



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES EN DEPÓSITOS DE RELAVES INACTIVOS Y
ABANDONADOS EN BASE A INTERFEROMETRÍA SATELITAL**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCION INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

PAULINA MARCELA NIÑO VEGA

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO GESCHE SCHÜLER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
GONZALO CORRAL JOFRÉ
CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN
JAIME ORTEGA PALMA

Este trabajo fue financiado parcialmente por el proyecto FONDEF IDeA I+D ID22i-10199.

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA Y
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL
POR: PAULINA MARCELA NIÑO VEGA
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: ROBERTO GESCHE SCHÜLER

EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES EN DEPÓSITOS DE RELAVES INACTIVOS Y ABANDONADOS EN BASE A INTERFEROMETRÍA SATELITAL

La minería ha sido un pilar fundamental en la economía chilena desde tiempos de la pre-conquista, destacando la extracción de minerales como cobre, oro y hierro. En la actualidad, ostenta el título de principal productor y exportador de cobre a nivel global.

Aunque la minería ha tenido una destacada importancia económica y social en nuestro país, la presencia de numerosas faenas mineras abandonadas, especialmente los depósitos de relaves, junto con la falta de recursos para el monitoreo constante y la escasa información sobre estos, representa un alto riesgo de falla y contaminación. Esto puede afectar negativamente la vida y salud de la población, así como las estructuras y el ecosistema.

Ante la falta de supervisión de depósitos de relaves inactivos y abandonados, las técnicas de medición remotas surgen como una solución para anticipar posibles fallas en la estructura de los depósitos. Estas tecnologías permiten obtener información a lo largo del tiempo sin necesitar visitas a terreno y abarcando áreas extensas. La percepción remota óptica ofrece imágenes detalladas, y la interferometría satelital mide deformaciones milimétricas en superficie. En conjunto, estas técnicas proporcionan un monitoreo preventivo para el control de estas estructuras.

Este estudio busca realizar un seguimiento remoto de deformaciones superficiales a lo largo del tiempo en muros de depósitos de relaves inactivos y/o abandonados mediante el uso de interferometría satelital, en particular la técnica Persistent Scatterer Interferometry (PSI). La medición de deformaciones superficiales permitirá ayudar en la evaluación de la estabilidad física de los depósitos a lo largo del tiempo, evaluando su eficacia comparándolo con un método analítico de estimación de deformaciones por compresión secundaria de las estructuras.

Las deformaciones superficiales anuales en los muros de depósitos de relaves muestran alta precisión y magnitud milimétrica de asentamiento, en concordancia con las deformaciones por peso propio de las estructuras. A su vez, las áreas de los píxeles analizados no presentan singularidades que pudieran afectar los resultados. Por ende, la técnica PSI de interferometría satelital, se presenta como una técnica fiable para medir deformaciones superficiales a lo largo del tiempo en depósitos inactivos y abandonados, siendo un indicador de su condición de estabilidad. Sin embargo, es esencial considerar ciertas limitaciones detalladas en este trabajo al decidir su aplicación.

*Para Seline, quien estuvo siempre a mi lado,
apoyándome en cada desafío.*

Gracias por todo

Agradecimientos

Me gustaría agradecer, por sobre todo, a las personas que se han mantenido constantes en mi vida, quienes me han apoyado desde principio a fin. Quiero agradecer a mi mamá, Marcela, y a mi papá Gerardo por siempre preocuparse de que no me falte nada y que han estado en todo momento de mi vida. Les agradezco sus enseñanzas que me permitieron llegar a este momento, pero por sobre todo la compañía y el cariño que me han entregado. Gracias por las veces en que me invitaban a comer luego de mis clases, por los regalos que me daban por mis buenas notas y por nuestras idas a la playa. Los quiero mucho y aprecio mucho todo lo que hacen por mí.

Me gustaría agradecer también a mi hermana Camila. Eres la persona con quien más he peleado, pero eres quien mejor me conoce y quien más me hace reír. Gracias por estar dispuesta a apoyarme cuando lo necesito.

Quiero agradecer a Toffee, que siempre me entrega su cariño y me hace feliz, y a Seline, quien me acompañó casi toda mi vida. Gracias, Seline, por todo tu cariño y los momentos juntas, te quiero y extraño mucho.

Quiero expresar mi máximo cariño a mi prima Macarena, a mi abuelita Rosa, a mi tía Lorena y a la Reinita, por estar siempre presentes en mi vida, a mi abuelito Camilo por preguntar siempre como me está yendo. Agradezco también a mi abuelito Rubén y a mi abuelita Juanita, quienes estoy segura me están apoyando desde el cielo.

Gracias a mi pareja, José, por todo el cariño que me da y por hacerme feliz. Desde que te conocí, me has ayudado a aceptarme tal cual soy y has estado presente en mis mejores y peores momentos. Gracias por darme la fuerza y apoyo que necesitaba para poder llegar hasta este punto, gracias por tu compañía en los momentos difíciles. Te amo.

Gracias a Shantal y a la Alondra por ser mis amigas y por acompañarme durante mis años de estudio en la U, hubo muchas risas, paseos e idas a comer, cosas que espero poder seguir haciendo con ustedes. Gracias a mis amigos Nico y Cote, por su compañía durante mis años de estudio y los buenos momentos que hemos pasado, que espero se sigan repitiendo. Quiero agradecer también a mi amiga Vale por su compañía en tiempos de pandemia y a quien sé que puedo contarle cualquier cosa. Gracias también a mis amigos, Gonzalo, Bayron y Fer por estar presentes en mi vida.

Agradezco a mi profesor guía Roberto Gesche, por apoyarme hasta el último minuto en este proceso, por guiarme para que las cosas resulten bien y confiar en mí. También al profesor Gonzalo Corral, quien estuvo disponible cuando lo necesitaba y al equipo Fondef Relaves por permitirme participar de este proyecto.

Por último, quería agradecer a la profesora Yolanda Alberto de Civil por enseñarme el mundo de la geotecnia, gracias a ella aprendí que eso es lo que me gusta. Gracias por confiar en mí y en mis capacidades, por ayudarme y entenderme cuando lo necesitaba.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Hipótesis	6
1.3.	Objetivos.....	6
1.3.1.	Objetivo General.....	6
1.3.2.	Objetivos Específicos	6
1.3.3.	Estructura del Trabajo de Tesis.....	6
2	Marco Teórico	8
2.1.	Relaves.....	8
2.2.	Depósito de relaves	8
2.3.	Componentes de un depósito de relaves	9
2.4.	Clasificación de depósitos de relaves	10
2.4.1.	Clasificación por tipo de relaves	10
2.4.2.	Clasificación por tipo de construcción	11
2.5.	Método Constructivo	11
2.5.1.	Método de Aguas Arriba.....	11
2.5.2.	Método de Aguas Abajo	12
2.5.3.	Método Eje Central o Mixto:.....	12
2.6.	Modos de falla	12
2.6.1.	Capacidad de soporte o falla en la fundación.....	13
2.6.2.	Erosión Interna	14
2.6.3.	Rebalse	16
2.6.4.	Inestabilidad de taludes	17
2.6.5.	Licuación sísmica	18
2.7.	Asentamientos en depósitos de relaves.....	18
2.8.	Monitoreo geotécnico de depósitos de relaves	19
2.8.1.	Variables de monitoreo e instrumentos utilizados	20
2.9.	Fundamentos de la percepción remota o teledetección.....	21
2.9.1.	Satélites y sensores	21
2.9.2.	Órbitas satelitales.....	22
2.9.3.	Resoluciones de los sensores.....	23
2.10.	Radar de Apertura Sintética (SAR)	24

2.10.1.	El sistema SAR y sus parámetros	25
2.10.2.	Obtención de imágenes SAR	28
2.10.3.	Imagen SAR ascendente y descendente.....	32
2.10.4.	Distorsiones geométricas y radiométricas de la señal de Radar	33
2.10.4.1.	Distorsión por slant-range	34
2.10.4.2.	Distorsiones geométricas.....	34
2.10.4.3.	Distorsión radiométrica	35
2.10.4.4.	Moteado (Speckle)	36
2.10.5.	Satélite Sentinel-1	36
2.11.	Interferometría satelital	37
2.11.1.	Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR).....	38
2.11.1.1.	Sensibilidad a la topografía.....	39
2.11.1.2.	Obtención de interferogramas	40
2.11.2.	Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética o DInSAR.....	40
2.11.3.	Interferometría de Dispersores Persistentes (PSI).....	42
2.11.3.1.	Precisión de la técnica PSI	43
2.11.3.2.	Deformaciones medidas y método de doble geometría	45
2.12.	Software SARPROZ	46
3	Metodología de trabajo.....	48
3.1.	Selección de depósitos pilotos para el proyecto	49
3.2.	Realización de catastro de los depósitos pilotos.....	49
3.3.	Definición de variables de monitoreo con percepción remota	50
3.4.	Selección de depósitos para la medición de deformaciones superficiales.....	50
3.5.	Medición de deformaciones superficiales en depósitos con interferometría satelital.....	51
3.5.1.	Selección de datos	52
3.5.2.	Importar los datos y selección de área de análisis	52
3.5.3.	Eliminación de la fase topográfica	56
3.5.4.	Selección de GCP	56
3.5.5.	Obtención de interferogramas	56
3.5.6.	Eliminación de la fase atmosférica o APS.....	57
3.5.7.	Análisis multi-temporal y eliminación de los residuos de fase	59
3.5.8.	Obtención de deformaciones LOS y verticales, y visualización de resultados.	60
3.5.9.	Precisión de los resultados.....	61
3.6.	Estimación de deformaciones en depósitos mediante método analítico.....	61

3.6.1.	Muros de suelo arenoso	62
3.6.2.	Muros de ripios.....	63
3.7.	Evaluación de la condición de estabilidad de los depósitos	64
4	Proyecto FONDEF (2022): Selección de depósitos de relaves y variables de monitoreo	65
4.1.	Depósitos de relaves pilotos	65
4.1.1.	Depósito Pajonales	66
4.1.2.	Depósito “San Miguel 2 (Ex - Andacollo 2)”.....	67
4.1.3.	Depósito San Miguel 6 (Ex – Andacollo 6).....	68
4.1.4.	Depósito Tranque 4.....	69
4.1.5.	Depósito “Desconocido”	70
4.1.6.	Depósito “Farah 1-2-3-4-5-6-7”	71
4.1.7.	Depósito “Ojancos 1”	72
4.1.8.	Depósito “Ojancos 2”	73
4.1.9.	Depósito “Bodega Alto”	74
4.1.10.	Depósito “Depósito de relave 3”	75
4.1.11.	Depósito “Santa Laura 1”	76
4.1.12.	Depósito “Santa Laura 2”	77
4.1.13.	Depósito La Africana 1-2.....	78
4.2.	Variables de monitoreo a medir con técnicas de medición remota.....	79
4.2.1.	Deformaciones superficiales: Coronamiento y talud.....	81
4.2.2.	Evolución del área del depósito.....	81
4.2.3.	Humedad.....	82
4.2.4.	Intervención humana	82
4.2.5.	Erosión.....	82
4.2.6.	Cantidad de polvo en suspensión.....	83
4.2.7.	Variación del área vegetada en el depósito	83
4.2.8.	Avance de infraestructuras sobre el depósito	84
4.2.9.	Falla o inestabilidad por condiciones meteorológicas	84
5	Resultados	85
5.1.	Catastro de depósitos pilotos	85
5.2.	Medición de deformaciones superficiales en depósitos mediante interferometría satelital	87
5.2.1.	Selección de información para la técnica PSI de interferometría satelital	87
5.2.1.1.	Selección de información para depósitos en Región de Atacama	88

5.2.1.2.	Selección de información para depósitos en Región de Coquimbo	88
5.2.2.	Resultados de deformaciones superficiales en coronamiento de depósitos mediante interferometría satelital	89
5.2.2.1.	Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente	90
5.2.2.2.	Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS en órbita descendente	92
5.2.2.3.	Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones verticales.....	94
5.2.2.4.	Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente	96
5.2.2.5.	Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones en LOS en órbita descendente	99
5.2.2.6.	Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones verticales.....	101
5.2.2.7.	Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente	103
5.2.2.8.	Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS en órbita descendente ...	105
5.2.2.9.	Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones verticales.....	108
5.2.2.10.	Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente	110
5.2.2.11.	Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS en órbita descendente	113
5.2.2.12.	Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones verticales.....	115
5.2.2.13.	Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente	117
5.2.2.14.	Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS en órbita descendente	120
5.2.2.15.	Depósito “Desconocido”: Deformaciones verticales	122
5.3.	Estimación de deformaciones en depósitos mediante método analítico.....	124
5.3.1.	Selección de parámetros de depósitos para el método analítico.....	124
5.3.2.	Resultados de deformaciones por compresión secundaria en muros de depósitos de estudio para el método analítico.....	126
5.3.3.	Resultados de deformaciones por compresión secundaria en muros de depósitos en el año 2021	129
6	Análisis de resultados.....	130
6.1.	Análisis del procedimiento de interferometría satelital	130
6.2.	Análisis de deformaciones por interferometría satelital	131
6.2.1.	Análisis de deformaciones en coronamiento de depósito “Ojancos 1”	133
6.2.1.1.	Deformaciones en LOS en órbita ascendente	134
6.2.1.2.	Deformaciones en LOS en órbita descendente	134
6.2.1.3.	Deformaciones verticales	135
6.2.2.	Análisis de deformaciones en depósito “Ojancos 2”	136
6.2.2.1.	Deformaciones en LOS en órbita ascendente	136
6.2.2.2.	Deformaciones en LOS en órbita descendente	137

6.2.2.3.	Deformaciones verticales	137
6.2.3.	Análisis de deformaciones en depósito “Santa Laura 1”	138
6.2.3.1.	Deformaciones en LOS en órbita ascendente	139
6.2.3.2.	Deformaciones en LOS en órbita descendente	139
6.2.3.3.	Deformaciones verticales	139
6.2.4.	Análisis de deformaciones en depósito “Santa Laura 2”	140
6.2.4.1.	Deformaciones en LOS en órbita ascendente	141
6.2.4.2.	Deformaciones en LOS en órbita descendente	141
6.2.4.3.	Deformaciones verticales	142
6.2.5.	Análisis de deformaciones en depósito “Desconocido”	143
6.2.5.1.	Deformaciones LOS en órbita ascendente	144
6.2.5.2.	Deformaciones LOS en órbita descendente	144
6.2.5.3.	Deformaciones verticales	145
6.3.	Análisis de deformaciones por método analítico	146
6.4.	Comparación entre resultados obtenidos mediante interferometría satelital y mediante método analítico.....	147
7	Conclusiones y Recomendaciones	150
7.1.	Conclusiones	150
7.2.	Recomendaciones	151
	Bibliografía.....	154
	Anexos.....	163
	Anexo A.....	164
	Anexo B.....	178
	Anexo C	202

