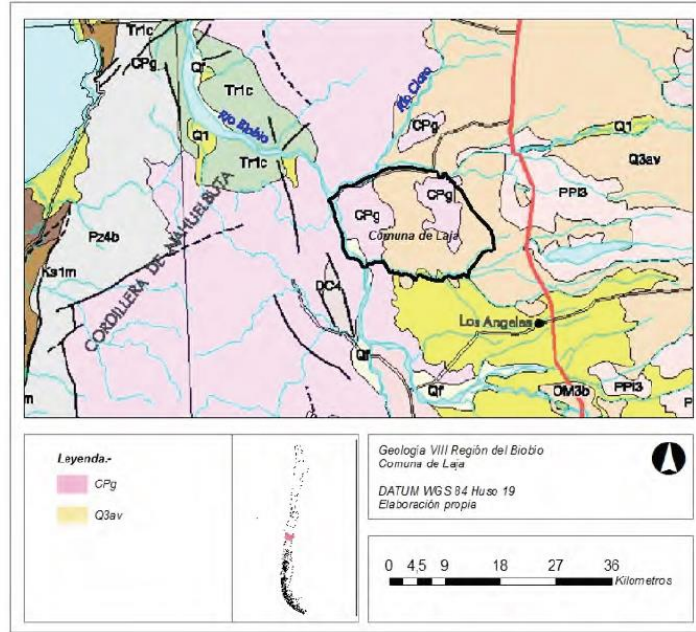


Figura 8: Mapa geológico zona de estudio, unidades morfológicas San Rosendo.

Fuente: PLADECO 2016.2019, San Rosendo





CP_g	Carbonífero-Pémico. Granitos, granodioritas, tonalitas, dioritas de hornablenda y biótica.
$Q3_{av}$	Cuaternario, Depósitos de avalancha volcánica, asociados a colapso parcial de edificios volcánicos

Figura 9: Mapa Geológico de Laja
Fuente: PLADECO, comuna de Laja.

4.3. Determinación del tipo de deformación posible a encontrar.

Considerando los 3 tipos de deformaciones (secular, periódica y episódica) y de acuerdo a las condiciones del objeto de estudio (talud), de los antes, es que se establece que el tipo de deformación a determinar es del tipo episódica, pues la estructura ha sufrido derrumbes, los cuáles son de forma repentina y acelerada, aunque no se descarta la posibilidad la existencia de deformaciones seculares o periódicas. Además el tipo de tratamiento de ingeniería que ha recibido en general el talud, es con el fin de que la estructura no sufra derrumbes, reforzándolo y también colocando protecciones frente a la inminente posibilidad de derrumbe.

Estimación de la magnitud de deformación a ser encontrada

Para realizar la estimación del desplazamiento de los puntos en las diferentes épocas, es necesario considerar todos los antecedentes mencionados, para de esta forma poder estimar un parámetro de desplazamiento. La estimación a considerar será 8 centímetros de desplazamiento superficial o estructural y esto es justificado mediante todas las ocasiones de derrumbes. Es importante decir que pueden existir deformaciones menores a 8 centímetros, pero no serán percibidas por este sistema, es decir por su aplicación.

4.4. Realización de análisis de propagación de errores

En el proceso de cuantificar la magnitud mínima de deformación que se puede encontrar en el objeto de estudio, considerando la instrumentación utilizada y procesos realizados, es que se hace necesario hacer un pre-análisis de propagación de errores.

Es importante señalar que las coordenadas cartesianas geocéntricas fueron traspasadas a un sistema de coordenadas topocéntrico local (geodésico local) a través de un Script proporcionado por la facultad de Ingeniería de la Universidad de Perdue, para ser ejecutado en el *software Matlab* cuya versión es la R2015.8.1.

Antes de continuar explicando es importante tener en cuenta la siguiente figura, pues representa la ubicación de los puntos de la red.

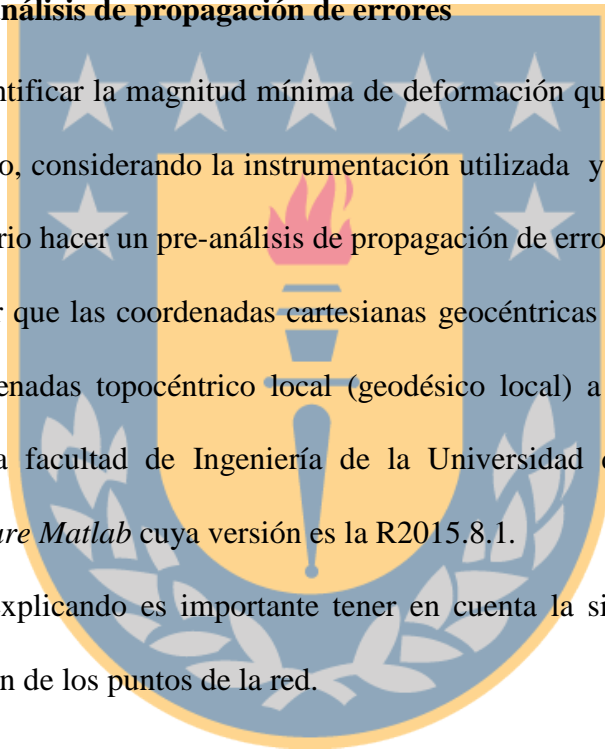




Figura 10: Distribución de los puntos en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Con las coordenadas del punto seleccionado para realizar el monitoreo, el cual corresponde al PR3, dio paso a la elección de un punto del talud observado. Donde se obtuvo el ángulo horizontal con respecto a PR4, debido a que este último fue utilizado para orientar el monitoreo en terreno, el ángulo vertical y la distancia. Con todo esto anterior se procedió a crear la función para obtener la coordenada del punto del talud y poder hacer el análisis de propagación de errores.

- Ecuación (función) con la cual se obtiene la coordenada del talud o también denominado “*Target Point*” la cuál es la siguiente:
- Función de la matriz Jacobiana

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha) \\ Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \text{sen}(\alpha) \\ Z_{PR3} + d * \cos(\delta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:

1. X_T : Corresponde a la coordena X del Target Point
2. Y_T : Corresponde a la coordena Y del Target Point
3. Z_T : Corresponde a la coordena Z del Target Point
4. δ = ángulo vertical entre target point y el PR3
5. α = ángulo horizontal entre target point y el PR3

- Matriz Jacobiana, la cual es representada por G.

$$G = \frac{\partial \vec{X}_T}{\partial (\vec{X}_{PR3}, d, \delta, \alpha)} \quad (4)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial X_{PR3}} & \frac{\partial X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial Y_{PR3}} & \frac{\partial X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial Z_{PR3}} & \frac{\partial X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial d} & \frac{\partial X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial \delta} & \frac{\partial X_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial X_{PR3}} & \frac{\partial Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial Y_{PR3}} & \frac{\partial Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial Z_{PR3}} & \frac{\partial Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial d} & \frac{\partial Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial \delta} & \frac{\partial Y_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Z_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial X_{PR3}} & \frac{\partial Z_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial Y_{PR3}} & \frac{\partial Z_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial Z_{PR3}} & \frac{\partial Z_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial d} & \frac{\partial Z_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial \delta} & \frac{\partial Z_{PR3} + d * \text{sen}(\delta) * \cos(\alpha)}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \quad (5)$$

- Matriz varianza covarianza (MVC), la cual está expresada de la siguiente forma:

$$\sum_{\vec{X}, d, \delta, \alpha} \quad (6)$$

- Ecuación de propagación de errores o de covarianza que se muestra a continuación

$$\sum_{\vec{X}, d, \delta, \alpha} = G * \sum_{\vec{X}, d, \delta, \alpha} * G' \quad (7)$$

- Resolviendo la ecuación anterior, se tiene la desviación estándar en la determinación de las coordenadas del punto del talud (objeto de estudio), extrayendo la diagonal de la matriz, pues corresponde a la varianzas y calculando la raíz cuadrada se obtienen la desviación estándar y de esta forma se estiman las precisiones buscadas.

4.5. Implementación de una Red óptima de monitoreo (Resolver los problemas de diseño de los 4 órdenes).

Para lograr un óptimo diseño de la red tridimensional (Red GPS), se tradujo en resolver los problemas de diseño establecidos por Grafarend (1974), los cual se mencionan a continuación:

4.5.1. Resolución del problema de diseño de orden cero (ZOD):

Para la elección del sistema de referencia óptimo, esta etapa fue dividida en dos partes:

1. Elección del tipo de sistema de referencia a utilizar: El tipo de sistema de referencia utilizado fue Sistema Geocéntrico, debido al tipo de red empleada en este estudio, que corresponde a 3D (Tridimensional). Además como la red fue medida con observaciones GNSS, el sistema de referencia del satélite, tiene como naturalidad el origen en el centro de masa de la tierra.
2. Elección de la realización de un sistema de referencia: Posteriormente a la definición del tipo de sistema de referencia, se selecciona una realización, en este caso fue SIRGAS-CON y SIRGAS Chile. Luego se tienen que fijar al menos 7 cantidades ya que es una red

tridimensional, y por ende se está trabajando en R3, lo cual desde el punto de vista práctico esto significa tener la cantidad de estaciones fiduciales suficientes del marco de referencia seleccionado, de modo que la red está vinculada y por ende se pueda establecer su ubicación, y no se asuma que “en el aire”. Asumiendo que la escala viene dada por el segundo, queda por determinar las otras 6 cantidades. Esto último, significa en la práctica fijar dos estaciones pertenecientes a SIRGAS-CON (ANGO) y otra a SIRGAS Chile (UDEC), para este caso en particular se seleccionaron las cuáles se encontraban más cercanas a la región de estudio, y fueron UDEC (Los Ángeles) y ANGO (Angol). A continuación se muestra un diagrama de la ubicación de las estaciones:

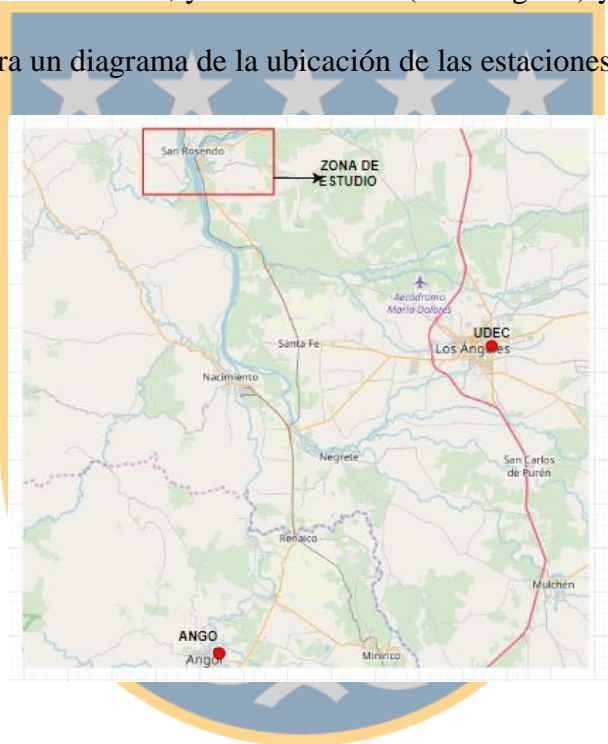


Figura 11: Distribución de los puntos de la red y las estaciones fiduciales

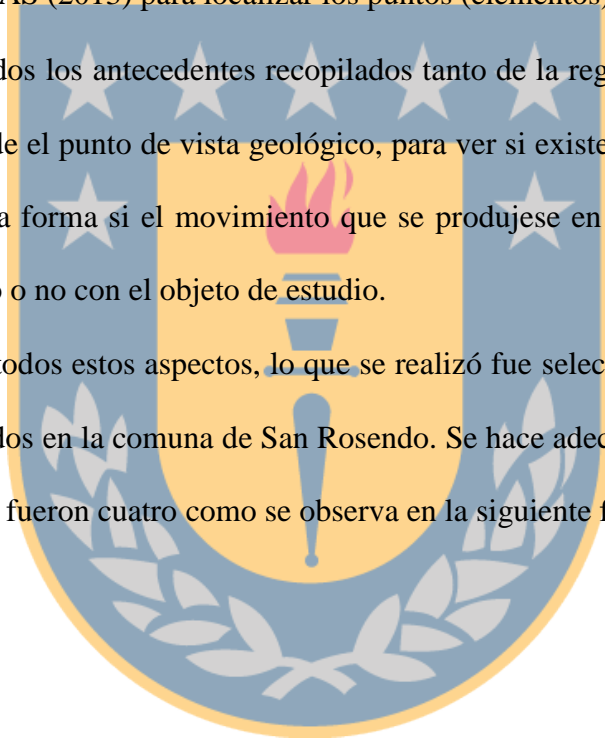
Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Resolución del problema de diseño de orden uno (FOD)

Para desarrollar esta etapa lo que se realizó fue considerar los siguientes aspectos:

- Instrumentación utilizada: se estableció utilizar receptores de doble frecuencia, con el método de posicionamiento estático.
- Poder realizar la cantidad suficientes de observaciones, la red GPS se midió en 5 sesiones generando las líneas de bases suficientes para obtener redundancias de observaciones.
- Guía de SIRGAS (2013) para localizar los puntos (elementos).
- Considerar todos los antecedentes recopilados tanto de la región de estudio como del talud, desde el punto de vista geológico, para ver si existe presencia de alguna falla, y de esta forma si el movimiento que se produjese en la región de estudio fuera solidario o no con el objeto de estudio.

Luego de considerar todos estos aspectos, lo que se realizó fue seleccionar dos puntos en la comuna de Laja y dos en la comuna de San Rosendo. Se hace adecuado señalar que los puntos a monumentar fueron cuatro como se observa en la siguiente figura.



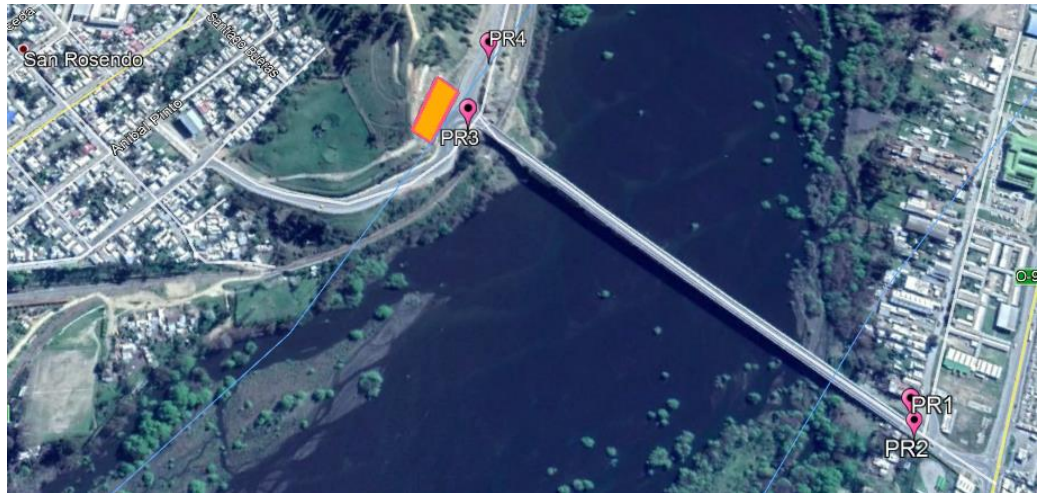


Figura 12: Puntos de la red

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3. Resolución del problema de Diseño de Orden dos (SOD).

La resolución de este problema consistió en establecer el peso de las observaciones, que corresponde las líneas bases generadas. Pues cómo se realizó una red tridimensional medida con GPS y procesada con el *Software Trimble Business center* (expuesto más adelante en la descripción de la etapas de terreno y postproceso), entonces corresponde al peso obtenido de las líneas de base procesadas.

La ponderación de las líneas base es la siguiente:

$$P_{\Delta X_{AB}} = \frac{1}{\sigma_{\text{Linea Base formada}}} = \frac{1}{\sigma_{(\Delta x_{AB})}^2} \quad (8)$$

Donde:

$P =$ *Peso de las observaciones*

$\sigma^2 =$ *Desviación estandar*

$AB =$ *Linea de base formada*

Como se ignoró la correlación matemática entre las líneas de base medidas simultáneamente, la matriz de peso tiene la estructura diagonal de bloque (Fotiou, Pikridas, Rossikopoulos, & Chatzinikos, 2009):

$$P = \begin{bmatrix} P_{12} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_{12} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & P_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Considerando que se obtuvieron 12 líneas bases formadas, pues la red fue medida en 5 sesiones con el fin de trabajar con líneas bases independientes y no triviales, puesto que esto afecta en el ajuste de observaciones.