Índice de tablas

Tabla 1-1: Estado de depósitos por Región. Fuente: Sernageomin, 26 de diciembre de 2023.....	3
Tabla 2-1: Variables de monitoreo geotécnico. Fuente: Elaboración propia; Gesche, 2020.	20
Tabla 2-2: Sensores y sus resoluciones espaciales. Fuente: ARSET, 2020a.	23
Tabla 2-3: Sensores y sus resoluciones temporales (tiempo de revisita). Fuente: ARSET, 2020a.	23
Tabla 2-4: Bandas de frecuencia en el rango de microondas. Fuente: ARSET, 2017a.....	27
Tabla 2-5: Características de diferentes satélites. Fuente: ARSET, 2017a.	28
Tabla 2-6: Tipos de distorsiones geométricas: Solapamiento, acortamiento y sombra. Fuente: Ferreti et al., 2007; ASF, s.f.-b.	35
Tabla 4-1: Parámetros y variables a medir establecidas para el Proyecto FONDEF (2022). Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 4-2: Parámetros y variables a medir establecidas para el Proyecto FONDEF (2022) (Continuación). Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 4-2: Parámetros y variables a medir establecidas para el Proyecto FONDEF (2022) (Continuación). Fuente: Elaboración propia.	81
Tabla 5-1: Información seleccionada para depósitos en Región de Atacama. Fuente: Elaboración propia.....	88
Tabla 5-2: Información seleccionada para depósitos en Región de Coquimbo. Fuente: Elaboración propia.....	89
Tabla 5-3: Convención de signos para las deformaciones. Fuente: Elaboración propia.	89
Tabla 5-4: Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.....	91
Tabla 5-5: Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.....	93
Tabla 5-6: Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.....	96
Tabla 5-7: Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.....	98
Tabla 5-8: “Depósito Ojancos 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.....	100
Tabla 5-9: Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.....	102
Tabla 5-10: Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.	104
Tabla 5-11: Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 5-12: Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021, en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.	109
Tabla 5-13: Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.	112
Tabla 5-14: Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente.....	114

Tabla 5-15: Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.	117
Tabla 5-16: Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.	119
Tabla 5-17: Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.	121
Tabla 5-18: Depósito “Desconocido”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.	124
Tabla 5-19: Coeficiente de deformación secundaria e índice de vacíos a utilizar para tranques de relaves. Fuente: Elaboración propia.	125
Tabla 5-20: Coeficiente de deformación secundaria e índice de vacíos a utilizar para embalses de relaves. Fuente: Elaboración propia.	125
Tabla 5-21: Tiempo hasta el cierre, altura inicial y periodos de operación de los depósitos de estudio. Fuente: Elaboración propia.	126
Tabla 5-22: Asentamiento por compresión secundaria estimada en el año 2021. Fuente: Elaboración propia.	129
Tabla 6-1: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Ojancos 1”. Fuente: Elaboración propia.	133
Tabla 6-2: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia.	136
Tabla 6-3: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Santa Laura 1”. Fuente: Elaboración propia.	138
Tabla 6-4: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia.	140
Tabla 6-5: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia.	143

Índice de ilustraciones

Figura 1-1: Porcentaje de depósitos de relaves según su estado. Fuente: Sernageomin, 12 de diciembre de 2023.	2
Figura 1-2: Porcentaje de depósitos de relaves según Región en Chile. Fuente: Sernageomin, 26 de diciembre de 2023.	3
Figura 2-1: Esquema de un depósito de relaves. Fuente: Sernageomin, 2003.	9
Figura 2-2: Método de Aguas Arriba. Fuente: Sernageomin, 2007.	11
Figura 2-3: Método de Aguas Abajo. Fuente: Sernageomin, 2007.	12
Figura 2-4: Método Eje Central. Fuente: Sernageomin, 2007.	12
Figura 2-5: Factores que generan la erosión. Fuente: USBR, 2019.	14
Figura 2-6: Esquema representativo de erosión por fuga concentrada. Fuente: Pastén, 2022.	15
Figura 2-7: Proceso de la erosión retrógrada (BEP). Fuente: USBR, 2019.	15
Figura 2-8: Esquema de migración interna (stopping). Fuente: Pastén, 2022.	15
Figura 2-9: Esquema de erosión por contacto. Fuente: Pastén, 2022.	16
Figura 2-10: Sufusión interna, externa y sufusión en una muestra. El parámetro L hace referencia a la longitud, M a la masa y k a la conductividad hidráulica de la muestra. Fuente: Crawford, 2015.	16
Figura 2-11: Espectro electromagnético. Fuente: Alaska Satellite Facility [ASF], s.f.-b.	22
Figura 2-12: Izquierda: Órbita geoestacionaria (GEO). Derecha: Órbita terrestre baja (LEO). Fuente: EOS Data Analytics, 2023a.	22
Figura 2-13: Bandas espectrales. Fuente: ARSET, 2020a.	24
Figura 2-14: Escenas con diferentes resoluciones espectrales. Fuente: ARSET, 2020a.	24
Figura 2-15: Radar de Apertura Sintética. Fuente: INTA, 2019.	24
Figura 2-16: Radar de visión hacia abajo vs Radar de visión lateral. Fuente: ARSET, 2017a.	25
Figura 2-17: Pulso emitido por el radar y retrodispersión (backscatter). Fuente: ARSET, 2017a, diapositiva 10.	25
Figura 2-18: Sistema SAR de un satélite. Fuente: Grunfeld, N, s.f.	26
Figura 2-19: Imagen SAR de la Región de Coquimbo. La dirección vertical de la imagen corresponde al slant-range o LOS y la dirección horizontal a la dirección del azimut. Fuente: Elaboración propia con software SARPROZ, 2023.	29
Figura 2-20: Información de una celda de resolución medido mediante SAR. Fuente: ARSET, 2017b.	29
Figura 2-21: Imagen SAR: Amplitud (izquierda) y fase (derecha). Fuente: Grunfeld, N, s.f.	30
Figura 2-22: La superficie como un factor influyente en la retrodispersión de la señal. Fuente: ARSET, 2017a.	31
Figura 2-23: Imagen de reflexión sobre un área de Baviera, Alemania. Fuente: Diaz, 2021.	31
Figura 2-24: Imagen SAR detectada de Milán (Italia). El tamaño de la imagen es de 25 km en la dirección del slant-range (vertical) y 25 km en la dirección del azimut (horizontal). Fuente: Ferreti et al., 2007.	32
Figura 2-25: Trayectorias ascendentes y descendentes para satélite ERS. Fuente Ferreti et al., 2007.	32
Figura 2-26: Imágenes SAR ascendente y descendente del Monte Etna (Italia) capturadas desde satélite ERS y Modelo Digital de Elevación (DEM). Fuente: Ferreti et al., 2007.	33

Figura 2-27: Efecto del terreno en la imagen SAR. Fuente: Ferreti et al., 2007.....	33
Figura 2-28: Distorsión por slant-range. Fuente: Natural Resources Canada, 2015.....	34
Figura 2-29: Solapamiento (lay-over) en la imagen SAR. Fuente: ASF, s.f-b.....	35
Figura 2-30: Acortamiento (foreshortening) en la imagen SAR. Fuente: ASF, s.f-b.....	35
Figura 2-31: Sombra (shadow) en la imagen SAR. Fuente: ASF, s.f-b.....	35
Figura 2-32: Distorsión radiométrica. Fuente: ARSET, 2017a.....	36
Figura 2-33: Efecto speckle en una imagen SAR detectada en Italia mediante satélite ERS-2. Fuente: Ferreti et al., 2007.....	36
Figura 2-34: Modos de adquisición de Sentinel-1 y sus coberturas. Fuente: ESA, s.f.-l.....	37
Figura 2-35: Interferómetro transversal al movimiento o Cross-track interferometer. Fuente: ARSET, 2017b.....	38
Figura 2-36: Medición de altura “z” de un objetivo con dos adquisiciones con satélite desde dos posiciones diferentes. Fuente: Grunfeld, s.f.....	39
Figura 2-37: Interferograma aplanado del Monte Etna a partir de pares de imágenes ERS.....	40
Figura 2-38: Medición del desplazamiento “d” con satélite en distinta posición en t_1 y t_2 . Fuente: Grunfeld, s.f.....	41
Figura 2-39: Caso de estudio: The Mosul Dam: Deformaciones verticales y E-O con software SARPROZ. Fuente: Milillo, 2016.....	46
Figura 2-40: Site processing de SARPROZ. Fuente: Perissin, 2011.....	47
Figura 3-1: Metodología de tesis. Los pasos en azul (1, 2 y 3) se enfocan en los depósitos pilotos para el proyecto (13 depósitos). Los pasos en rojo (4, 5, 6 y 7) se enfocan en los depósitos seleccionados para el estudio de deformaciones (5 depósitos). Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 3-2: Áreas seleccionada para los cinco depósitos de estudio. Fuente: Google Earth.....	52
Figura 3-3: Software SARPROZ. Se selecciona carpeta de origen de las imágenes. Fuente: SARPROZ.....	53
Figura 3-4: Selección del área y correregistro de imágenes. Fuente: SARPROZ.....	54
Figura 3-5: Combinación STAR entre imágenes SAR. A la derecha se observa la coherencia temporal entre imágenes secundarias con la imagen primaria. Fuente: SARPROZ.....	55
Figura 3-6: Ejemplo mapa reflectante del área seleccionada. Fuente: SARPROZ.....	55
Figura 3-7: Ejemplo de selección de GCP, en este caso, se selecciona el techo de una estructura. Fuente: SARPROZ.....	56
Figura 3-8: Parámetros utilizados para la obtención de interferogramas. Fuente: SARPROZ.....	57
Figura 3-9: Ejemplo de estimación de la fase atmosférica o APS. Fuente: SARPROZ.....	58
Figura 3-10: Ejemplo de fase atmosférica estimada (APS). Fuente: SARPROZ.....	58
Figura 3-11: Ventana de análisis multi-temporal de SARPROZ. Fuente: SARPROZ.....	59
Figura 3-12: Ejemplo de fase residual extraída de las deformaciones. Fuente: SARPROZ.....	60
Figura 3-13: Variación del índice $C\alpha$ según presión vertical. Fuente: Ossess, 2019.....	62
Figura 3-14: Ensayos edométricos de arenas de relaves. Fuente: Carmi, 2013.....	63
Figura 3-15: Ensayos edométricos en ripios. Fuente: Wachtendorff, 2015.....	63
Figura 4-1: Depósito de relaves inactivo “Pajonales”. Fuente: Google Earth.....	66
Figura 4-2: Depósito de relaves inactivo “San Miguel 2 (Ex – Andacollo 2)”. Fuente: Google Earth.....	67
Figura 4-3: Depósito de relaves inactivo “San Miguel 6 (Ex – Andacollo 6)”. Fuente: Google Earth.....	68
Figura 4-4: Depósito de relaves inactivo “Tranque 4”. Fuente: Google Earth.....	69

Figura 4-5: Depósito de relaves abandonado “Desconocido”. Fuente: Google Earth.....	70
Figura 4-6: Depósito de relaves inactivo “Farah 1-2-3-4-5-6-7”. Fuente: Google Earth.....	71
Figura 4-7: Depósito de relaves inactivo “Ojancos 1”. Fuente: Google Earth.....	72
Figura 4-8: Depósito de relaves inactivo “Ojancos 2”. Fuente: Google Earth.....	73
Figura 4-9: Depósito de relaves inactivo “Bodega Alto”. Fuente: Google Earth.....	74
Figura 4-10: Depósito de relaves inactivo “Depósito de relaves 3”. Fuente: Google Earth.	75
Figura 4-11: Depósito de relaves inactivo “Santa Laura 1”. Fuente: Google Earth.....	76
Figura 4-12: Depósito de relaves inactivo “Santa Laura 2”. Fuente: Google Earth.....	77
Figura 4-13: Depósito de relaves inactivo “La Africana 1-2”. Fuente: Google Earth.....	78
Figura 5-1: Portada del catastro, Proyecto FONDEF (2022). Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	85
Figura 5-2: Características generales depósito de relaves “Bodega Alto”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	86
Figura 5-3: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves Bodega Alto. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	87
Figura 5-4: Depósito “Ojancos 1”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	90
Figura 5-5: Depósito “Ojancos 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	91
Figura 5-6: Depósito “Ojancos 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 4), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. estándar es de 1.32 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	92
Figura 5-7: Depósito “Ojancos 1”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	92
Figura 5-8: Depósito “Ojancos 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	93
Figura 5-9: Depósito “Ojancos 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 4), en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. estándar es de 0.83 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	94
Figura 5-10: Depósito “Ojancos 1”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	95
Figura 5-11: Depósito “Ojancos 1”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	95
Figura 5-12: Depósito “Ojancos 2”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	97
Figura 5-13: Depósito “Ojancos 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	97

Figura 5-14: Depósito “Ojancos 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 6), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 0.87 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	98
Figura 5-15: Depósito “Ojancos 2”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	99
Figura 5-16: Depósito “Ojancos 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	100
Figura 5-17: Depósito “Ojancos 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5) en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 2.48 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	101
Figura 5-18: Depósito “Ojancos 2”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	101
Figura 5-19: Depósito “Ojancos 2”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	102
Figura 5-20: Depósito “Santa Laura 1”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	103
Figura 5-21: Depósito “Santa Laura 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	104
Figura 5-22: Depósito “Santa Laura 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.72 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	105
Figura 5-23: Depósito “Santa Laura 1”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	106
Figura 5-24: Depósito “Santa Laura 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	106
Figura 5-25: Depósito “Santa Laura 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 6), en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.64 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	108
Figura 5-26: Depósito “Santa Laura 1”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	108
Figura 5-27: Depósito “Santa Laura 1”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	109
Figura 5-28: Depósito “Santa Laura 2”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	111
Figura 5-29: Depósito “Santa Laura 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	111

Figura 5-30: Depósito “Santa Laura 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 4), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.93 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	112
Figura 5-31: Depósito “Santa Laura 2”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	113
Figura 5-32: Depósito “Santa Laura 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	114
Figura 5-33: Depósito “Santa Laura 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 9), en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.78 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	115
Figura 5-34: Depósito “Santa Laura 2”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	116
Figura 5-35: Depósito “Santa Laura 2”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	116
Figura 5-36: Depósito “Desconocido”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	118
Figura 5-37: Depósito “Desconocido”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	118
Figura 5-38: Depósito “Desconocido”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5), en órbita ascendente. En líneas negras segmentadas la desv. Estándar es de 0.78 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	119
Figura 5-39: Depósito “Desconocido”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	120
Figura 5-40: Depósito “Desconocido”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	121
Figura 5-41: Depósito “Desconocido”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5), en órbita descendente. En líneas negras segmentadas la desv. Estándar es de 1.72 mm. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	122
Figura 5-42: Depósito “Desconocido”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	123
Figura 5-43: Depósito “Desconocido”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.	123
Figura 5-44: Depósito “Ojancos 1”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta de muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.....	126
Figura 5-45: Depósito “Ojancos 2”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta de muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.....	127

Figura 5-46: Depósito “Santa Laura 1”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta del muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 5-47: Depósito “Santa Laura 2”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta del muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.....	128
Figura 5-48: Depósito “Desconocido”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.....	129
Figura 0-1: Características generales depósito de relaves “Bodega Alto”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	164
Figura 0-2: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Bodega Alto”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	165
Figura 0-3: Características generales depósito de relaves “Depósito de relave 3”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	165
Figura 0-4: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Depósito de relave 3”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	166
Figura 0-5: Características generales depósito de relaves “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	166
Figura 0-6: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	167
Figura 0-7: Características generales depósito de relaves “Farah 1-2-3-4-5-6-7”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	167
Figura 0-8: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Farah 1-2-3-4-5-6-7”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	168
Figura 0-9: Características generales depósito de relaves “La Africana 1-2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	168
Figura 0-10: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “La Africana 1-2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	169
Figura 0-11: Características generales depósito de relaves “Ojancos 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	169
Figura 0-12: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Ojancos 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	170
Figura 0-13: Características generales depósito de relaves “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	170
Figura 0-14: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	171
Figura 0-15: Características generales depósito de relaves “Pajonales”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	171
Figura 0-16: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Pajonales”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	172
Figura 0-17: Características generales depósito de relaves “San Miguel 2 (Ex - Andacollo 2)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	172
Figura 0-18: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “San Miguel 2 (Ex - Andacollo 2)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	173