4.5.4. Resolución del problema de Diseño de orden tres (THOD)

Para dar solución a este problema lo que se realizó fue tomar las líneas de base procesadas y ajustarlas, obtener las coordenadas de cada uno de los puntos y evaluar sus precisiones, de modo de evaluar la red. El evaluar la red significa validarla si es que es apta para encontrar las deformaciones dentro del rango establecido al inicio del proyecto, que son 8 centímetros.

Para validarlas lo que se hizo fue comparar estas precisiones con el rango de deformación que se desea encontrar, en el sistema de monitoreo implementado, de acuerdo a los antecedentes propios de la naturaleza de la situación, es decir se aplicó el siguiente criterio:

Punto	Precisión del punto en Norte (m)	Precisión del punto en Este (m)	Precisión del punto en Z (m)	Rango de deformación buscada (m)	Rango de deformación buscada > Precisión del punto en Norte, Este y Z (Si ó No)	¿PASA?
PR1	0.013	0.009	0.011	0.080	SÍ	SÍ
PR2	0.013	0.009	0.011	0.080	SÍ	SÍ
PR3	0.013	0.009	0.011	0.080	SÍ	SÍ
PR4	0.013	0.010	0.011	0.080	SÍ	SÍ

Tabla 1: Tabla de Validación de la Red GPS

Fuente: Elaboración propia

Luego de realizar este análisis de proceder a validar la red realizar, generando también una red robusta, y apta para detectar el rango de las deformaciones establecidas al inicio, de acuerdo a todos los antecedentes del objeto de estudio.

4.6. Descripción de las etapas de terreno

Anteriormente fueron descrita las etapas necesarias para realizar el sistema de monitoreo, pero algunas de ellas se desarrollaron antes de las labores en terreno y otras después. Por lo cual es adecuado describir lo realizado en terreno de modo secuencial.

4.6.1. Monumentación de los puntos de la Red.

Ya establecida la localización de los puntos (Apartado 5.4.1), se ejecutó la monumentación física en terreno, donde se consideró lo siguiente:

- Fierro de diámetro de 0.5” para su marcación como representación del punto

- Profundidad de 30 cm y 20 centímetros de ancho y largo.
- Material: Cemento, arena, agua, entre otros para la construcción del hormigón

4.6.2. Realización de la Red GPS

La red se llevó a cabo sobre los puntos monumentados, es decir cuatro estaciones, donde cada una de ellas fue denominada con el nombre PR y un número correlativo, es decir PR1, PR2, PR3 y PR4. Como se mencionó anteriormente dos de los puntos están ubicados en Laja y los otros restantes en la comuna de San Rosendo (ver monografías en los anexos).

Planificación Logística y técnica de la Campaña GPS

Antes de realizar en el terreno la red GPS, fue necesario hacer una planificación previa, de modo de ahorrar tiempo y otros costos, además de optimizar cada una de las acciones a practicar (ver Anexos). Otro aspecto importante para la realización de la red GPS, es la instrumentación la cuál es descrita en los anexos.

Realización de la Red GPS en terreno

La Red de realizo con fecha 18 de enero de 2019, en la cual las condiciones climáticas fueron favorables para la realización de las mediciones y se midió en 5 sesiones, con el fin de obtener redundancia y poder realizar ajuste:

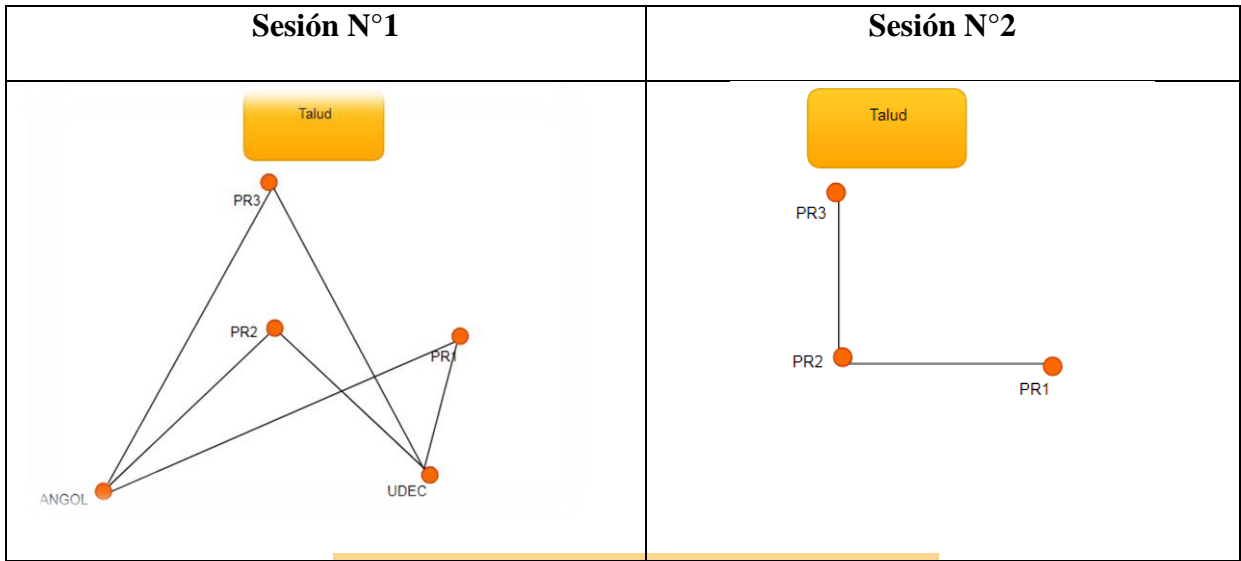


Figura 13: Sesión 1 y 2 de mediciones GPS

Fuente: Elaboración propia

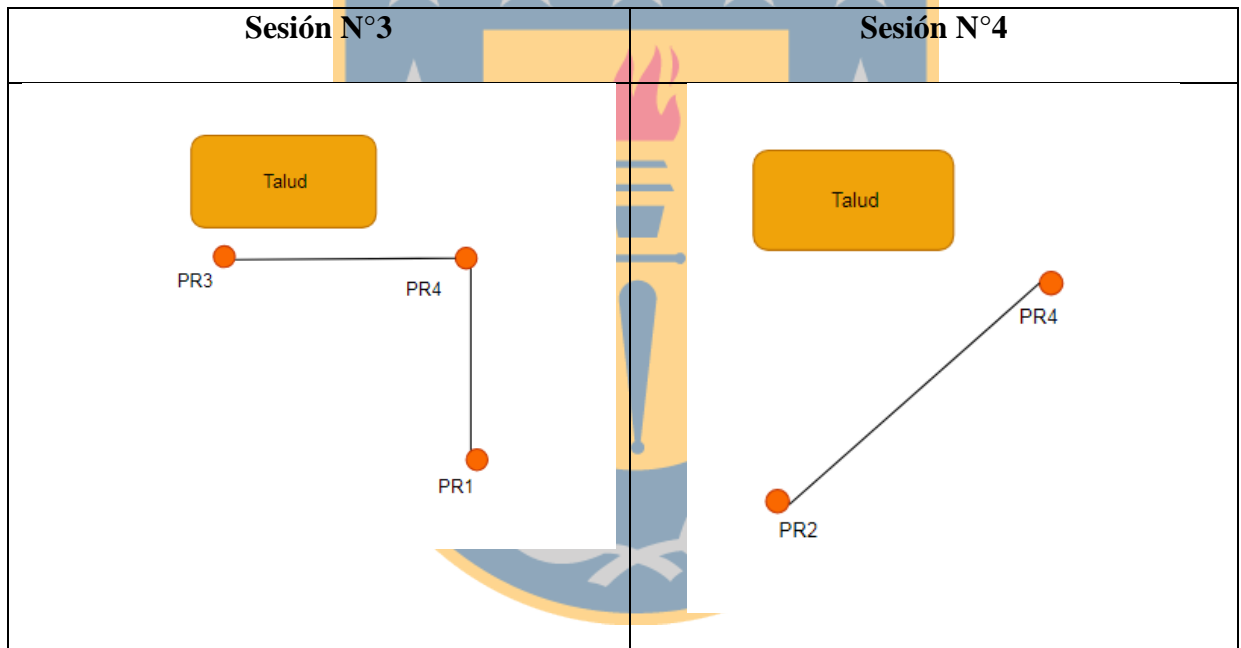


Figura 14: Sesión 3 y 4 de mediciones GPS, Fuente: Elaboración propia

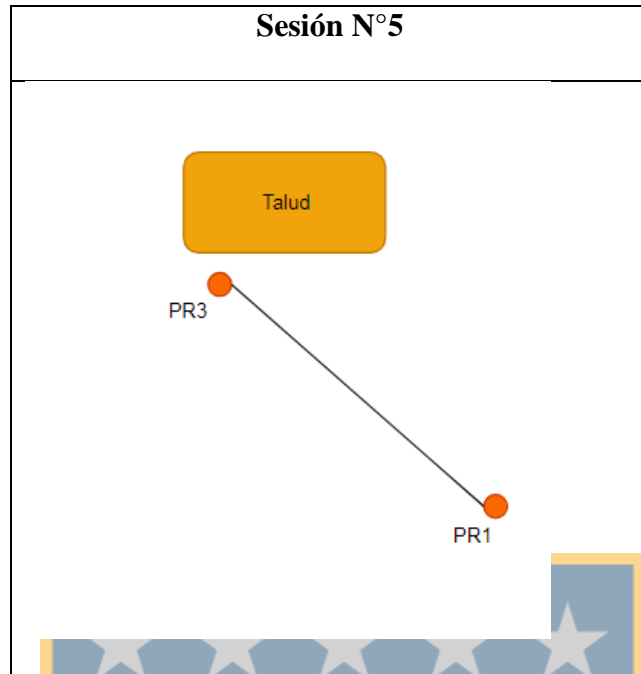


Figura 15: Quinta sesión
Fuente: Elaboración propia

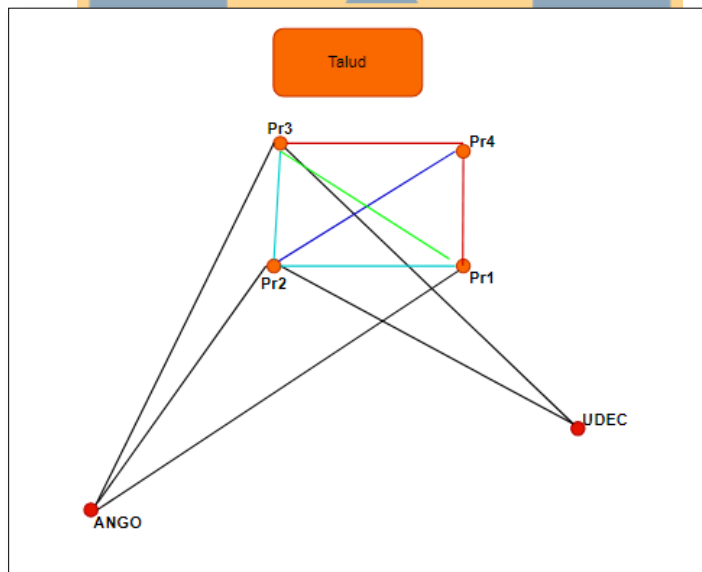


Figura 16: Red con todas líneas bases

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de duración de las sesiones viene determinada por la distancia entre cada una de las líneas bases, según la siguiente tabla:

Línea Base	Tiempos de observación recomendados (minutos)					
	4 satélite		5 satélites		6 o más satélites	
	L1	L1/L2	L1	L1/L2	L1	L1/L2
1 – 10 km	60	20	35	12	25	8
10 – 20 km	75	25	45	15	30	10
20 – 50 km	105	35	75	25	60	20
> 50 km	-	60	-	45	-	30

Tabla 2: Tiempos de observación para mediciones GPS

Fuente: Tomada del autor US Army Corps of Engineers, 2003.

4.6.3. Realización de la campaña de monitoreo en terreno

El monitoreo del talud se realizó en dos partes de este, el cual cuenta principalmente con:

Sector de monitoreo del talud

Como el Talud cuenta 3 terrazas, se monitoreó en 4 puntos de la primera terraza, pues ahí existen gálibos instalados (figura 17) para dar más sujeción a este (Ministerio de Obras Públicas, 2015). Los cuales son conocido como tratamiento de anclaje o bulones, además la otra región de monitoreo corresponde a la parte superior de la tercera terraza, la cual cuenta con unos pernos (26) de una altura de 40 cm (figura 18) aproximadamente que sostienen la malla que cubre parte del talud, dándole un tratamiento especial. Es importante mencionar que no fue monitoreo el talud en su totalidad, pues este se encuentra con algún tipo de tratamiento conocido como hormigón proyectado, que tiene por objetivo dar otro tipo de protección, tras su evidente derrumbe y también al

desprendimiento de manera continua y por ende no opción de instalar algún punto para monitorear.



Figura 17: Puntos de monitoreo
Fuente: Fotografía tomada por el autor



Figura 18: Puntos de Monitoreo del talud, tercera terraza

Fuente: Elaboración propia

Monitoreo del talud: Para el proceso de monitorear el talud, se definió cual sería el punto de observación de este, el cual lo definido desde la ubicación de los puntos de la

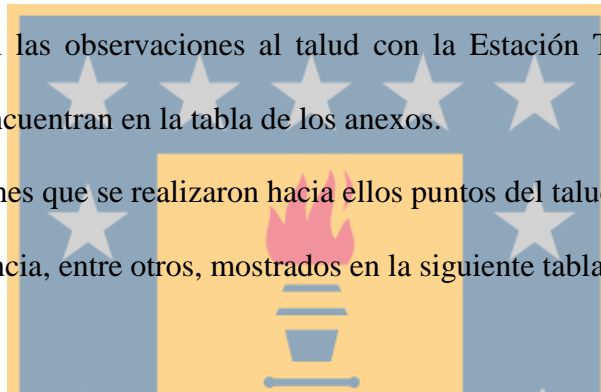
red GPS, pues por la topografía y características de la región, no puede ser ubicado en otro punto que no fuera el punto PR3.

Es importante mencionar que se utilizó el punto PR3 por dos razones:

- La distancia de los PR1 y PR2 es superior a 500 metros hacia el talud. No se dispone de una Estación Total que realice mediciones de distancia por rebote por observaciones mayores a esta distancia.
- La distancia desde los otros puntos, no permite hacer buenas observaciones terrestres, dado por el tamaño de los *target point*.

Las observaciones primeramente se realizaron al PR4, calando el ángulo horizontal en 0 y luego se realizaron las observaciones al talud con la Estación Total Focus 2, cuyas especificaciones se encuentran en la tabla de los anexos.

El tipo de observaciones que se realizaron hacia ellos puntos del talud (Target Point), es de tipo angular, distancia, entre otros, mostrados en la siguiente tabla.



Estación	Zona del Talud	Punto Visado	AH	AV	SD	DH
PR3	Primera terraza o Tercera Terraza					

Tabla 3: Libreta de monitoreo

Fuente: Elaboración propia

Para la terraza baja los puntos fueron denominados con la letra F, es decir F_i (4 en total)

y para la tercera terraza, con la letra M, es decir M_i .

4.7. Proposición del modelo de deformación

De acuerdo a los antecedentes del objeto de estudio, y a la magnitud de las precisiones obtenidas, se propone un modelo de deformación del tipo estático, pues se trata de establecer el procedimiento de monitoreo, para luego cuantificar la deformación desde el punto de vista local, directamente con el objeto de estudio, que este caso es el talud.

4.8. Procesamiento de Red GPS

El procesamiento de la Red GPS, se realizó en varias etapas, las cuales son mencionadas a continuación:

Descarga de los datos del receptor:

Esto se realizó mediante la controladora del receptor, donde los datos fueron importados a esta y posteriormente al computador, la extensión de los archivos de observación de cada uno de los puntos de la red es *.T02.