Figura 0-19: Características generales depósito de relaves “San Miguel 6 (Ex - Andacollo 6)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	173
Figura 0-20: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “San Miguel 6 (Ex - Andacollo 6)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	174
Figura 0-21: Características generales depósito de relaves “Santa Laura 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	174
Figura 0-22: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Santa Laura 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	175
Figura 0-23: Características generales depósito de relaves “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	175
Figura 0-24: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	176
Figura 0-25: Características generales depósito de relaves “Tranque 4”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	176
Figura 0-26: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Tranque 4”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.....	177
Figura 0-1: Temporal coherence after NL Weighting. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	178
Figura 0-2: Temporal coherence after removing the APS. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	179
Figura 0-3: Temporal coherence after graph inversion and APS removal. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	179
Figura 0-4: Temporal coherence after graph inversion and APS removal histogram. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	180
Figura 0-5: Sparse points selection, $ASI > 0.7$ $DS = 2$. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	180
Figura 0-6: Sparse reference point. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	181
Figura 0-7: Estadísticas. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	181
Figura 0-8: Integrated residual height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	182
Figura 0-9: Integrated height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	182
Figura 0-10: Integrated cumulative displacement. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	183
Figura 0-11: Graph connection. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	183
Figura 0-12: Connections height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	184
Figura 0-13: Connections cumulative displacement. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	184
Figura 0-14: Connections coherence histogram. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	185
Figura 0-15: Connections coherence graph. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	185
Figura 0-16: Coherence between each slave date and the master date. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	186
Figura 0-17: Temporal coherence. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	186
Figura 0-18: Residual height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	187
Figura 0-19: Sparse point selection $ASI > 0.6$. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	187
Figura 0-20: Phase residuals 17/12/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	188
Figura 0-21: Phase residuals 05/12/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	188
Figura 0-22: Phase residuals 23/11/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.....	189

Figura 0-23: Phase residuals 30/10/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	189
Figura 0-24: Phase residuals 18/10/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	190
Figura 0-25: Phase residuals 06/10/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	190
Figura 0-26: Phase residuals 24/09/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	191
Figura 0-27: Phase residuals 12/09/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	191
Figura 0-28: Phase residuals 31/08/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	192
Figura 0-29: Phase residuals 07/08/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	192
Figura 0-30: Phase residuals 26/07/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	193
Figura 0-31: Phase residuals 14/07/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	193
Figura 0-32: Phase residuals 02/07/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	194
Figura 0-33: Phase residuals 20/06/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	194
Figura 0-34: Phase residuals 08/06/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	195
Figura 0-35: Phase residuals 27/05/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	195
Figura 0-36: Phase residuals 15/05/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	196
Figura 0-37: Phase residuals 03/05/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	196
Figura 0-38: Phase residuals 21/04/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	197
Figura 0-39: Phase residuals 09/04/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	197
Figura 0-40: Phase residuals 20/03/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	198
Figura 0-41: Phase residuals 16/03/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	198
Figura 0-42: Phase residuals 04/03/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	199
Figura 0-43: Phase residuals 08/02/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	199
Figura 0-44: Phase residuals 15/01/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	200
Figura 0-45: Height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	200
Figura 0-46: Cumulative Displacement. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	201
Figura 0-47: Coherence histogram after parameter estimation and APS removal. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	201
Figura 0-1: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósitos “Ojancos 1” y “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	202
Figura 0-2: Coherencia entre imágenes descendentes para depósitos “Ojancos 1” y “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	203
Figura 0-3: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	203
Figura 0-4: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”.	204
Figura 0-5: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósito “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	204
Figura 0-6: Coherencia entre imágenes descendentes para depósito “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.	205

1 Introducción

1.1. Motivación

La minería es una actividad que ha estado presente en Chile desde mucho antes del período de conquista, utilizada en la fabricación de herramientas y adornos. Durante los primeros 200 años, la industria del cobre comenzó a surgir, posicionando a Chile a mediados del siglo XX, como uno de los importantes productores de cobre a nivel mundial (Consejo minero, 2019).

En este contexto, el país recibió importantes inversiones extranjeras para explotar yacimientos, iniciando la época de nuestra historia conocida como La Gran Minería del Cobre, estableciendo a Chile como el segundo productor de metal rojo en el mundo después de Estados Unidos. En la década de los 80, el país logró alcanzar el primer puesto en esta industria (Ministerio de Minería de Chile, 2019).

La extracción de minerales en la minería conlleva el descarte del material de relave por poseer un bajo porcentaje de cobre. El relave es un sólido finamente molido, que debe ser almacenado de forma segura y ambientalmente responsable, debido a que sus concentraciones de minerales pueden ser contaminantes para el ser humano, al sobrepasar ciertas concentraciones de arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo y plomo. Este material puede llegar a moverse, lo que genera una potencial afectación a las personas y al medio ambiente (Servicio Nacional de Geología y Minería [Sernageomin], s.f.).

Los depósitos de relaves son las estructuras encargadas de contener de forma segura los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales (Servicio de Evaluación Ambiental [SEA], 2020). Son obras de ingeniería creadas para satisfacer exigencias legales nacionales, de modo de aislar completamente los relaves depositados del ecosistema circundante.

A pesar de la importancia económica y social de la minería en nuestro país, se ha observado un impacto negativo en nuestro medio ambiente, según el informe del Ministerio de Minería (2019). La limitación de recursos para supervisar o controlar los depósitos de relaves y la falta de regulaciones de la época, propiciaron la existencia de numerosas faenas mineras abandonadas con escasa información sobre ellas. Esto representa un problema tanto para la población como para el medio ambiente circundante en caso de falla de estas estructuras. El investigador Clarkson (2021) menciona que las consecuencias de la rotura de estos depósitos son significativas a nivel global, con impactos sociales, ambientales y económicos considerables.

Las regulaciones en Chile para abordar este problema comenzaron en 1994 con la nueva legislación ambiental, que incluyó la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente y el primer Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental en 1997. Posteriormente, se promulgó el Reglamento de Seguridad Minera en 2004, el Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves en 2007 y la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras en 2012.

Estas regularizaciones fueron un gran avance ya que llevaron a la identificación de la mayoría de los depósitos de relaves existentes en el país y a la normalización del cierre obligatorio de las faenas, como se menciona en el Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible del Ministerio de Minería (2019). Sin embargo, la falta de recursos impide la supervisión de todos los depósitos existentes en Chile. En consecuencia, el estado actual de la mayoría de los depósitos que dejaron de operar previo a la implementación de las regulaciones permanece desconocido.

De acuerdo con el Catastro de Depósitos de Relaves en Chile de Sernageomin (2023), se registra un total de 765 depósitos de relaves distribuidos entre las diferentes regiones, los cuales se dividen en tres categorías principalmente: activos, inactivos y abandonados, como se muestra en la Figura 1-1. La distribución incluye 110 depósitos activos, 473 inactivos, 173 abandonados, 7 en construcción y 1 en revisión.

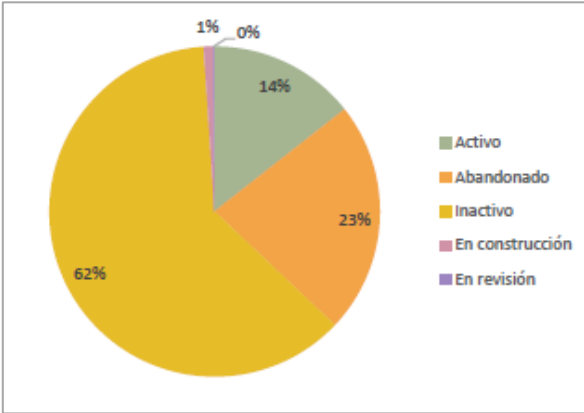


Figura 1-1: Porcentaje de depósitos de relaves según su estado. Fuente: Sernageomin, 12 de diciembre de 2023.

Los depósitos inactivos y abandonados son aquellos que han alcanzado el final de su ciclo de vida y que no han sido debidamente cerrados de acuerdo con las leyes y regulaciones pertinentes. La diferencia entre un depósito inactivo y uno abandonado radica en que, en el caso del segundo, se desconoce quién es su titular, según lo señalado por el Ministerio de Minería en 2019. Por otro lado, los depósitos activos son aquellos que se encuentran actualmente en operación.

Las regiones con la mayor concentración de depósitos de relaves son la Región de Coquimbo y la Región de Atacama, siendo la primera la que presenta la mayor cantidad de depósitos inactivos y abandonados, como se ilustra en la Tabla 1-1 y en la Figura 1-2. En la Región de Coquimbo, se encuentra el 61% de todos los depósitos de relaves abandonados y el 52% de todos los depósitos de relaves inactivos del país.

Tabla 1-1: Estado de depósitos por Región. Fuente: Sernageomin, 26 de diciembre de 2023.

Región	Activo	Abandonado	Inactivo	En construcción	En revisión	Total
Tarapacá	2	6	0	0	0	8
Antofagasta	12	16	24	0	0	52
Atacama	30	23	113	6	0	172
Coquimbo	39	106	245	1	1	392
Región Metropolitana	6	6	14	0	0	26
Valparaíso	14	11	55	0	0	80
O'Higgins	3	1	15	0	0	19
Maule	4	0	2	0	0	6
Aysén	0	4	5	0	0	9
Total	110	173	473	7	1	764

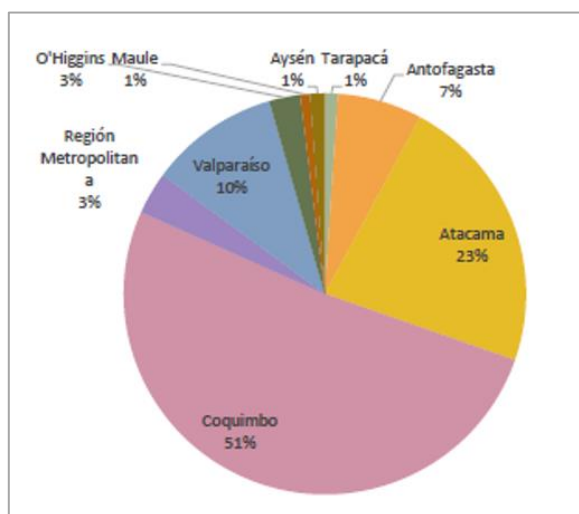


Figura 1-2: Porcentaje de depósitos de relaves según Región en Chile. Fuente: Sernageomin, 26 de diciembre de 2023.

En cuanto a las características de los depósitos abandonados e inactivos, los primeros tienen un volumen máximo total de 600.000 m^3 mientras que los inactivos pueden llegar a alcanzar un volumen total de $320.000.000 \text{ m}^3$ según datos proporcionados por el Sernageomin (2023). Además, de acuerdo con la investigación de Pulgar (2020), se ha observado que la altura máxima registrada en los muros de contención de los depósitos abandonados es de 30 m, aunque es más común encontrar depósitos con alturas que oscilan entre los 5 m y 15 m.

Se han presentado diferentes fallas de depósitos de relaves tanto nacionales como internacionales. Lottermoser (2007) y Bowker (2015) realizan un catastro de las fallas de depósitos producidas a lo largo del tiempo. En Chile, en el año 1965, producto del terremoto de La Ligua, se produce la falla del depósito activo El Soldado que causó la muerte de más de 200 personas debido a licuación del material (Dobry, 1967). En el 2010, producto del terremoto del Maule, ocurre la falla del depósito de relaves inactivo Las Palmas, la cual produjo la muerte de 4 personas (Villavicencio et al., 2014).

En Brasil, la ruptura del depósito inactivo de Feijão a principios de 2019 causó la liberación de varios millones de m^3 de relaves, contaminando las aguas de río Paraopeba y costando la vida a

cientos de personas (Olguín, 2022). En los datos analizados por Robertson et al. (2019), para explicar la falla de esta estructura, se encuentra la presencia de lagunas, humedad y deformaciones superficiales en el depósito.

Estas fallas evidencian la importancia del monitoreo continuo de los depósitos para su comprensión y sobre todo para evitarlas (Olguín, 2022). Tanto como para los depósitos activos, como inactivos y abandonados no existe por parte de la autoridad un monitoreo permanente del estado en que se encuentran. Actualmente, en los activos se fiscalizan reportes trimestrales que envían los titulares para conocer su situación, en tanto que en los depósitos inactivos y abandonados hay aún menos información sobre su comportamiento (Ministerio de Minería, 2019). Según la Comisión Chilena del Cobre (2022) el control y monitoreo de los depósitos de relaves es bajo, el número de fiscalizadores en terreno es limitado, hay ausencia de estandarización con normas claras y la gestión es reactiva a cuando ocurren los eventos.

A raíz de los diferentes eventos de falla de los depósitos con las consecuencias sociales, medioambientales y económicas que estas representan y, la importancia de estas estructuras en la minería es necesario asegurar la estabilidad física y química de estas estructuras. La primera hace referencia a que estas no se desmoronen ni se desborden, en tanto que la segunda consiste en conseguir que los materiales depositados no aporten elementos o compuestos químicos al ecosistema circundante (Sernageomin, s.f.).

El monitoreo geotécnico es utilizado para el control de las estructuras. Este provee de información en diferentes ámbitos: investigaciones de campo, verificaciones de los diseños, control de construcción, control de calidad, seguridad, legalidad y comportamiento de las estructuras (Gesche, 2020). Para los depósitos de relaves existe una amplia variedad de instrumentación in situ para controlar su estabilidad, normalmente, se consideran fiables y precisos bajo un control adecuado, sin embargo, son caros y consumen mucho tiempo. Los procedimientos más habituales para monitorizar subsidencias en obras de ingeniería son la topografía de precisión (nivelación), inclinómetros, fotogrametría, láser escáner y el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) (Sillerico, 2010).

Las técnicas de mediciones remotas surgen como una solución para anticipar posibles fallas en la estructura de los depósitos, especialmente cuando los recursos para la supervisión de depósitos de relaves inactivos y abandonados son limitados. En los últimos 30 años, la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y sus derivados han demostrado su potencial como herramientas para la medición de deformaciones del terreno, superando las restricciones de los métodos de monitoreo in situ. Dentro de sus principales características se encuentra la capacidad de analizar áreas extensas sin requisitos visitas a terreno, además de la posibilidad de obtener información histórica a lo largo del tiempo mediante archivos de datos. En complemento, la percepción remota óptica ofrece imágenes detalladas que permiten medir índices de humedad y vegetación en el terreno.

Específicamente, la Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial Avanzada (A-DInSAR) puede proporcionar información sobre las deformaciones superficiales con una precisión

de milímetros y puede utilizarse para predecir eventos catastróficos mediante la detección de deformaciones precursoras en la estructura de la presa antes de que ocurran las fallas (Mazzanti, 2021). Estos resultados además proporcionan complementos comparables a los datos de mediciones in situ (STINGS Consortium, 2020).

En la literatura, se observa que la metodología InSAR ha sido utilizada diversos entornos, como volcanes, glaciares, e incluso en depósitos de relaves activos. Sin embargo, no se ha aplicado aún en depósitos inactivos y abandonados. Dado que InSAR es una técnica relativamente nueva como se explica anteriormente, su eficacia es generalmente respaldada mediante métodos de monitoreo in situ. La interferometría satelital sigue siendo un campo en constante evolución, cuya precisión está sujeta a factores como la fuente de datos, el ruido atmosférico y la topografía del terreno.

Este estudio es parte del proyecto FONDEF IDeA I+D ID22i-10199 (2022) “Sistema de Monitoreo de Riesgo en Torno a Depósitos de Relaves” adjudicado a académicos de diferentes especialidades de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, cuyo objetivo central consiste en desarrollar un modelo y un sistema de monitoreo e indicadores de riesgo para anticipar la eventual falla de depósitos de relaves inactivos y abandonados basado en el procesamiento de información satelital y otras variables, a partir de información pública disponible. El proyecto ha sido adjudicado y financiado por el Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF), y cuenta con la participación por parte del Estado a través de Sernageomin. Con la finalidad de simplificar la mención de este proyecto en este estudio, se emplea la denominación "Proyecto FONDEF (2022)" de ahora en adelante.