- Descarga de las observaciones de las estaciones fiduciales UDEC y ANGO, esto se realizó desde la página del Centro Sismológico Nacional. (CSN, 2019)
- Posteriormente se establecieron las coordenadas, donde ANGO fue otorgada por la página *web* del SIRGAS y la estación fiducial UDEC por Henry Montecino, Doctor en Geodesia, docente de la universidad de Concepción
 - ✓ Obtener coordenadas de la estación UDEC y ANG (Angol).

Las coordenadas de la estación UDEC fueron encontradas en la época 2017.9740. Sin embargo como la red fue realizada en la época 2019.0493, se procedió a llevar estas coordenadas a la época donde se realizó la Red en terreno.

Por otro lado, las coordenadas de la segunda estación ANGO, fueron encontradas en la época 2017,0767, la cual también es distinta a la época de realización de la red GPS en terreno, entonces se llevaron las coordenadas a la época correspondiente al día en terreno.

✓ Cambio de época de las coordenadas de la estación UDEC y ANGO: para desarrollar esta etapa lo que se realizó fue utilizar el modelo de Velocidades VEMOS, versión 2015 (de SIRGAS), para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$\overline{X}(T) = \vec{X}(T_0) + \vec{V}(T - T_0) \quad (10)$$

Dónde:

$\vec{X}(T_0)$ = Corresponde al vector coordenadas de la estación en la época de realización de la red en terreno.

\vec{V} = Corresponde al vector de las velocidades de la estación UDEC.

T = Corresponde época de realización de la red en terreno, 2018.7726

T_0 = Corresponde época 2017.9749

Todos los elementos mencionados anteriormente se tenían disponibles para resolver la ecuación y encontrar el vector de coordenadas de la estación UDEC, excepto el vector de velocidades. Para obtener este vector de velocidades se tuvo que realizar una interpolación de las velocidades, de todas las estaciones que componían SIRGAS, creando una superficie de esta, de manera de obtener el vector de velocidades.

La estación ANGO por su parte si estaban disponibles sus velocidades correspondientes, en la plataforma de internet oficial de SIRGAS, por ende no hubo necesidad de realizar

una interpolación, para obtenerlas y de esta forma obtener las coordenadas en la época correspondiente.

- Procesamiento en *software*: Luego de tener las coordenadas de las estaciones de fiduciales en la época de medición de la red, se procedió a realizar el procesamiento. Para este último, se utilizó el software TBC versión 4.0 de carácter comercial. Para obtener las coordenadas de los puntos que forman la red (PR1, PR2, PR3, PR4) fue necesario realizar lo que se indica a continuación a grandes rasgos:

Posterior a tener los puntos de la red lo que se realizó fue procesar en el *software*, donde las principales configuraciones son: sistema de coordenadas, antena, sistema de referencia, además de introducir las coordenadas de la estaciones fiduciales. Posteriormente se procesaron las líneas bases de los 4 puntos, de manera que se obtuvo las coordenadas en un sistema de coordenadas cartesiano de coordenadas geocentricas. Luego mediante un *Script* en el lenguaje m, del *software Matlab* se realizó la transformación de las coordenadas de los puntos desde el sistema al sistema topocéntrico local (N, E, Up).

5. Resultados

5.1. En el procesamiento de red GPS:

- Vector Coordenadas ECEF de la estación UDEC, en época 2017.9740. en el orden Norte, Este y Z, en metros.

$$UDEC = \begin{bmatrix} 1537191.350 \\ -4829688.931 \\ -3859233.102 \end{bmatrix}_{2017.9740}$$

- Vector Coordenadas ECEF estación UDEC en época 2019.0493 en el orden Norte, Este y Z, en metros.

$$UDEC = \begin{bmatrix} 1537191.348 \text{ m} \\ -4829688.934 \text{ m} \\ -3859233.079 \text{ m} \end{bmatrix}_{2019.0493}$$

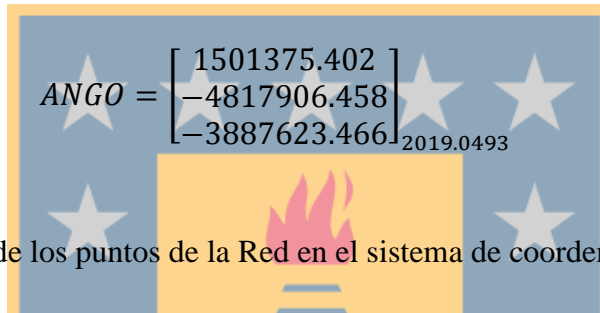
- Vector de Velocidades de la estación UDEC

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} -0,0009771 \\ -0,001205 \\ 0,011355 \end{bmatrix}$$

- Vector de coordenadas ECEF de la estación ANGO en la época 2017.0767, en el orden Norte, Este y Z, en metros.

$$ANGO = \begin{bmatrix} 1501375.432 \\ -4817906.445 \\ -3887623.552 \end{bmatrix}_{2017.0766}$$

- Vector de coordenadas de la estación ANGO en la época 2019.0493, en el orden Norte, Este y Z, en metros.



$$ANGO = \begin{bmatrix} 1501375.402 \\ -4817906.458 \\ -3887623.466 \end{bmatrix}_{2019.0493}$$

- Coordenadas de los puntos de la Red en el sistema de coordenadas geocéntricas.

Punto	X (m)	Y(m)	Z(m)
PR1	1510331.022	-4852545.582	-3841067.721
PR2	1510330.851	-4852530.132	-3841086.538
PR3	1509972.852	-4852924.558	-3840756.651
PR4	1510012.038	-4852972.949	-3840677.225

Tabla 4: Coordenadas cartesianas geocéntricas de los de la Red

Fuente: Elaboración propia

5.2. Propagación de Errores

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.8199 & -1.3405 & 18.7756 \\ 0 & 1 & 0 & -0.5703 & 0.9325 & 26.9914 \\ 0 & 0 & 1 & -0.0496 & -32.8795 & 0 \end{bmatrix}$$

Aplicando la ecuación de propagación de errores (o propagación de covarianza), se tiene la siguiente matriz de propagación de errores:

$$\Sigma_{\vec{x},d,\delta,\alpha} = \begin{bmatrix} 0.0025 & 0.0023 & 0.0002 \\ 0.0023 & 0.0042 & -0.0001 \\ 0.0002 & -0.0001 & 0.0058 \end{bmatrix}$$

- Desviaciones de las coordenadas del talud, considerando un sistema topocéntrico local.

N (m)	E (m)	Up (m)
0.05 m	0.065	0.081

Tabla 5: Precisiones en las coordenadas de un Sistema de Referencia Topocéntrico.

Fuente: Elaboración propia

5.3. Pesos de las líneas Base

Las líneas de base generadas son las que se muestran a continuación, a modo de entrega de resultados los pesos serán indicados en la misma tabla y no en una matriz.

DE	A	Peso de las observaciones		
		$P_x: \frac{1}{\sigma_x^2}$	$P_y: \frac{1}{\sigma_y^2}$	$Peso_z: \frac{1}{\sigma_z^2}$
ANGO	PR1	$\frac{1}{0.009^2}$	$\frac{1}{0.022^2}$	$\frac{1}{0.018^2}$
ANGO	PR3	$\frac{1}{0.009^2}$	$\frac{1}{0.022^2}$	$\frac{1}{0.020^2}$
UDEC	PR1	$\frac{1}{0.015^2}$	$\frac{1}{0.034^2}$	$\frac{1}{0.033^2}$
PR1	PR2	$\frac{1}{0.002^2}$	$\frac{1}{0.005^2}$	$\frac{1}{0.003^2}$
PR1	PR4	$\frac{1}{0.002^2}$	$\frac{1}{0.004^2}$	$\frac{1}{0.004^2}$
PR3	PR4	$\frac{1}{0.002^2}$	$\frac{1}{0.004^2}$	$\frac{1}{0.004^2}$
PR3	PR1	$\frac{1}{0.002^2}$	$\frac{1}{0.004^2}$	$\frac{1}{0.003^2}$
UDEC	PR3	$\frac{1}{0.015^2}$	$\frac{1}{0.035^2}$	$\frac{1}{0.033^2}$
UDEC	PR2	$\frac{1}{0.016^2}$	$\frac{1}{0.033^2}$	$\frac{1}{0.034^2}$
ANGO	PR2	$\frac{1}{0.011^2}$	$\frac{1}{0.026^2}$	$\frac{1}{0.023^2}$
PR2	PR3	$\frac{1}{0.003^2}$	$\frac{1}{0.005^2}$	$\frac{1}{0.003^2}$
PR2	PrR4	$\frac{1}{0.003^2}$	$\frac{1}{0.003^2}$	$\frac{1}{0.004^2}$

Tabla 6: Pesos de las líneas bases generadas en la Red GPS

5.4. Coordenadas en sistema topocéntrico local, de los puntos monitoreados

Punto	N (m)	E (m)	Up(m)
M1	20627,8242	27,46013391	6370390,9
M2	20628,7820	28,41788532	6370393,7
M1	20627,8202	27,45612836	6370390,9
M2	20628,7749	28,41078379	6370393,7
M3	20630,3650	30,00086419	6370390,9
M4	20633,9650	33,60090723	6370393,6
F1	20626,5757	26,21159026	6370411,5
F2	20627,0485	26,68439233	6370411,6
F3	20627,3959	27,03184838	6370411,3
F4	20627,9455	27,581373	6370411,3
F5	20628,3561	27,99196325	6370411,2
F6	20628,8216	28,45749092	6370410,9
F7	20629,5279	29,16380555	6370410,9
F8	20630,3297	29,96556527	6370410,8
F9	20631,2100	30,84586127	6370410,8
F10	20632,0787	31,71457387	6370410,9
F11	20632,7468	32,38271561	6370410,9
F12	20635,6097	35,24560815	6370410,9
F13	20636,6264	36,26230926	6370410,8
F14	20635,1302	34,7661518	6370410,8

F15	20636,1279	35,7638306	6370410,4
F16	20636,9182	36,55411192	6370410,5
F17	20637,7596	37,39546096	6370410,4
F18	20638,5585	38,19437594	6370410,3
F19	20639,4071	39,043045	6370410,2
F20	20640,2071	39,84300069	6370410,2
F21	20641,0107	40,64657913	6370410,3
F22	20641,8717	41,50756592	6370410,1
F23	20642,6706	42,30651126	6370410,1
F24	20643,5774	43,21332179	6370409,9
F25	20644,4236	44,05950169	6370409,9
F26	20645,4202	45,05615223	6370409,8
F27	20642,7999	42,43583873	6370408,4

Tabla 7: Coordenadas en un sistema topocéntrico local de los puntos monitoreados

Fuente: Elaboración propia

5.5. Monitoreo en terreno

Estación	Zona del Talud Observada	Punto Visado	AH	AV	SD	DH
PR3	Terraza Baja	PR4	0	101,3094	100,874	100,853
		P1	131,4435	101,577	607,220	607,035
		P2	132,9657	101,5576	626,556	626,37
		M1	346,7244	103,1591	32,920	32,879
		M2	345,4238	97,881	34,516	34,497
		P4	0,0003	101,314	100,874	100,853
		M1	346,725	103,1609	32,915	32,874
		M2	345,4275	97,8761	34,506	34,487
		M3	351,8083	103,081	34,272	34,232
	M4	354,9228	98,1702	37,896	37,38	
	F1	317,3599	77,7273	55,457	52,097	
	F2	318,3321	77,5403	55,08	51,687	
	F3	319,366	77,5403	54,34	50,993	
	F4	320,6794	77,277	53,767	50,378	
	F5	321,6874	77,1585	53,315	49,926	
	F6	322,7834	77,3535	52,812	49,505	
	F7	324,1059	77,2961	52,597	49,287	
	F8	325,3726	77,3569	52,595	49,315	
	F9	326,6225	77,464	52,767	49,503	
	F10	327,892	77,3927	52,969	49,664	
	F11	329,1204	77,3971	52,865	49,567	
	F12	330,2364	77,461	52,883	52,883	
	F13	331,662	77,5671	53,092	53,092	
	F14	332,8898	77,6844	53,112	49,882	
	F15	334,3105	78,1884	53,27	50,174	
	F16	335,4302	78,2397	53,514	50,418	
	F17	336,5836	78,398	53,781	50,714	
F18	337,8179	78,6014	53,921	50,903		
F19	339,1238	78,814	54,089	51,121		
F20	340,2756	78,9563	54,333	51,391		
F21	341,6139	79,1705	54,445	51,556		
F22	342,783	79,239	54,802	51,913		
F23	343,8864	79,3727	55,108	52,24		
F24	345,033	79,765	55,459	52,681		
F25	346,0315	79,9215	55,896	53,138		
F26	347,1593	80,2106	56,413	53,707		
F27	348,0873	80,4434	52,577	50,115		
	Terraza Media del Talud (Tercera)					

Tabla 8: Observaciones de monitoreo obtenido.

Fuente: Elaboración propia

Donde,

AH= Observación de ángulo horizontal en decimales, sistema centesimal desde PR3 a cada *Target Point*.

AV: AH= Observación de ángulo vertical en decimales, sistema centesimal desde PR3 a cada *Target Point*.

SD= Observación de distancia inclinada en metros entre PR3 y cada *Target Point*.

DH=Observación de distancia horizontal en metros a cada *Target Point*.



6. Conclusiones

En este proyecto se implementó un sistema de monitoreo, el cual está basado en observaciones terrestres y GPS. La utilización de este instrumental y sus respectivas precisiones marcan un punto fundamental al momento de crear el sistema, pues éstas determinarán directamente su alcance para determinar deformaciones.

La caracterización de la zona y objeto de estudio (talud), son importantes, pues permiten estimar la magnitud de la deformación a encontrar. Además, es necesario en otros aspectos realizados en este proyecto como para localizar los puntos necesarios para la generación de la red de monitoreo y estimar un modelo de deformación de la red. Es por ello, que es recomendable realizar una exhaustiva investigación de todos los antecedentes antes de realizar un monitoreo.

El crear un diseño óptimo de una red de monitoreo, a través de la resolución de los sub problemas, crea una metodología útil. Esto último pues permite considerar todos los aspectos necesarios, para que la red sea la adecuada para monitorear dependiendo del objeto de estudio y sus características. El problema de diseño de orden cero, es altamente importante pues permitió elegir el sistema de referencia óptimo para el talud. Debido a que se consideró la instrumentación utilizada, que es GPS (doble frecuencia) y que utiliza como origen, el centro de masa de la Tierra, pues se determina un sistema de referencia del tipo Geocéntrico. Además, con esto permitió seleccionar un marco de referencia apropiado que es SIRGAS-Con y SIRGAS Chile, pues tiene estaciones ubicadas en distancias menor a 60 km, además de la accesibilidad a sus archivos (libre). La resolución del problema de diseño de orden uno, permitió localizar los puntos en los lugares correctos, considerando que se pudiese realizar el ajuste de observaciones y tantos otros

elementos importantes. Por su parte el resolver el problema de diseño de orden tres, permitió evaluar el peso de las líneas de base de la red GPS y denotar que entregaban precisiones milimétricas, para el monitoreo del objeto de estudio, pero en las líneas de base entre puntos de la red y las estaciones fiduciales las precisiones fueron peor con respecto entre los mismos puntos de la red. Es por esto, que se recomienda siempre hacer una red y procesar con estaciones fiduciales más cercanas posible. Sin embargo en el problema de diseño de orden tres, se pudo finalmente concluir que la red es válida, pues las precisiones no superan a las deformaciones buscadas (resultados).

Las labores en terreno, específicamente la monumentación y la medición de la red con instrumental GPS, permitió la construcción de un campo de prueba, además de contar con coordenadas tridimensionales de calidad, debido a sus precisiones milimétricas. Es importante decir que para evaluar, la altura de los puntos monumentados, en un sistema de coordenadas cartesianas geocéntricas, se podría reevaluar con nivelación geométrica, pero las condiciones de la región de estudio no son aptas para su realización.

La campaña de monitoreo en época t_0 , fue realizada con éxito, pues ya validada la red, (debido a los resultados de la resolución del problema de orden 3), se utilizó uno de los puntos, el cual de acuerdo a las deformaciones que se requieren detectar, sus precisiones son suficientes para lograr el cometido.

Los resultados provenientes de la propagación de error, arrojó que por los métodos y herramientas utilizadas se puede obtener precisiones del monitoreo al borde de los 5 a 8cm, lo que no significa que existan deformaciones menores a esta magnitud. Esto último quiere decir que pueden producirse, pero no podrán ser observadas mediante esta implementación de sistema de monitoreo.