En esta tesis se abordan diferentes procesos realizados para el Proyecto FONDEF, en particular, la caracterización de trece depósitos de relaves inactivos y abandonados de prueba para el proyecto mediante la realización de un catastro y la selección de las variables a monitorear según los modos de falla que estos pueden presentar.

Los depósitos seleccionados en el Proyecto FONDEF, fueron escogidos por su extensión, superior a 2 hectáreas, requisito para las mediciones remotas, así como por su cercanía a poblaciones, infraestructuras críticas, quebradas y cursos de agua. No obstante, se pretende crear un modelo para abarcar todos los depósitos inactivos y abandonados en Chile.

Además de los procesos antes mencionados, esta tesis buscar contribuir y complementar la medición de deformaciones superficiales durante el año 2021 mediante interferometría satelital para cinco de los depósitos del proyecto. Estas mediciones se comparan con las estimaciones de deformaciones por compresión secundaria realizadas a través de un método analítico, con el fin de determinar la capacidad de la técnica para medir en el rango de magnitud esperado.

El objetivo de esta tesis es evaluar la estabilidad de estas estructuras través de la medición de deformaciones superficiales en los coronamientos de estos depósitos. Esto se logrará mediante el análisis de los patrones de deformación o variaciones de estas deformaciones. Además, se busca identificar los fenómenos que afectan a estas estructuras y evaluar la utilidad de la técnica de interferometría satelital para el control y monitoreo de deformaciones en estos depósitos.

1.2. Hipótesis

La interferometría satelital como herramienta de monitoreo en depósitos de relaves inactivos y abandonados facilitará el seguimiento detallado de las deformaciones superficiales a lo largo del tiempo para clasificarlos según su nivel de riesgo asociado a inestabilidades.

1.3. Objetivos

A continuación, se describen los objetivos generales y específicos definidos para este trabajo de tesis.

1.3.1. Objetivo General

Se pretende evaluar la evolución física de depósitos de relaves inactivos y abandonados a través del monitoreo de deformaciones utilizando interferometría satelital. Se busca identificar cambios en el comportamiento de estas estructuras, en términos de deformaciones superficiales, que permitan establecer diferencias en su condición de estabilidad.

1.3.2. Objetivos Específicos

Se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión bibliográfica que permita recolectar información sobre la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y sus derivados.
- Identificar la metodología de medición de las deformaciones con interferometría satelital y definir límites de medición.
- Reconocer las características de los depósitos de relaves inactivos y abandonados escogidos en el Proyecto FONDEF pertenecientes a la Región de Atacama, Región de Coquimbo y la Región Metropolitana de Chile.
- Definir/Determinar qué modos de falla pueden ocurrir en los depósitos de relaves seleccionados y los fenómenos externos que podrían afectar su estabilidad física.
- Evaluar si el monitoreo mediante interferometría satelital es útil para la medición de deformaciones en depósitos de relaves inactivos y abandonados.
- Evaluar si es necesaria la incorporación de sistemas de monitoreo in situ adicionales para validar el sistema satelital.

1.3.3. Estructura del Trabajo de Tesis

Este informe de tesis se compone de 7 capítulos, los cuales son detallados a continuación.

1. Introducción: En este capítulo, se proporciona un contexto general de este estudio académico, incluyendo antecedentes e importancia del estudio. También se exponen los objetivos y la hipótesis de la tesis.
2. Marco Teórico: En este capítulo se documentan los antecedentes académicos y empíricos relevantes a esta tesis: Depósitos de relaves, Fundamentos de la percepción remota, Radar de Apertura Sintética (SAR), Interferometría Satelital, Precisión de las medidas de deformación y el Software SARPROZ.

3. Metodología: En este capítulo se detallan los diferentes pasos llevados a cabo para este estudio: Selección de los depósitos pilotos para el proyecto, realización de un catastro de los depósitos de relaves a estudiar, definición de variables de monitoreo con percepción remota, selección de depósitos para el estudio y variable a medir, medición de deformaciones superficiales mediante interferometría satelital, estimación de deformaciones mediante método analítico y evaluación de la condición de estabilidad de los depósitos.
4. Proyecto FONDEF: Selección de depósitos de relaves y variables de monitoreo: En este capítulo se presenta información acerca de los depósitos pilotos para el proyecto y la definición de variables de monitoreo con percepción remota.
5. Resultados: En este capítulo se presenta el catastro de depósitos pilotos, medición de deformaciones superficiales en depósitos mediante interferometría satelital y estimación de deformaciones en depósitos mediante método analítico.
6. Análisis de resultados: En este capítulo se lleva a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos en particular el análisis del procedimiento de interferometría satelital, el análisis de deformaciones por interferometría satelital, el análisis de deformaciones por método analítico y comparación entre resultados obtenidos mediante interferometría satelital y mediante método analítico.
7. Conclusiones y Recomendaciones: En este último capítulo se presentan las conclusiones del estudio, así como las recomendaciones derivadas de los hallazgos obtenidos.

2 Marco Teórico

En este capítulo se documenta la recopilación de antecedentes académicos y empíricos relevantes a esta tesis. El marco teórico de esta tesis aborda en primera instancia los depósitos de relaves, sus componentes, clasificación, métodos constructivos, modos de falla, las deformaciones a los que se ven sometidos y el monitoreo geotécnico para estas estructuras. La segunda parte de este capítulo se compone de los fundamentos de la percepción remota, el Radar de Apertura Sintética (SAR), la interferometría satelital, la precisión de las medidas de deformación y el software SARPROZ.

Es importante destacar que este marco teórico se enfoca en definir las características de todos los tipos de depósitos de relaves, siendo los depósitos de relaves inactivos y abandonados el foco principal de esta tesis y el Proyecto FONDEF.

2.1. Relaves

Según el Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible del Ministerio de Minería (2019), los minerales extraídos de un yacimiento se clasifican en dos grupos: Los oxidados y los sulfurados. El tratamiento de extracción de los minerales oxidados se realiza mediante la lixiviación, mientras que el de los minerales sulfurados se lleva a cabo en plantas concentradoras o de beneficio. Este proceso abarca desde la molienda del mineral hasta la clasificación, flotación, espesamiento, entre otras etapas, y resulta en la producción de concentrado de cobre. Sin embargo, también genera grandes volúmenes de material de descarte conocido como relave.

El relave constituye aproximadamente el 98%-99% del material extraído y procesado, compuesto por material molido (roca, minerales, entre otros), agua de transporte y elementos añadidos durante el proceso de beneficio. Se trata de un sólido finamente molido suspendido en líquido, proveniente de las operaciones mineras y descartado debido a su falta de interés económico, como señala el Ministerio de Minería (2019).

El Decreto Supremo N°248 (D.S. 248) (2007) establece los criterios para el diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves en la minería chilena, abarcando tanto la gran, mediana como la pequeña minería. En este documento, se define el relave como la suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, generada y desechada en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han pasado por una o varias etapas en el circuito de molienda fina.

2.2. Depósito de relaves

El D.S. 248 (2007) proporciona una definición integral del depósito de relaves como una estructura diseñada de manera segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de minerales. Este concepto se extiende más allá de la mera contención, incluyendo las obras anexas que complementan su funcionalidad.

El depósito de relaves cumple una función central como resguardo, generalmente definitivo, para los materiales sólidos resultantes del relave transportado desde la planta de concentración. Además de su papel primario de contención, el depósito está estratégicamente diseñado para facilitar la recuperación significativa del agua que acompaña a estos sólidos.

2.3. Componentes de un depósito de relaves

En la Figura 2-1 se presenta un esquema que ilustra los componentes esenciales de un depósito de relaves. La figura destaca el muro de contención que establece los límites de la cubeta. Los relaves se depositan sobre esta misma, apoyándose en el talud de aguas arriba del muro.

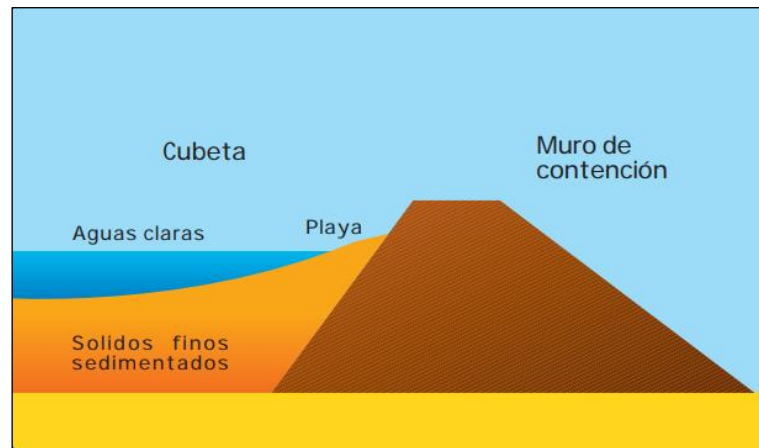


Figura 2-1: Esquema de un depósito de relaves. Fuente: Sernageomin, 2003.

La página web de Sernageomin, en la sección de “Preguntas frecuentes sobre relaves”, ofrece información detallada sobre los elementos de un depósito de relaves, aunque la fecha específica de la información no está disponible. A continuación, se describen cada uno de estos componentes:

Muro de contención: Obra de ingeniería que permite contener los residuos sólidos que en ella se descargan, delimitando la cubeta.

Cubeta: Volumen físico destinado al depósito de relaves (lamas), junto con gran parte del agua de los relaves. En la cubeta, el agua se acumula en la laguna de aguas claras.

Laguna de aguas claras: Resultado de la depositación de relaves en la cubeta, donde la mezcla de sólidos con agua se separa, sedimentando los sólidos a las capas inferiores y formando una laguna por la sedimentación de partículas finas.

Sistema de drenaje: Sistema utilizado para retirar el agua del interior del muro, con el objetivo de mantener el nivel freático lo más bajo posible en el interior del cuerpo del muro.

Revancha: Diferencia en cota entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie inmediatamente vecina de la fracción lamosa o la superficie del agua.

Coronamiento: Parte superior del prisma resistente o muro de contención, muy cercano a la horizontal.

Canal de contorno: Canal de desvío de las aguas de la cuenca que captan y desvían las escorrentías superficiales, evitando su ingreso a la cubeta del depósito de relaves.

Playa activa: Zona de descarga de relaves en la cubeta, se asemeja a una playa de arenas finas, y está seca en la superficie. Es la parte del depósito de relaves o lamas situada en las cercanías de la línea de vaciado.

Los depósitos de relaves deben ser construidos de manera que se evite que el relave fluya hacia áreas distintas al emplazamiento designado. Además, debe contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente. Por lo general, los depósitos inactivos y abandonados no suelen contener una laguna de aguas claras debido al cierre de sus operaciones, especialmente si han dejado de funcionar durante un largo período de tiempo.

2.4. Clasificación de depósitos de relaves

La clasificación de los depósitos de relaves se basa en dos criterios principales: el tipo de relave y su tipo de construcción, según lo establecido por el Ministerio de Minería (2019).

2.4.1. Clasificación por tipo de relaves

Esta categorización divide los depósitos de relaves en función del procesamiento del relave a depositar. La elección depende principalmente de las características de los relaves producidos por la planta, los costos asociados al uso del agua y las particularidades del emplazamiento del depósito (Sernageomin, 2007).

El D.S. 248 (2007), reglamento antes citado, señala tres tipos de relaves según el tratamiento que reciben para ser depositados:

Depósito de relaves espesados: En estos depósitos, los relaves se someten a un proceso de sedimentación mediante espesadores antes de su depósito. Este proceso elimina una parte significativa del agua, previniendo el flujo del relave hacia otras áreas de emplazamiento. A pesar de esto, aún presentan un contenido de agua considerable, el cual podría ser recuperado mediante filtrado parcial o total antes de su depósito.

Depósito de relaves filtrados: En estos depósitos, los relaves son sometidos a un proceso de filtración mediante equipos especiales, garantizando que la humedad sea inferior al 20%. Este método implica una inversión en filtros y en la gestión de la depositación de relaves secos mediante correas transportadoras o camiones.

Depósito de relaves en pasta: Este tipo de depósito representa una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado. Se trata de una mezcla de relaves sólidos y agua (entre 10-25% de agua), que contiene partículas finas, menores de 20 micrones, en una concentración en peso superior al 15%, similar a una pulpa de alta densidad. La implementación de esta tecnología requiere la construcción de espesadores de mayor altura, entre 15 m a 20 m, que permitan la descarga de pulpas de alta densidad.

2.4.2. Clasificación por tipo de construcción

Esta clasificación se basa en el tipo de construcción de los depósitos de relaves, y según el Ministerio de Minería (2019), se dividen de la siguiente manera:

Tranque de relaves: El muro de contención del depósito fue construido con la fracción más gruesa del relave (arenas) y una cubeta. Los sólidos finos se sedimentan, formando una laguna de aguas claras en la superficie.

Embalse de relaves: El muro de contención del depósito fue construido con material de empréstito e impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. La impermeabilización puede realizarse con un material natural de baja permeabilidad o con material sintético como una geomembrana de alta densidad. También se les denomina a aquellos depósitos ubicados en depresiones naturales del terreno donde no se requiere de la construcción de un muro de contención.

2.5. Método Constructivo

Hay tres métodos de construcción del muro para los tranques de relaves según el Ministerio de Minería (2019), el método de aguas arriba, método de aguas abajo y método de eje central.

El principal interés en la selección de los depósitos inactivos y abandonados pilotos del Proyecto FONDEF se centra en aquellos construidos mediante el método de aguas arriba, ya que sus muros poseen menor resistencia frente a la sismicidad. Se tiene registro de 212 depósitos inactivos o abandonados construidos mediante el método de aguas arriba, 25 a través del método de aguas abajo, y 67 con el método de Eje Central.

2.5.1. Método de Aguas Arriba

Consiste en un muro inicial o muro de partida construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la depositación de los relaves como se muestra en la Figura 2-2. Los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior, desplazados en la dirección desde donde llegan los relaves, de modo que se forma una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas (sólidos finos) y gran parte del agua escurre, formando una laguna de sedimentación.

Este método, aunque fue utilizado principalmente por la pequeña minería debido a su menor uso de volumen de material arenoso, presenta muros menos resistentes a sismos y condiciones climatológicas, por lo que su construcción se encuentra prohibida en Chile desde el año 1970.

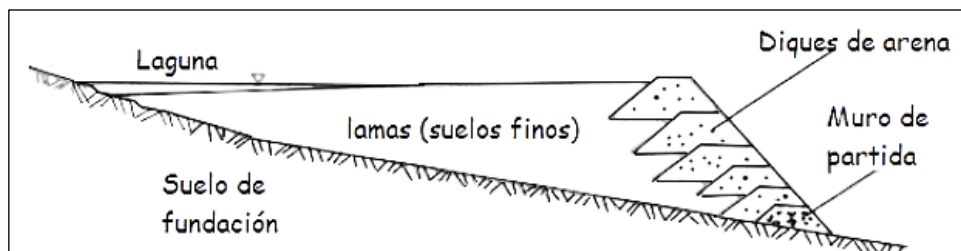


Figura 2-2: Método de Aguas Arriba. Fuente: Sernageomin, 2007.

2.5.2. Método de Aguas Abajo

Consiste en un muro de partida de material de empréstito compactado, desde el cual los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior desplazados en la dirección de avance de los relaves (Figura 2-3). Se tiene registro de 25 depósitos inactivos y abandonados construidos mediante este método (Sernageomin, 2023).

Este método requiere disponer de un gran volumen de arenas, sin embargo, permite hacer muros más resistentes y estables desde el punto de vista de resistencia sísmica.

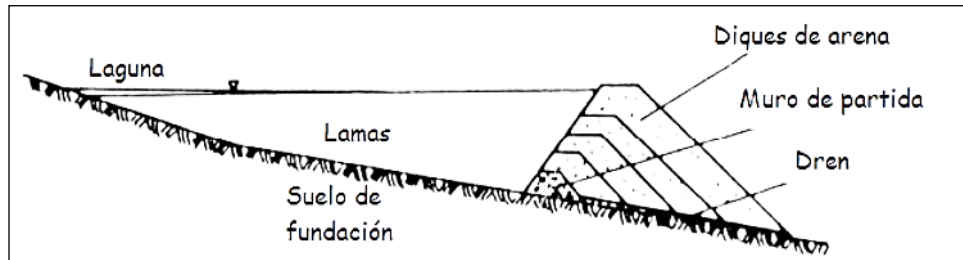


Figura 2-3: Método de Aguas Abajo. Fuente: Sernageomin, 2007.

2.5.3. Método Eje Central o Mixto:

Consiste en un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas hacia el lado aguas abajo y los sedimentos finos o lamas hacia el lado de aguas arriba. En este caso, los pisos se construyen sobre el borde superior del piso anterior sin desplazamientos respecto del inmediatamente inferior (Figura 2-4).

Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los dos métodos anteriores, permitiendo a su vez tener muros estables.

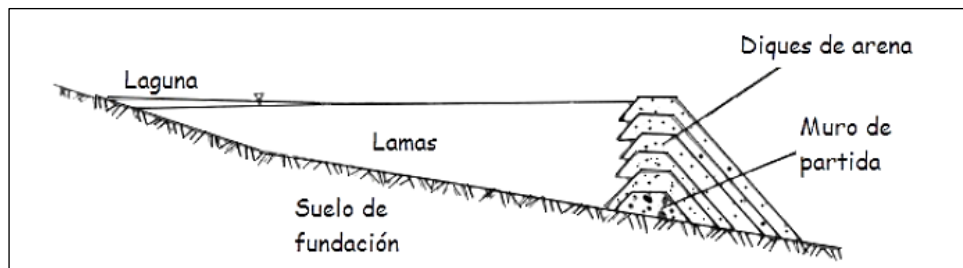


Figura 2-4: Método Eje Central. Fuente: Sernageomin, 2007.

2.6. Modos de falla

En esta sección, se presentan los modos de falla o diferentes formas en que el depósito de relaves puede experimentar una falla, junto con aquellos aspectos para tener en cuenta para predecirlos.

En el documento de Clarkson (2021), se estudian los factores que contribuyen a la aparición de los modos de falla, cómo estos progresan, los indicadores a observar para el control y supervisión de esta falla, y aspectos en el diseño de la estructura para contrarrestar dicha falla. En esta tesis, se

reconoce a las filtraciones como una variable a monitorear, a diferencia de considerarlas como un modo de falla, según lo planteado por Clarkson.

De este modo, se presentan los siguientes tipos de modos de falla para los depósitos de relaves: Capacidad de soporte o falla en la fundación, erosión interna, rebalse, inestabilidad de taludes y licuación sísmica.

Entender qué modo de falla puede afectar a los depósitos inactivos y abandonados es importante en este estudio y para el Proyecto FONDEF (2022) ya que permite conocer las variables de interés que se deben monitorear, y así tomar medidas proactivas para contrarrestar el deterioro progresivo en cualquier etapa de vida del depósito. Los modos de falla a los cuales se pueden ver afectados los depósitos inactivos y abandonados son la capacidad de soporte, erosión interna, inestabilidad de taludes y licuación sísmica.

2.6.1. Capacidad de soporte o falla en la fundación

El deterioro del rendimiento y las características de la fundación de un depósito de relaves puede tener efectos catastróficos en el resto de la instalación (Clarkson, 2021). Este modo de falla está relacionado básicamente con la construcción del depósito sobre una superficie que no proporciona un soporte adecuado en base a su masa (Haeri, 2021).

Los factores que contribuyen a la falla por capacidad de soporte de un depósito de relaves durante la fase de diseño, según Clarkson (2021), incluyen aspectos geológicos, superficies de deslizamiento, fisuración en el suelo/roca, presencia de suelos arcillosos, capas débiles y meteorizadas en la fundación, actividad sísmica e inundaciones previstas, inclinación/declinación de la superficie de la fundación y características del material de la fundación, como la resistencia al corte, la compresibilidad y la permeabilidad. Además, factores como la ubicación de la planta, la topografía, hidrología, geología, hidrogeología, sismicidad, requisitos medioambientales y la normativa local. Aunque los socavones contribuyen a esta falla, son difíciles de observar en la fase de diseño.

Clarkson (2021) menciona que la progresión de este tipo de falla se manifiesta en tres aspectos dependientes del comportamiento del depósito:

1. Resistencia al corte: Relacionada con la teoría de Mohr-Coulomb (Holtz and Kovacs, 1981). El esfuerzo cortante inducido es mayor que la resistencia al esfuerzo cortante (mala resistencia del material de fundación, discontinuidades en la fundación, mala compactación de los materiales en la etapa de construcción, entre otros).

2. Permeabilidad: Involucra el colapso debido al exceso de presión de poros en fundaciones con baja permeabilidad, transporte de material por la fundación altamente permeable erosionando la base del muro hacia aguas abajo, y posibilidad de levantamiento aguas abajo del talud en fundaciones con capa permeable sobre capa de baja permeabilidad.

3. Asentamientos: Se pueden clasificar en tres tipos (Woodward, 2005). La compresión entre las partículas del suelo (carga aplicada, eliminación de agua o vibración), consolidación producto de la expulsión de agua del suelo debido a una carga aplicada, y erosión.

Fell et al. (2015) proporciona criterios de inspección visual para evaluar las condiciones de los cimientos y prever posibles fallas en ellos, como la observación de zanjas de drenaje obstruidas, presencia de humedad inusual, evaluación de flujo de agua que fluye en el depósito, detección de ebulliciones que indican filtraciones, y observación de acumulaciones de sedimentos.

2.6.2. Erosión Interna

La erosión interna se produce cuando las partículas de suelo son desplazadas por las fuerzas hidrodinámicas del agua, ya sea a lo largo del que fluye por el muro o por la fundación, por el embalse a la fundación, o alrededor y dentro de conductos a través del embalse y las paredes que lo soportan (Zhang et al., 2016). Esta falla ocurre cuando el gradiente hidráulico y la velocidad del agua son suficientes para afectar la estabilidad de la estructura de suelo (Clarkson, 2021).

La erosión interna comienza con una combinación desfavorable de susceptibilidad del material, condiciones de tensión y carga hidráulica en algún lugar del depósito (Bureau of Reclamation, 2019), como se muestra en la Figura 2-5. Las infiltraciones en un depósito suelen ser previsibles y no representan necesariamente un problema siempre y cuando estén controladas y no haya migración de partículas asociada (Jantzer, 2009). El tipo más común de erosión interna es el piping.

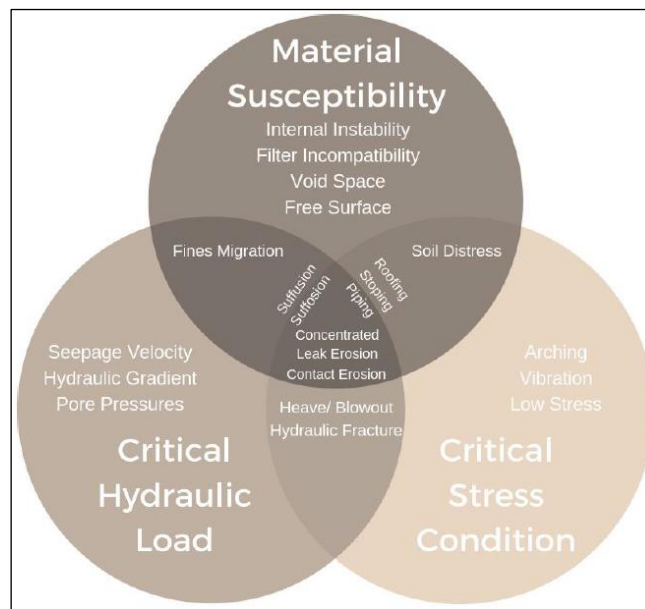


Figura 2-5: Factores que generan la erosión. Fuente: USBR, 2019.

Los mecanismos de erosión interna, según la tesis de Clarkson (2021) y documentos complementarios (Crawford-Flett, 2014; USBR, 2019; Zhang et al., 2016), incluyen:

1. *Erosión por fuga concentrada (scour)*: Erosión debido a la concentración de flujo en un grieta o discontinuidad preexistente en el muro (Figura 2-6).

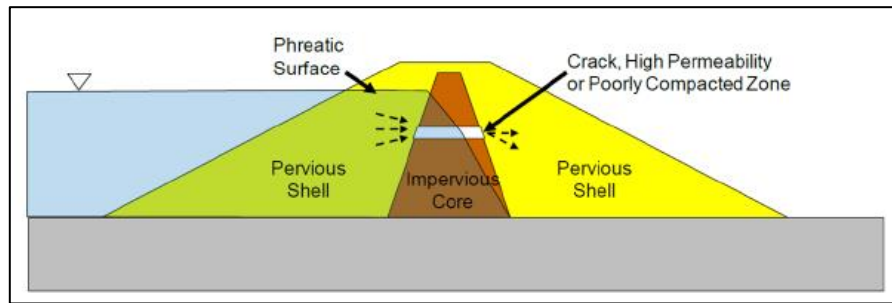


Figura 2-6: Esquema representativo de erosión por fuga concentrada. Fuente: Pastén, 2022.

2. *Erosión retrógrada (BEP)*: La erosión comienza en el punto de salida de la infiltración y erosiona aguas arriba (hacia atrás). Con la distancia aguas arriba, el proceso genera trayectorias de infiltración más cortas, gradientes hidráulicos más altos, más flujo y un mayor potencial de erosión (Figura 2-7).

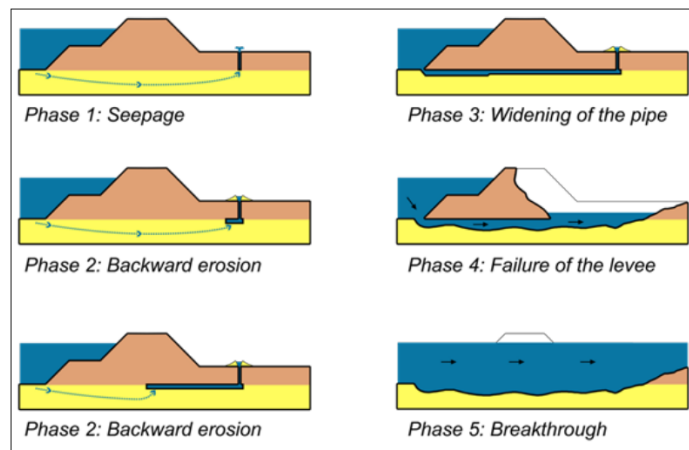


Figura 2-7: Proceso de la erosión retrógrada (BEP). Fuente: USBR, 2019.

3. *Migración interna (stopping)*: Se produce cuando un material granular no es capaz de mantener un estado de esfuerzo en presencia de una cavidad o tubicación y migra de su posición inicial. La migración del material ocurre principalmente por acción gravitacional y eventualmente por acción hidráulica, propagándose hasta la superficie y generando socavones o asentamientos. En el caso de quemigración interna se favorece por la acción hidráulica, el mecanismo se denomina tubificación o Piping (Figura 2-8).

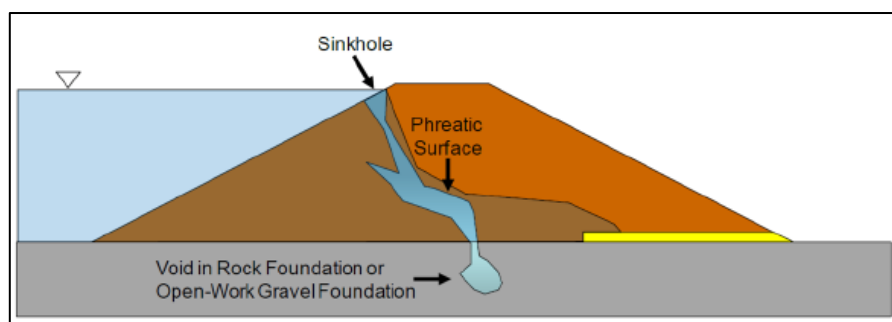


Figura 2-8: Esquema de migración interna (stopping). Fuente: Pastén, 2022.

4. *Erosión por contacto*: Erosión selectiva de partículas finas en la interfaz de dos tipos de suelos bajo infiltración (Figura 2-9).

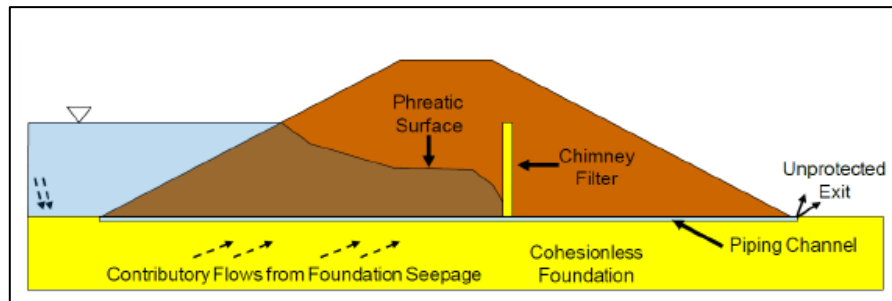


Figura 2-9: Esquema de erosión por contacto. Fuente: Pastén, 2022.

5. *Inestabilidad interna*: Incluye sufusión interna, sufusión externa y sufusión, que corresponden a la migración de finos al interior del muro sin evidencia externa, migración de finos hacia el exterior identificable por turbidez en los drenes, y a la sufusión más el cambio volumétrico, respectivamente.

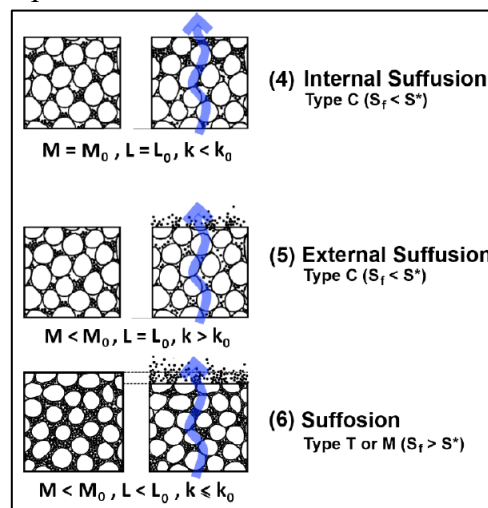


Figura 2-10: Sufusión interna, externa y sufusión en una muestra. El parámetro L hace referencia a la longitud, M a la masa y k a la conductividad hidráulica de la muestra. Fuente: Crawford, 2015.

Fell et al. (2015) señalan que la monitorización de la filtración es el medio más común para identificar la erosión interna. Sin embargo, aspectos como fugas, socavones, asentamientos, grietas y aumento de la presión de poros también pueden detectarse visualmente. La detección de erosión interna puede ser difícil sin instrumentación en el depósito o si esta no se encuentra en la cara del talud, pero suele asociarse con cambios en la presión de poros, filtraciones, apariencia visual, asentamientos de coronamiento e inestabilidad de talud.