Con el objetivo, de que este sistema pueda ser replicado, en el futuro, con respecto al objeto de estudio, se establece el siguiente resumen de como replicarlo: verificación y ubicación de los puntos monumentados. Luego realizar las observaciones y obtener las coordenadas en el sistema teocéntrico local y verificar cuanto han sido modificadas, cada una de ellas, observar y cuantificar sus cambios sus cambios en diferentes épocas.

Es necesario realizar una comparación con los procesos de monitoreo que se realizan a taludes, que son producto de la gran minería o de obras de ingeniería con gran movimiento de tierra, en donde los equipos utilizados son de gran precisión y además cuentan con una distribución homogénea y correctamente densificada de los *target point* existentes en los taludes, que están además materializados con mini prismas o tarjetas reflectantes; pero en este trabajo producto de la evidente peligrosidad del talud a estudiar, no es posible replicar dicha labor.

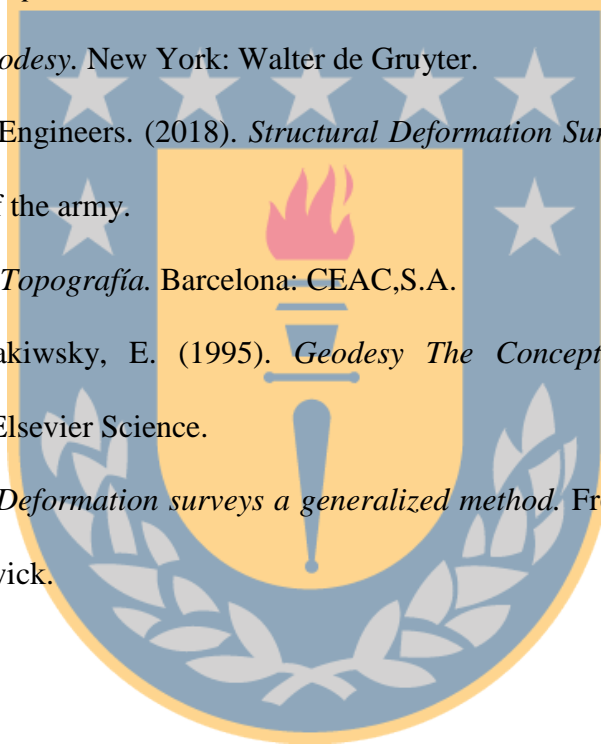
Este trabajo contribuye de manera importante, para el futuro monitoreo de las deformaciones, pues el contar con un sistema de monitoreo, para un caso en particular como es el talud de la comuna de San Rosendo. Es posible detectar algún comportamiento anómalo de la estructura cercana al tránsito vehicular y peatonal, de modo que cualquier evento proveniente del talud es un peligro inminente el cual puede ser prevenido si se realizan las mantenciones necesarias.

7. Bibliografía

- Administrador. (9 de Mayo de 2014). *El Lajino* . Recuperado el 20 de mayo de 2018, de <https://www.lajino.cl/2014/05/constantes-derrumbes-preocupa-a-quienes-transitan-por-vias-de-acceso-a-nuevo-puente-que-une-laja-y-san-rosendo/>
- Bannister, A., Raymond, S., & Baker, R. (2008). *Técnicas modernas en la topografía*. México, México: alfaomega.
- Carpio, J. P. (2001). *Redes topométricas*. Madrir: Bellisco.
- Casanova, L. (2002). *Topografía Plana*. Merida: Taller de publicaciones de Ingenieria, ULA.
- CSN. (19 de 01 de 2019). *Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile*. Obtenido de Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile: <http://gps.csn.uchile.cl/index.html>
- Fotiou, A., Pikridas, C., Rossikopoulos, D., & Chatzinikos, M. (2009). The effect of independent and trivial GPS Baselines on the adjustment of Networks in everyday engineering practice.
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2006). *Adjustment Computations Spatial Data Analysis*. New Jersey, Canada: John Wiley& Sons, Inc.
- Grafarend, E. (1974). *Optimización of Geodetic networks*. Bolletino di Geodesia a Science affni, Vol. 33, No.4, PP.351-406.
- Hernandez de Aragón Reyes, I. (2016). *PLADECO 2016-2019*. San Rosendo.
- Jekeli, C. (2012). Geometric Reference Systems in Geodesy. *Report, Division of Geodetic Science School of Earth Sciences, Ohio State University*.

- Kuang, S. (1996). *Geodetic Network Analysis and Optimal Desing*. Sterling, United States of America: Sams.
- Martinez, J. (2003). *Geología estructural y dinámica global*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Matteis, Á. F. (2003). *Geología y Geotecnia*. Rosario.
- Ministerio de Obras Públicas, V. (2015). *Conservación periódica obras de emergencia, acceso norte puente Laja, comuna San Rosendo, región del Biobío*". Concepción.
- Ministerio de obras Públicas, V. (27 de Noviembre de 2016). Formulario para la calificación del contratista recepción provisoria. Concepción, Chile.
- Ministerio de obras Públicas, V. (2016). *Manual de Carreteras, Volumen 2*.
- Montecino, H. (2015). *Sistema de Referencia Geodesicos (SGR)*. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomáticas, Los Angeles.
- Mora, F. (Abril de 2013). Monitoreo de deformación estructural por medio de técnicas geodésias terrestres(Caso de Estudio:" Copa de Agua Mulchén"). Los Ángeles, BíoBío, Chile.
- Municipalidad de Laja. (9 de Mayo de 2014). *Lajino*. Recuperado el 10 de mayo de 2018, de <https://www.lajino.cl/2014/05/constantes-derrumbes-preocupa-a-quienes-transitan-por-vias-de-acceso-a-nuevo-puente-que-une-laja-y-san-rosendo/>
- Municipalidad de Laja. (2014). *PLADECO*. Laja.
- Núñez García del Pozo, A., Valbuna Durán, J., & Velasco Gómez, J. (1992). *G.P.S.* Madrid: Ediciones de las Ciencias Sociales.
- Públicas, M. d. (2016). *Manual de Carreteras, Volumen 2*.

- Rivera, I. (2016). *Estimación de coordenadas de una red GPS de alta precisión en la ciudad de Los Ángeles*. Los Ángeles, Chile: Univerdiad de Concepción.
- Rosas, A. A. (2012). *Mediciones topográficas para la detección de deformaciones en estructuras de obra civil*. México, México.
- Sabaj, R. (2008). *identificación y caracterización de estructuras potenciales activas en la cordillera de la costa entre los 33° y 33°45's*. Santiago, Chile, Universidad de Concepción.
- SIRGAS. (2013). *Guía para la instalación de estaciones SIRGAS-CON*.
- Torge, W. (2001). *Geodesy*. New York: Walter de Gruyter.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2018). *Structural Deformation Surveying*. Washington: Department of the army.
- Valdés, F. D. (1991). *Topografía*. Barcelona: CEAC,S.A.
- Vanicek, P., & Krakiwsky, E. (1995). *Geodesy The Concepts*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Yong-Qi, C. (1983). *Deformation surveys a generalized method*. Fredericton: University of new brunswick.
- z. (s.f.).



8. Anexo

8.1. Monografías

Sistema de Monitoreo	Puntos de La red de Monitoreo								
<table><tr><td data-bbox="402 520 581 552">Nombre : PR1</td><td data-bbox="1008 520 1317 552">Fecha: Noviembre 2018</td></tr><tr><td colspan="2" data-bbox="743 562 971 741">Coordenadas Norte: 5873043.797 Este: 702920.364 <u>UTM</u> Huso : 18</td></tr><tr><td data-bbox="248 764 829 1717"></td><td data-bbox="889 764 1495 1325"></td><td data-bbox="889 1360 1495 1717">Descripción: El punto PR1, se encuentra monumentado en la comuna de Laja unos 25 metros del puente que conecta la comuna con San Rosendo, y a una distancia de 3 metros de la calzada derecha.</td></tr></table>			Nombre : PR1	Fecha: Noviembre 2018	Coordenadas Norte: 5873043.797 Este: 702920.364 <u>UTM</u> Huso : 18				Descripción: El punto PR1, se encuentra monumentado en la comuna de Laja unos 25 metros del puente que conecta la comuna con San Rosendo, y a una distancia de 3 metros de la calzada derecha.
Nombre : PR1	Fecha: Noviembre 2018								
Coordenadas Norte: 5873043.797 Este: 702920.364 <u>UTM</u> Huso : 18									
		Descripción: El punto PR1, se encuentra monumentado en la comuna de Laja unos 25 metros del puente que conecta la comuna con San Rosendo, y a una distancia de 3 metros de la calzada derecha.							