2.6.3. Rebalse

El rebalse (overtopping) se produce cuando se excede la capacidad volumétrica de la cubeta del depósito de relaves. Según Clarkson (2021) esto puede deberse al mal funcionamiento de las

estructuras de desagüe, capacidad insuficiente, asentamientos en el coronamiento del muro, inundaciones producto de la lluvia y/o falta de control sobre el nivel de agua en el depósito, eventos sísmicos, deslizamientos del terreno circundante y acción del viento/oleaje que genere que los relaves sobrepasen el depósito.

La estabilidad del depósito se ve principalmente influenciada por la resistencia a la erosión del material del talud si el depósito presenta un rebalse. Zhang et al. (2016) menciona que la erosión superficial es un proceso físico que ocurre cuando el flujo excesivo de agua remueve partículas de suelo en la superficie del talud, debilitándolo gradualmente hasta un desbordamiento catastrófico. Este proceso se describe en dos tipos de suelos: suelos granulares, donde el flujo superficial intenta arrastrar las partículas y suelos cohesivos, que experimentan tres tipos de erosión dependiendo de la pendiente y la arcilla presente.

2.6.4. Inestabilidad de taludes

Este modo de falla consiste en el deslizamiento de una parte del muro en condiciones estáticas o sísmicas, siendo la falla dependiente del material del muro, estratificación del suelo, nivel freático, filtraciones y geometría del muro (Budhu, 2011).

Las características del material fundamentales para el diseño y análisis de la estabilidad de taludes consisten según Clarkson (2021) y USBR (2015b) son:

1. *Selección de la resistencia al corte:* Evaluación de la capacidad del suelo para resistir esfuerzos de corte, considerando la perturbación de las muestras y variabilidad en los materiales.
2. *Mecánica de suelos en estado crítico:* Estudio de cómo los suelos alcanzan una densidad crítica bajo carga, lo que afecta su comportamiento.
3. *Resistencia no drenada:* Análisis de la resistencia al corte en suelos de grano fino cargados rápidamente, como en situaciones de inundación sísmica.
4. *Resistencia drenada:* Evaluación de como los suelos altamente permeables como arenas y gravas, disipan las presiones de poros.
5. *Presión de poros y resistencias asociadas:* Consideración de cómo el aumento de la presión de poro afecta la estabilidad y cómo la saturación del suelo influye en su comportamiento.
6. *Condiciones de carga:* Análisis de diversas condiciones de carga, tanto internas como externas, que pueden afectar la estabilidad del talud.
7. *Influencias externas que aumentan el esfuerzo cortante:* Identificación de factores externos, como cambios en el ángulo del talud o eventos sísmicos, que incrementan el esfuerzo cortante.
8. *Influencias internas que disminuyen la resistencia al corte:* Identificación de influencias internas, como la intemperie del suelo o cambios en el régimen del agua, que reducen la resistencia al corte.

Esta falla puede progresar de diversas formas según la U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2003):

- Falla por corte: deslizamiento de una porción del talud a lo largo de una superficie discreta, en relación con su masa adyacente (Deslizamientos rotacionales, deslizamiento traslacional, falla compuesta)
- Desprendimiento superficial: una porción superficial del terraplén se desprende y se desplaza hacia aguas abajo.
- Deformación/Asentamiento/Sedimentación excesivos: la consolidación de la fundación puede dar lugar a un desplazamiento de partículas y al desprendimiento de un talud construido uniformemente, lo que a su vez puede afectar a la integridad del talud.
- Creep: deformación masiva continua y/o la progresión de numerosos deslizamientos a pequeña escala.

Para prevenir este modo de falla, se observan indicadores como fisuras en el coronamiento o superficie del talud, asentamientos en el coronamiento, socavones, presencia de suelo saturado en áreas previamente secas, daños en infraestructuras y cimientos, entre otros, según Fell y otros (2015) y Nelson (2013),

2.6.5. Licuación sísmica

Los depósitos de relaves han demostrado ser susceptibles a la licuación sísmica, específicamente a la denominada falla de flujo. Este tipo de falla se originan durante eventos sísmicos, donde las presiones de poros no se alcanzan a disipar lo suficientemente rápido generando una condición no drenada en el suelo. Debido a este aumento de exceso de presiones de poros, los esfuerzos efectivos de confinamiento disminuyen llegando a cero o cercano a cero produciendo así un esfuerzo de corte próximo a cero en relaves sin cohesión. Este tipo de falla se caracteriza principalmente por generar deformaciones excesivas en pocos minutos.

Los principales factores contribuyentes a una falla por licuación sísmica que se han observado en los tranques de relaves chilenos, según Villavicencio et al. (2014), incluyen

1. Mal funcionamiento de los depósitos durante los terremotos y con laguna de aguas claras cerca del coronamiento del muro. La presencia de agua fue decisiva para provocar un rápido aumento de las presiones del agua de poros durante la aplicación de cargas sísmicas.
2. Utilización de arena de relaves para la construcción del muro con baja densidad debido a una compactación mecánica inadecuada.
3. Construcción de muros con arenas de relaves con alto contenido de limo. Los inadecuados sistemas de deposición y ciclonado generaron lentes de limo de baja resistencia al corte en el talud aguas abajo en zonas cercanas al coronamiento del muro. Estas lentes facilitaron el desarrollo de mecanismos críticos de falla.
4. El método de construcción aguas arriba generó fallas debido a la licuación del material por debajo del muro de contención (relaves limosos no consolidados y sueltos)

2.7. Asentamientos en depósitos de relaves

Los depósitos de relaves pueden tener tres tipos de deformaciones por asentamiento a lo largo de su vida, deformaciones instantáneas, consolidación primaria y compresión secundaria o creep. Para comprender estos conceptos, en Budhu (2010) se considera un experimento que simula la

consolidación unidimensional de suelos finos. En este experimento, se utiliza una muestra de arcilla saturada entre piedras porosas en un cilindro rígido, donde la carga aplicada se transmite en la parte superior y el agua expulsada se drena a través de piedras porosas. Se asume tanto el agua como las partículas del suelo son incompresibles, y la pared lateral del cilindro es rígida, impidiendo desplazamientos radiales.

Deformación instantánea: La deformación instantánea describe el cambio inmediato del suelo en respuesta a la carga aplicada. La deformación que ocurre en este período de tiempo es elástica ocurre y es posible estimarla a través de la ley de Hooke.

El asentamiento por consolidación consta de dos partes. La primera es la consolidación primaria, ocurre en tiempos tempranos, mientras que la segunda parte es la compresión secundaria o creep, que se produce bajo una tensión vertical efectiva constante (Budhu, 2010).

Consolidación primaria: Es el cambio de volumen del suelo causado por la expulsión del agua entre las partículas de suelo y la transferencia de carga (exceso de presión de poros) hacia las partículas del suelo. Este tipo de asentamiento se presenta en suelos finos como arcillas y limos

Compresión secundaria: Es el cambio en volumen de un suelo causado por el ajuste de la estructura del suelo después de que se ha completado la consolidación primaria (Budhu, 2010).

Las razones físicas de la compresión secundaria en los suelos no se comprenden completamente. Una expulsión de agua de los microporos; otra es la deformación viscosa de la estructura del suelo.

El asentamiento por compresión secundaria según Budhu (2010) es:

$$\rho_{sc} = \frac{H_0}{1 + e_p} C_\alpha \log\left(\frac{t}{t_p}\right) \quad (1)$$

Donde:

ρ_{sc} : Asentamiento por compresión secundaria.

H_0 : Altura inicial del suelo.

e_p : Índice de vacíos inicial del suelo.

C_α : Índice de compresión secundaria.

t_p : Tiempo cuando finaliza la consolidación primaria, tiempo de inicio de la compresión secundaria.

t : Tiempo en el que se quiere medir la deformación por creep.

La consolidación primaria es un fenómeno que se manifiesta principalmente en suelos finos, como arcillas y limos, debido a su menor permeabilidad, lo que resulta en un drenaje más lento. Por otro lado, los suelos granulares, como arenas y gravas poseen una alta permeabilidad que permite un rápido drenaje del agua, evitando así la consolidación primaria. De este modo, el proceso de asentamiento del muro de un depósito de relaves depende de su composición.

2.8. Monitoreo geotécnico de depósitos de relaves

El monitoreo geotécnico es utilizado para controlar las estructuras y puede proveer de información en investigaciones de campo, verificaciones de los diseños, control de construcción, control de

calidad, seguridad, legalidad y comportamiento de las estructuras. Existe una amplia variedad de instrumentación que permite controlar la estabilidad de los depósitos de relaves (Gesche, 2020).

En el caso de depósitos de relaves, se emplean sistemas de monitoreo clasificados en dos categorías: invasivos y no invasivos (Flores, 2019). La instrumentación invasiva implica la adquisición de datos en terreno o in situ, interviniendo en el lugar, y es aquel que se detalla en este capítulo. Aunque este estudio no utiliza el monitoreo invasivo, se proporciona una descripción general de las variables medidas y los instrumentos utilizados.

2.8.1. Variables de monitoreo e instrumentos utilizados

Se describen las variables de monitoreo geotécnico en depósitos de relaves según el D.S. 248 (2007), siendo indicadores clave de los diferentes modos de falla que pueden ocurrir en un depósito. De esta manera, para asegurar la estabilidad de un depósito se deben seleccionar las variables que justifiquen la aparición de las posibles fallas. Estas variables incluyen presiones de poros, niveles freáticos, desplazamientos internos (horizontales y verticales), filtraciones, aceleraciones sísmicas, y otras recomendadas por el proyectista. Otras variables que se suelen agregar a esta lista son los esfuerzos totales del suelo y las fuerzas en elementos estructurales.

La propuesta de instrumentación y monitoreo de la construcción de un depósito de relaves debe especificar la justificación de monitoreo de cada variable, lugar de medición, frecuencia de medición, instrumentos utilizados, sistema de adquisición y transmisión de datos. Esto depende principalmente de las características específicas del proyecto, como el tipo de depósito, dimensiones, características y composición del muro y la cubeta, y el presupuesto asignado.

A continuación, se describen las variables medidas mediante monitoreo in situ, su justificación de medición e instrumentos utilizados para dicha labor.

Tabla 2-1: Variables de monitoreo geotécnico. Fuente: Elaboración propia; Gesche, 2020.

Variable	Justificación	Instrumentos
Presiones de poros	Para controlar niveles de rellenos, la efectividad de los sistemas de drenaje durante la operación o para evaluar el comportamiento ante sismos. El comportamiento no drenado de los suelos frente a cargas sísmicas puede desarrollar altas presiones de poro.	Tubos verticales, piezómetros (hidrostático, neumático y de cuerda vibrante).
Nivel freático	Se mide en zonas donde únicamente se busca determinar la presencia o ausencia de agua. Permite confirmar si éste decae según lo esperado de acuerdo sistema de drenes definido y, en caso de que no ocurra permite adoptar medidas preventivas.	Sensores de temperatura y piezómetros.

Variable	Justificación	Instrumentos
Filtraciones	Se mide el agua infiltrada a través o bajo de la presa para corroborar que el caudal de salida sea consistente con el caudal estimado en el diseño, y para verificar que sus concentraciones químicas se encuentran dentro de lo aceptado.	Pozos de monitoreo, lectores de flujo o canales Parshall y piezómetros.
Desplazamientos horizontales internos	Análisis de los movimientos internos del depósito, en este caso, de los desplazamientos horizontales, para evaluar la estabilidad de taludes y determinar la necesidad y urgencia de medidas correctivas.	Teodolitos o estación total, inclinómetros y extensómetro de barras.
Desplazamientos verticales internos o asentamientos.	Para medir asentamiento de la fundación y la consolidación del material del depósito. En específico durante la etapa de diseño, observando si se presenta una deformación vertical mayor a la permitida que pueda presentar problemas de estabilidad en los taludes o falla por rebalse del depósito.	Celdas de asentamiento, extensómetros magnéticos, extensómetro de barra e inclinómetros
Aceleraciones sísmicas	La actividad sísmica puede producir grandes esfuerzos adicionales en el depósito, pudiendo producirse fallas en este. Medir aceleraciones ayuda a controlar los esfuerzos a los que está siendo sometido.	Acelerógrafos
Esfuerzos totales	Su medición permite verificar su consistencia con la carga de diseño, alertando sobre posibles asentamientos o señalar su origen en caso de que ya se hayan producido.	Celdas de presión total hidráulicas.

2.9. Fundamentos de la percepción remota o teledetección

En esta sección, se aborda la percepción remota, que implica medir propiedades un objeto a través de sensores remotos, cámaras en satélites, aviones u otros dispositivos para poder analizar la Tierra u otro cuerpo celeste (Capacitación de percepción remota aplicada [ARSET], 2020a).

El enfoque de esta sección es presentar las principales características de la percepción remota. En específico, los satélites y los sensores contenidos en ellos. Hay distintos tipos de sensores según su fuente de energía, las órbitas satelitales, el espectro electromagnético, resoluciones y aplicaciones de la percepción remota.

2.9.1. Satélites y sensores

Los satélites artificiales son creados por el hombre y puestos en órbita mediante cohetes con instrumentos y cámaras para estudiar la Tierra y otros planetas, facilitar las telecomunicaciones y observar el universo (EOS Data Analytics, 2023). Estos instrumentos o sensores miden la radiación electromagnética reflejada y emitida al espacio, proporcionando información sobre las condiciones

en superficie y en la atmósfera. Principalmente, capturan radiación infrarroja y microondas dentro del espectro electromagnético (Figura 2-11) (ARSET, 2020a).

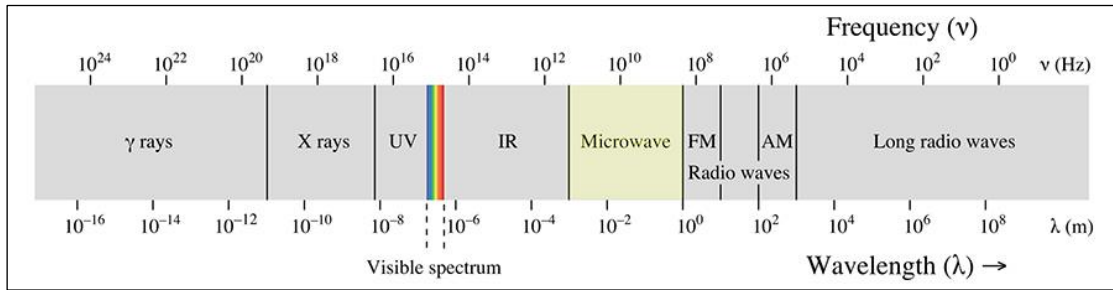


Figura 2-11: Espectro electromagnético. Fuente: Alaska Satellite Facility [ASF], s.f.-b.

La Agencia Espacial Europea (ESA), fundada en 1975, coordina el desarrollo de la capacidad espacial europea con beneficios globales (ESA, s.f.-e). Lanzan satélites para la observación terrestre, navegación, telecomunicaciones y astronomía, y participan en la exploración tripulada del espacio (ESA, s.f.-e). Algunos de sus satélites destacados son ERS-1, su primer satélite de observación de la Tierra, y Envisat, la nave espacial de observación de la Tierra más grande con diez instrumentos ópticos y de radar para monitoreo continuo (Ferreti et al., 2007).

En los satélites, existen dos tipos de sensores: activos y pasivos, según ARSET (2017a, 2020a). Los sensores pasivos detectan únicamente lo que es emitido desde el paisaje o reflejado con el sol, es decir, la fuente de energía radiante surge de fuentes naturales, un ejemplo de este sensor es el óptico que solo funciona durante el día. Por otro lado, los sensores activos emiten señales sobre la Tierra y miden la radiación reflejada (retrodispersada). Ejemplos de estos sensores son SAR y LIDAR. Aunque poseen la ventaja de operar tanto de día como de noche y penetrar las nubes, son difíciles de procesar y algunos solo están disponibles desde aeronaves.