Sistema de Monitoreo

Puntos de La red de Monitoreo

Nombre : PR2

Fecha: Noviembre 2018

Coordenadas
Norte: 5873019.758
Este: 702924.238
UTM
Huso : 18



Descripción: El punto PR2, se encuentra monumentado en la comuna de Laja unos 45 metros del puente que conecta la comuna con San Rosendo, y a una distancia de 3 metros de la calzada izquierda

Sistema de Monitoreo	Puntos de La red de Monitoreo	
----------------------	-------------------------------	--

Nombre : PR3

Fecha: Noviembre 2018

Coordenadas
 Norte: 5873456.966
 Este: 702475.575
UTM
 Huso : 18



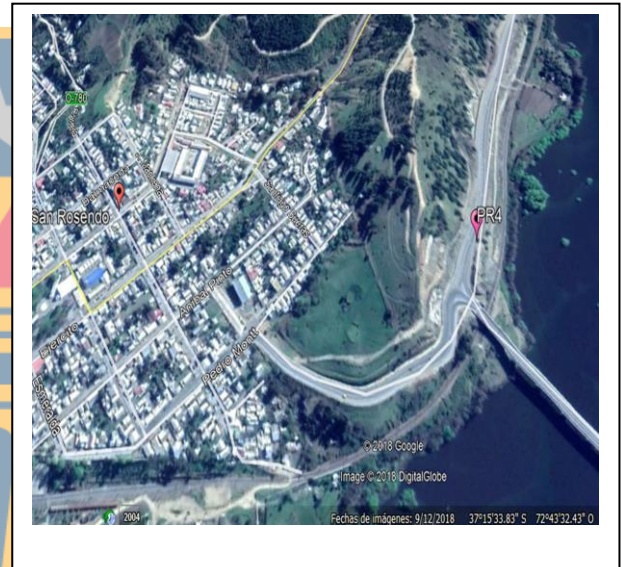
Descripción: El punto PR3, se encuentra monumentado en la comuna de San Rosendo a unos 20 metros del puente y al lado de la calzada izquierda y se encuentra distante a 30 metros del Talud.

Sistema de Monitoreo	Puntos de La red de Monitoreo	
----------------------	-------------------------------	--

Nombre : PR4

Fecha: Noviembre 2018

Coordenadas
 Norte: 5873554.605
 Este: 702500.980
UTM
 Huso : 18



Descripción: El punto PR4, se encuentra monumentado en la comuna de San Rosendo a unos 3 metros de la cuneta y calzada de la Ruta que une San Rosendo Con Rio Claro, se ubica en el lado derecho de la calzada frente al talud con una distancia de 15 metros.

8.2. Tablas de planificación logística de la Red GPS

Aspecto	Elección
Método	Estático
Tasa de Adquisición	1 segundo
Duración de la sesión mínima	60 minutos
PDOPD (Dilución de la Precisión en Posición. Degradación de la exactitud en posición 3D)	<6
Marcará de elevación	15°

Instrumento	Cantidad
Receptor R4	2
Receptor R8	1
Trípode	3
Huinchas	3
Base Nivelante	3
Colectora	3
Radio	3
Libreta de Anotaciones	3

8.3. Especificaciones de la Estación Total Focus 2

Aspecto	Cantidad
Medición de Angulo/Horizontal o vertical	5" \pm 1,5 mgon
Sistema de lectura Ángulos	Codificador absoluto
Alcance de medición de Distancia con prisma	2,5 m a 4000 m
Alcance de medición de Distancia sin pris.	2.5 m a 500 m
Precisión de medición de Distancia con prisma	\pm (2 + 2 ppm x D) mm
Precisión de medición de Distancia sin prisma	(3 + 2 ppm x D)

8.4. Script Matlab para realizar aplicar el modelo de velocidad SIRGAS VEMOS.

```
clear
clc
%Script aplicar modelo de velocidad

X=[1501375.4320,-4817906.4452,-3887623.5529] %COORDENADAS ANGOL
%X=[1537191.35084357,-4829688.931842527,-3859233.10268033] %
COORDENADAS UDEC

v=[-0.0148,-0.0069,0.044] % ANGOL
%v=[-0.000977,-0.001205,0.011355] %UDEC
T0=2017.0767 %Angol
%T0=2017.9740 %UDEC

T=2019.0493
format long
XT=X+v*(T-T0)
```

8.5. Script Propagación de errores

```
cript to propagate errors

clear
```

```

clc

d= 32.920;

    cn=0020600.364095208;
    ce=0000000.000552258;
    cup=6370391.044246531
    alfa=(361.3078382792332*pi)/(200); % -> Corresponde al ángulo entre
pr3 y T1(PUNTO DE MONITOREO 1)
    aup=(103.1591*pi)/(200);
% -> simbolizar las variables para poder derivar
syms cn ce cup d aup alfa
syms ec1 ec2 ec3

% Ahora se definirán las ecuaciones de observación

ec1=ce+d*cos(alfa)*sin(aup);
ec2=cn+d*sin(alfa)*sin(aup);
ec3=cup+d*cos(aup);
F1=[ec1;ec2;ec3];
I=[ce cn cup d aup alfa];
b=jacobian (F1,I)

%Redefinición de variables para evaluar
d= 32.920;
cn=0020600.364095208;
ce=0000000.000552258;
cup=6370391.044246531;
aup=(103.1591*pi)/(200);
alfa=(361.3078382792332*pi)/(200); % -> Corresponde al ángulo entre
pr3 y T1(PUNTO DE MONITOREO 1)

%Precisión angular
format short
G=eval(b)

%-> Sigmas
Sce=0.004;
Scn=0.006;
Scup=0.008;

Sd=0.03;
S_ang_up=dms2degrees([0 0 8.333]);
S_ang_alfa=dms2degrees([0 0 8.333])

C=[Sce,Scn,Scup,Sd,S_ang_up,S_ang_up]
format long
C=[Sce^2,Scn^2,Scup^2,(Sd)^2,(S_ang_up)^2,(S_ang_up)^2];
format short
MVC=diag(C);
format long
%Mtriz Propagación
Mp=G*MVC*G'

```



```
p=diag(Mp);
Desviaciones=sqrt(p)
```

8.6. Script Matlab de transformación de ECEF a un sistema topocéntrico local

```
% XYZ2NEU Convert ECEF into local topocentric
% Call: NEU = xyz2neu(O,V)
% O = origin vector in ECEF frame (meters), or n x 3 matrix
% V = position or velocity vector in ECEF frame (m or m/yr), or n
x 3 matrix
% Note that O can be the same as V
% NEU = position or velocity vector in NEU frame (m or m/yr), or
n x 3 matrix

% initialize variables
O=[];%Conservar valor para el origen. pr3
V=[]

X = V(:,1); Y = V(:,2); Z = V(:,3);
NEU = [];

% if O is a single point, make it the same size as V
if (size(O,1) == 1)
    XR = ones(size(V,1),1) .* O(1)
    YR = ones(size(V,1),1) .* O(2)
    ZR = ones(size(V,1),1) .* O(3)
else
    XR = O(:,1); YR = O(:,2); ZR = O(:,3)
end
T = zeros(size(XR,1),1)

% convert origin vector to ellipsoidal coordinates then to in radians
E =[0,,,];
E(:,2) = E(:,2).*pi/180; % longitude
E(:,3) = E(:,3).*pi/180; % latitude

% compute sines and cosines
cp = cos(E(:,2)); sp = sin(E(:,2)); % longitude = phi
cl = cos(E(:,3)); sl = sin(E(:,3)); % latitude = lam

for i=1:size(V,1)
    % build the rotation matrix
    R = [ -sl(i)*cp(i)    -sl(i)*sp(i)    cl(i);
          -sp(i)         cp(i)          0;
          cl(i)*cp(i)    cl(i)*sp(i)    sl(i)];

    % apply the rotation
```

```
NEUi = R * [X(i);Y(i);Z(i)];  
  
% increment result matrix NEU  
NEU = [NEU;NEUi']  
end
```