2.9.2. Órbitas satelitales

Los satélites se desplazan en dos tipos de órbitas para lograr coberturas específicas: geostacionaria (GEO) y terrestre baja (LEO). Ambas son detalladas por ARSET (2020a) y se muestran en la Figura 2-12).



Figura 2-12: Izquierda: Órbita geostacionaria (GEO). Derecha: Órbita terrestre baja (LEO).

Fuente: EOS Data Analytics, 2023a.

Órbita geostacionaria (GEO): El satélite se encuentra a 36.000 km aproximadamente sobre la Tierra en la línea ecuatorial. Tiene el mismo período de rotación que la Tierra, por lo tanto, parece

estar fijo en el espacio. Realiza múltiples observaciones al día, pero cobertura espacial limitada. Ejemplo: satélites de comunicaciones o meteorológicos.

Órbita terrestre baja (LEO): Es circular en movimiento constante relativo a la Tierra, a 160-2000 km aproximadamente. Puede ser polar o no polar. Las mediciones son menos frecuentes de 1 al día o 1 al mes (dependiendo de si es polar o no polar) pero la cobertura espacial es amplia (global). Ejemplo: Satélites de órbita polar son Landsat o Terra.

2.9.3. Resoluciones de los sensores

El ARSET (2020) define las resoluciones para considerar al obtener datos de sensores. Los sensores capturan *imágenes SAR* digitales en una matriz bidimensional de píxeles (Ferreti et al, 2007).

Resolución espacial: Está determinada por el tamaño de píxel y varía según el sensor, la órbita y la cobertura espacial y temporal. Esta resolución se determina por el tamaño de píxel, unidad más pequeña que un sensor mide. A menor tamaño de píxel, mejor resolución, pero menor es el área cubierta. Se muestran las resoluciones espaciales de algunos sensores en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Sensores y sus resoluciones espaciales. Fuente: ARSET, 2020a.

Sensor	Resolución espacial [m]
DigitalGlobe (y otros)	<1-4 m
Landsat	30
MODIS	250 - 1000
Global Precipitation Mission (GPM) Dual Frequency Radar	5000

Resolución temporal: Depende del tipo de sensor, órbita alrededor de la Tierra y la cobertura espacial y temporal. Esta resolución está determinada por el *tiempo de revisita*, que corresponde a la frecuencia de medición de una misma área de la Tierra, es decir, cuanto tarda en completar un ciclo orbital lo cual depende de las capacidades, solapa de barrido y latitud del satélite/sensor. Se muestran las resoluciones espaciales de algunos sensores en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Sensores y sus resoluciones temporales (tiempo de revisita). Fuente: ARSET, 2020a.

Sensor	Tiempo de revisita [días]
Landsat	16
MODIS	2
Commercial (OrbView)	1-2

Resolución espectral: Describe la habilidad del sensor de definir intervalos de longitudes de onda, cuanto más fina es la resolución espectral, más estrecha la gama de longitudes de onda para un canal o banda en particular. A mayor cantidad de canales finos, mayor la percepción remota de diferentes partes de la superficie terrestre. Ejemplo: sensores Landsat con 7-11 bandas, MODIS con 36 bandas y AVIRIS con 256 bandas.

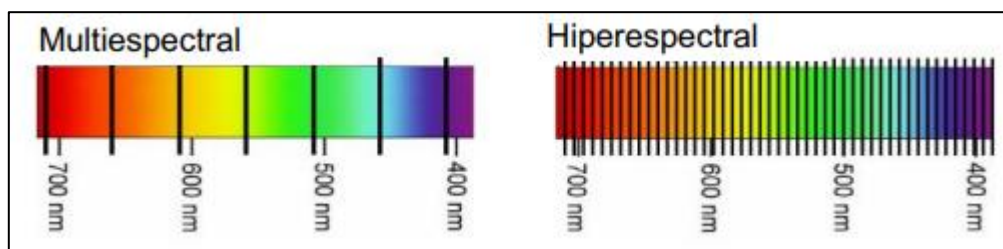


Figura 2-13: Bandas espectrales. Fuente: ARSET, 2020a.

Resolución radiométrica: Referido al número máximo de niveles de luminosidad disponible, esto depende del número de bits utilizados en la representación de la energía registrada. A mayor número de bits, mayor la cantidad de niveles y más alta la resolución radiométrica y nitidez (ARSET, 2020a).

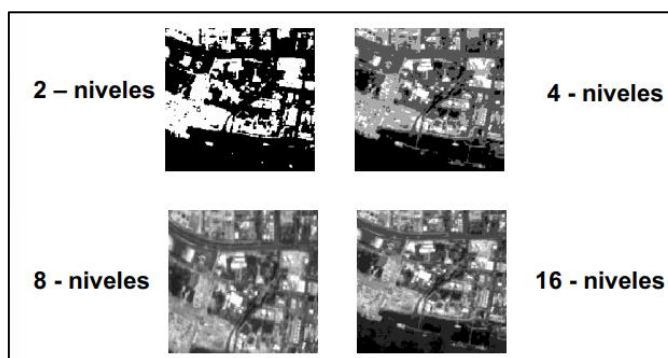


Figura 2-14: Escenas con diferentes resoluciones espectrales. Fuente: ARSET, 2020a.

2.10. Radar de Apertura Sintética (SAR)

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es un sensor activo (detallado en la Figura 2-15) que envía pulsos electromagnéticos a la Tierra y graba su retorno reflejado por la superficie, obteniendo imágenes del área que ilumina. Las señales que utilizan estos sensores se encuentran en la banda del espectro electromagnético de las microondas (Figura 2-11). Su característica principal que lo diferencia de otros sensores de ondas microondas es su capacidad para lograr altas resoluciones en la dirección del movimiento del sensor mediante la síntesis de una antena de grandes dimensiones a partir de una antena real más pequeña (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial [INTA], 2019).

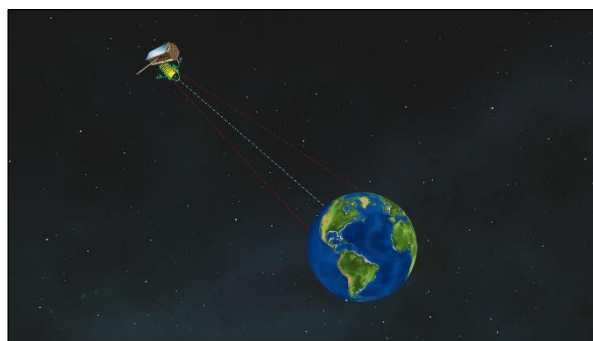


Figura 2-15: Radar de Apertura Sintética. Fuente: INTA, 2019.

Las imágenes obtenidas a través de SAR presentan una mejora en el tiempo de revisita, amplia cobertura geográfica y se comparten rápidamente para respaldar aplicaciones en monitoreo marítimo, terrestre y emergencias (ESA, s.f.-g). Ejemplos de satélites con sensores SAR son el conjunto de satélites Sentinel 1-A y Sentinel 1-B. Satélites anteriores, como el ERS-1 de la ESA, destacado en la Sección 2.9.1 y Envisat, contaban con la tecnología SAR, pero actualmente no están en operación.

Los sensores de radar utilizados para la teledetección del terreno son casi siempre sistemas de observación lateral Figura 2-16, mientras que la mayoría de los sensores ópticos (sensores pasivos mencionados en la Sección 2.9.1) observan desde el nadir (Center for Space Research of the University of Texas [CSR], 1999).

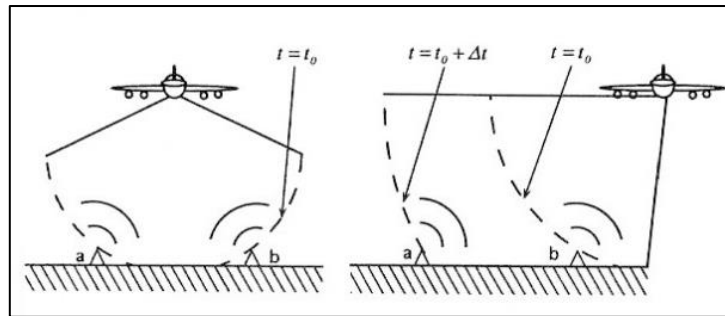


Figura 2-16: Radar de visión hacia abajo vs Radar de visión lateral. Fuente: ARSET, 2017a.

2.10.1. El sistema SAR y sus parámetros

El sensor SAR transmite un pulso para iluminar la superficie de la Tierra desde un cierto ángulo y mide el eco que retorna o *retrodispersión* (Figura 2-17). Esta se describe como una porción de la señal o energía reflejada desde la superficie terrestre. La información medida por el sensor corresponde a la *amplitud* y la *fase* de la retrodispersión en la dirección de la antena creando una imagen detallada, a esto se le denomina *sistema SAR* (ARSET, 2017a; ESA, s.f-m).

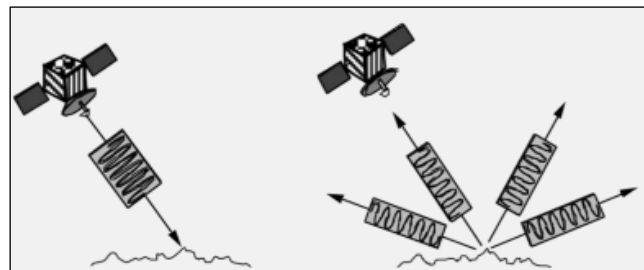


Figura 2-17: Pulso emitido por el radar y retrodispersión (backscatter). Fuente: ARSET, 2017a, diapositiva 10.

La amplitud corresponde a la energía retrodispersada hacia el sensor que depende de las características del objetivo o target iluminado (rugosidad, absorción, etc) y la fase es la distancia entre el sensor y el objetivo más la rotación de fase introducida por la estructura del objetivo y sus características dieléctricas. Grunfeld, (s.f.) menciona que la fase se calcula como:

$$\psi = -\frac{4\pi d}{\lambda} + \psi_{target} \quad (2)$$

Donde:

ψ : Fase de la señal retrodispersada

d : Distancia entre el sensor y el objetivo

λ : Longitud de onda de la señal

ψ_{target} : Fase introducida por la estructura del objetivo

El sistema SAR para un satélite se representa en la Figura 2-18. El satélite posee el radar con una antena apuntando hacia la superficie de la Tierra en el plano perpendicular a la órbita (no es estrictamente cierto pues es necesaria la compensación por la rotación de la Tierra). La inclinación de la antena con respecto al nadir se llama *ángulo off-nadir*. Este ángulo está en un rango de 20° a 50° (Ferreti et al., 2007).

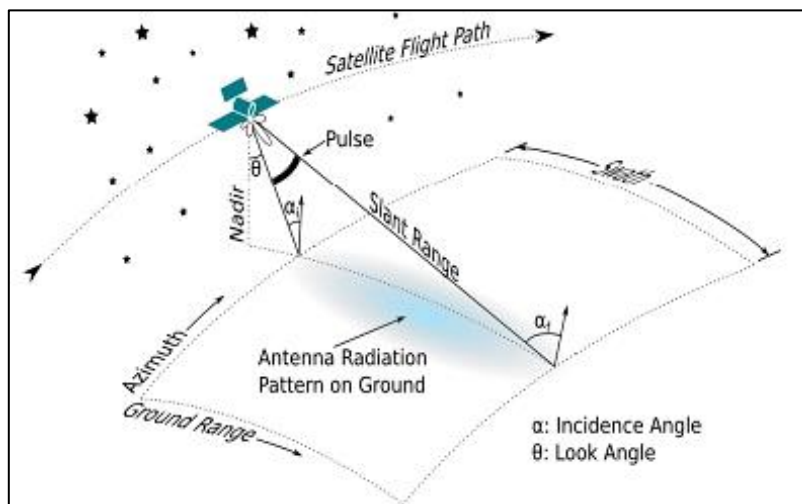


Figura 2-18: Sistema SAR de un satélite. Fuente: Grunfeld, N, s.f.

La dirección *slant-range* o de la *Línea de Visión (Line of sight o LOS)* (Figura 2-18) corresponde a la dirección donde ilumina el sensor y se toman las medidas (Ferreti et al., 2007). El *ground range* o alcance terrestre, es la proyección del *slant-range* sobre la superficie terrestre, y el *ángulo de incidencia*, es el ángulo entre la línea de visión y la vertical de la superficie del terreno. Este varía dependiendo de la altura del sensor y la inclinación local de la superficie e influye en la intensidad de la imagen (ARSET, 2020b).

En cuanto a los modos de adquisición, el *stripmap* (Figura 2-18) muestra cómo se traza una cierta *área específica (swath)* en el *ground range* y captura imágenes de longitud definida cada minuto (Ferreti et al., 2007). El ángulo de incidencia en un terreno horizontal plano es mayor que el *off-nadir* debido a la curvatura terrestre. Sin embargo, por simplicidad, se asume que la Tierra es plana y, por lo tanto, que el ángulo de incidencia es igual al ángulo *off-nadir* (Ferreti et al., 2007).

La selección de una longitud de onda del sistema SAR se basa en la penetración de la señal. Longitudes más largas, permiten penetrar a través de la vegetación o el suelo. Las longitudes de

ondas más frecuentemente usadas en radar son de 0.86 cm, 3.0 cm, 3.2 cm, 6.0 cm, 23.5 cm y 25 cm. Según se mira en la Tabla 2-4 corresponden a las bandas Ka, X, C, L y P (ARSET, 2017a).

Tabla 2-4: Bandas de frecuencia en el rango de microondas. Fuente: ARSET, 2017a.

Banda	Longitud de onda [cm]	Frecuencia [GHz]
Ka	0.8 – 1.1	40.0 – 26.5
K	1.1 – 1.7	26.5 – 18.0
Ku	1.7 – 2.4	18.0 – 12.5
X	2.4 – 3.8	12.5 – 8.0
C	3.8 – 7.5	8.0 – 4.0
S	7.5 – 15.0	4.0 – 2.0
L	15.0 – 30.0	2.0 – 1.0
P	30.0 – 100.0	1.0 – 0.3

La banda C captura imágenes continuas durante el día o la noche, observando capas superficiales de suelo (ESA, s.f.-l) mientras que la banda P se emplea para estudiar la vegetación. En cambio, la banda L es ideal para investigar humedales gracias a su capacidad de penetrar la vegetación (ARSET, 2017a).

Se nombran algunos sistemas SAR junto con sus respectivas bandas (Ferreti et al., 2007):

- Banda C (5.3 GHz): Sentinel-1, ERS, Envisat, Canadian Radarsat y US shuttle missions.
- Banda L (1.2 GHz): J-ERS y ALOS
- Banda X (10 GHz): X-SAR.

Las mediciones de radar pueden ser polarizadas, generalmente horizontal y vertical, lo que permite determinar las propiedades físicas del objeto observado. La configuración Quad-Pol implica la medición simultánea de cuatro polarizaciones (ARSET, 2017a).

- HH: La señal es transmitida horizontalmente y recibida horizontalmente.
- HV: La señal es transmitida horizontalmente y recibida verticalmente.
- VH: La señal es transmitida verticalmente y recibida horizontalmente.
- VV: La señal es transmitida verticalmente y recibida verticalmente.

Se muestran características de diferentes sistemas SAR en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5: Características de diferentes satélites. Fuente: ARSET, 2017a.

Nombre del sensor	RADARSAT-2	Sentinel-1A	RISAT-1
Agencia	Canadian Space Program (CSP)	European Space Agency	Indian Space Research Organization (ISRO)
Sensor	SAR de Banda C (5.4 GHz)	SAR de Banda C (5.4 GHz)	SAR de banda C (5.35 GHz)
Ángulo de incidencia	Visión lateral, 15-45° desviado del nadir	Visión lateral, 15-45° desviado del nadir	36.85°
Polarización	HH, HV, VV y VH	(VV y VH) o (HH y HV)	HH y HV
Altura del sensor en la Línea Ecuatorial	798 km	693 km	542 km
Órbita	Heliosincrónica (anochece/amanecer)	Heliosincrónica (anochece/amanecer)	Heliosincrónica (anochece/amanecer)
Tiempo de Revisita	24 días	12 días	25 días
Resolución	100 m	5 m x 20 m	~ 25 m
Ancho de Barrido	500 km (modo ScanSAR)	250 km (modo IWS)	115 (MRS)
Hora Local Media	6:00 am descendente	6:00 am descendente	6:00 am
Lanzamiento	14/12/2007	03/04/2014	26/04/2012
Vida útil Programada	7 años como mínimo	7 años	5 años

2.10.2. Obtención de imágenes SAR

Como se menciona en la Sección 2.9.3, la imagen SAR digital es una matriz bidimensional formada por columnas y filas de píxeles (Figura 2-19). Las filas de una imagen están asociadas con el azimut de cada píxel y las columnas indican la distancia en el LOS (Ferreti et al, 2007).

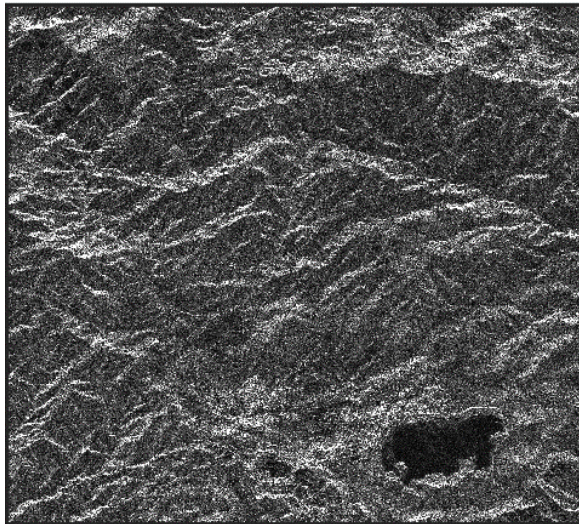


Figura 2-19: Imagen SAR de la Región de Coquimbo. La dirección vertical de la imagen corresponde al slant-range o LOS y la dirección horizontal a la dirección del azimut. Fuente: Elaboración propia con software SARPROZ, 2023.

Cada píxel tiene un número complejo que lleva información de amplitud y fase sobre el campo de microondas retrodispersado en un área específica o *celda de resolución* (Ferreti et al, 2007) (Figura 2-20). La ubicación y dimensiones de la celda de resolución en coordenadas de azimut y slant-range dependen únicamente de las características del sistema SAR (Ferreti et al., 2007).

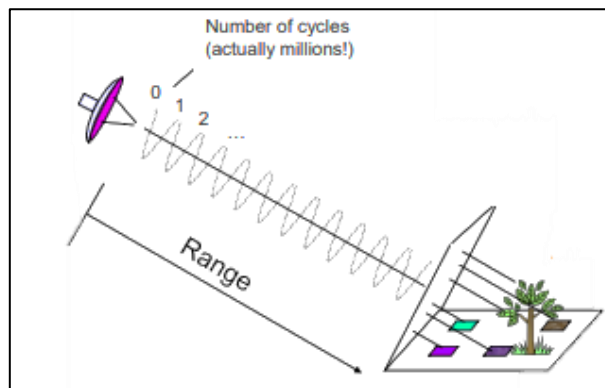


Figura 2-20: Información de una celda de resolución medido mediante SAR. Fuente: ARSET, 2017b.

El número y la configuración de elementos de dispersión dentro de una celda de resolución varía de píxel a píxel. La fase mencionada en la Sección 2.10.1, se mide en ciclos como se muestra en la Figura 2-20 y revela lecturas muy precisas de la distancia sensor-objetivo (Perissin, 2016).

La información de fase de la señal de radar medida es una combinación coherente de los retornos de estos diferentes elementos de dispersión sumando a un solo valor para cada píxel y se expresa con la Ecuación (3) (ARSET, 2017b).

$$y = Ae^{i\psi} \quad (3)$$

Donde:

y : Señal retornada

A : Amplitud de la señal retornada.

ψ : Fase de la señal retornada.

La fase y amplitud de la señal son descritas en la Sección 2.10.1, donde también se indica como se calcula la fase retornada en la Ecuación (2). En la Figura 2-21, se muestran los componentes de la señal transmitida.

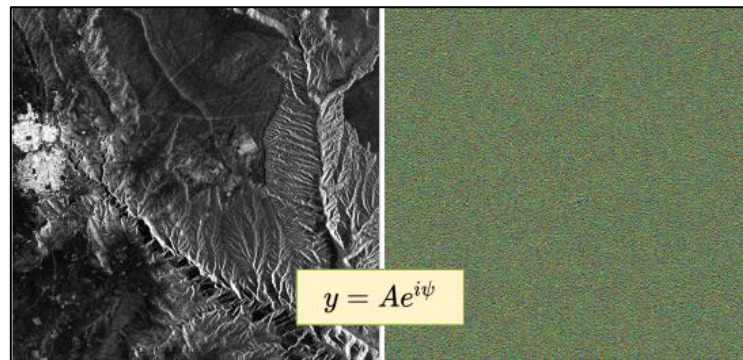


Figura 2-21: Imagen SAR: Amplitud (izquierda) y fase (derecha). Fuente: Grunfeld, N, s.f.

La imagen SAR representa una cantidad compleja de energía reflejada de vuelta al satélite, donde la magnitud de cada pixel representa la intensidad de la señal reflejada (ARSET, 2017a).

La *retrodispersión* o *backscatter* mencionada en la Sección 2.10.1 contiene información sobre la superficie abarcada por la señal del radar, sin embargo, depende de las características del radar y de la superficie. Las características importantes del radar son el ángulo de onda incidente, la frecuencia o longitud de onda y la polarización de la onda. Las características de la superficie para tener en cuenta son la constante dieléctrica, la aspereza de la superficie provocada por la longitud de onda emitida y, la estructura y orientación de los objetos en la superficie (ESA, s.f.-m). En la Figura 2-22 se muestra como la superficie afecta a la retrodispersión.

La *constante dieléctrica* de los materiales indican su reflectividad y conductividad. Esta constante es alta sobre todo en agua, ya que esta posee una gran reflectividad (ESA, s.f.-m).

La *aspereza* depende del tamaño de los objetos en la superficie en comparación a la longitud de onda. Este fenómeno determina que tan áspero o liso aparecen al radar y que tan brillantes u oscuros aparecen en la imagen. Las superficies más ásperas o rugosas (Figura 2-22) reflejan más energía y aparecen más brillantes en la imagen, mientras que las superficies planas reflejan menos y se ven más oscuras (ESA, s.f.-m).

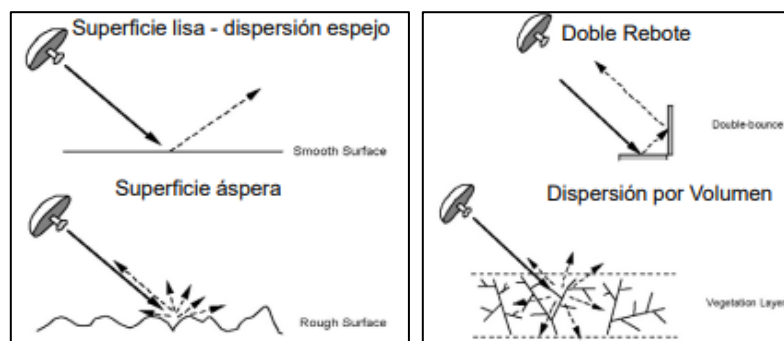


Figura 2-22: La superficie como un factor influyente en la retrodispersión de la señal. Fuente: ARSET, 2017a.

Según Díaz (2021) y según se puede mirar en la Figura 2-23, cuando la señal de radar rebota en superficies ásperas, se producen sombras en las imágenes con tonos de gris. Las superficies lisas como, por ejemplo, pistas de aeropuertos, áreas de estacionamiento o superficies de aguas tranquilas aparecen de oscuras a negras debido a que la señal rebota en dirección contraria al sensor haciendo que el sensor reciba muy poca señal. Los píxeles brillantes se encuentran a menudo en áreas urbanas, en objetos metálicos o en las orillas de los ríos y orillas de los lagos, es decir, en objetos que actúen como una barrera y provoquen el rebote de la señal (Díaz, 2021).



Figura 2-23: Imagen de reflexión sobre un área de Baviera, Alemania. Fuente: Diaz, 2021.

La imagen SAR detectada generalmente se visualiza mediante niveles de escala de grises, como se muestra en el ejemplo de la Figura 2-24 (Ferreti et al., 2007).



Figura 2-24: Imagen SAR detectada de Milán (Italia). El tamaño de la imagen es de 25 km en la dirección del slant-range (vertical) y 25 km en la dirección del azimuth (horizontal). Fuente: Ferreti et al., 2007.

2.10.3. Imagen SAR ascendente y descendente

Las imágenes SAR pueden ser tomadas en trayectorias ascendentes o descendentes dependiendo de la órbita. La órbita del satélite, combinada con la rotación de la Tierra (O-E), permite realizar dos adquisiciones de la misma área desde dos ángulos de visión diferentes en cada ciclo de satélite como se observa en la Figura 2-25 (Ferreti et al., 2007).

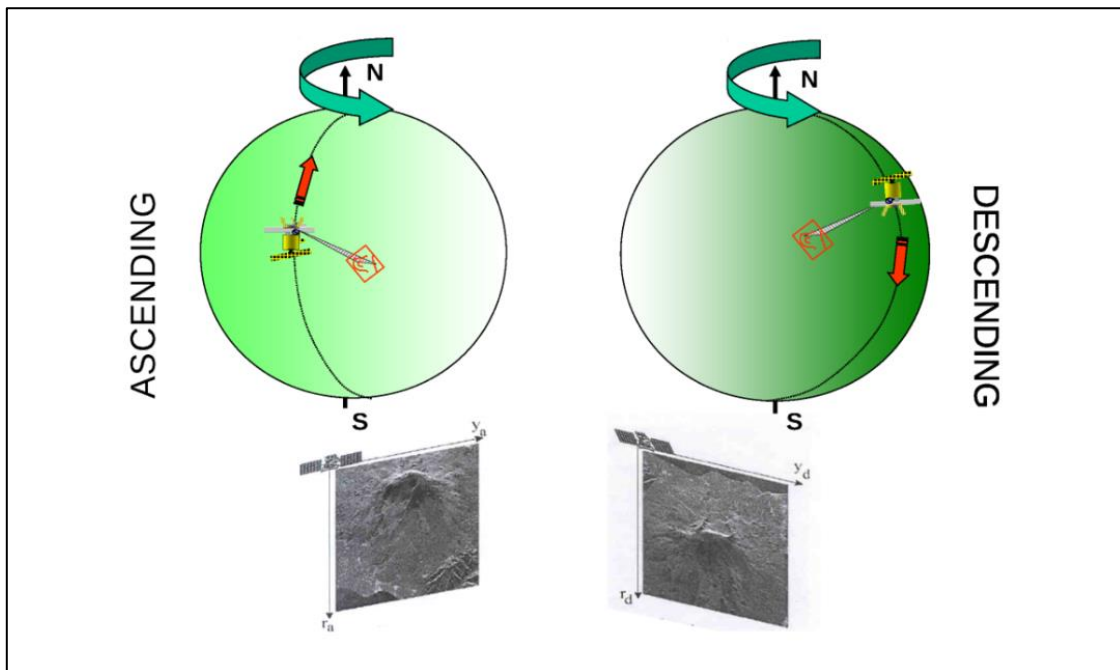


Figura 2-25: Trayectorias ascendentes y descendentes para satélite ERS. Fuente Ferreti et al., 2007.

Las órbitas que van de sur a norte se denominan *órbitas ascendentes* y de norte a sur *órbitas descendentes*. La antena SAR, tanto en Sentinel-1 como en ERS, apuntan al lado derecho de la trayectoria. Por lo tanto, en órbita o trayectoria descendente las escenas son observadas desde el este y en órbita ascendentes desde el oeste (Ferreti et al., 2007).

En la Figura 2-26, se observan imágenes ascendentes y descendentes del Monte Etna tomadas desde el satélite ERS, junto con un *Modelo Digital de Elevación* o DEM del área (Ferreti et al., 2007).

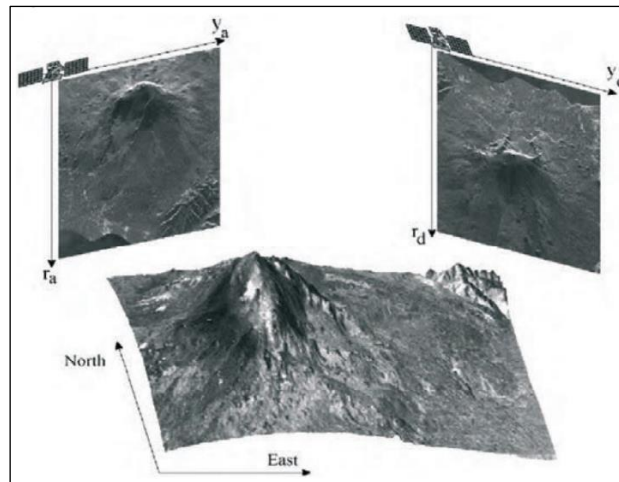


Figura 2-26: Imágenes SAR ascendente y descendente del Monte Etna (Italia) capturadas desde satélite ERS y Modelo Digital de Elevación (DEM). Fuente: Ferreti et al., 2007.

2.10.4. Distorsiones geométricas y radiométricas de la señal de Radar

La topografía de la zona puede provocar distorsión por slant-range o LOS, distorsiones geométricas, sombras y distorsiones radiométricas que deben distinguirse para poder corregirlos e interpretar los datos de manera correcta (ARSET, 2017a).

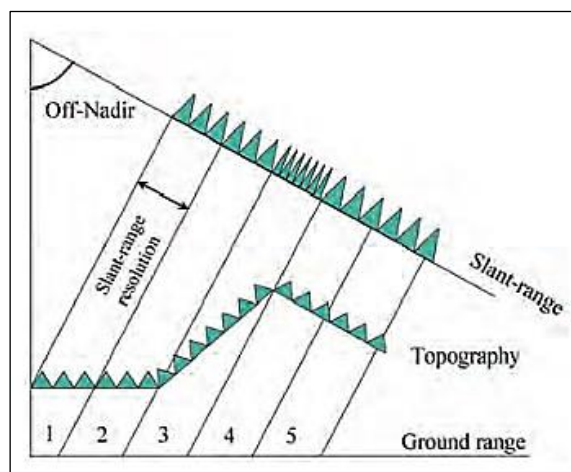


Figura 2-27: Efecto del terreno en la imagen SAR. Fuente: Ferreti et al., 2007.

2.10.4.1. Distorsión por slant-range

Dado que el radar mide hacia el lado, las áreas más cercanas al sensor se ven comprimidas, mientras que las más alejadas se ven elongadas. Utilizando trigonometría y otros cálculos matemáticos se puede corregir esta distorsión para colocarlo en su ubicación y distancia correcta en relación con el plano terrestre (Natural Resources Canada, 2015).

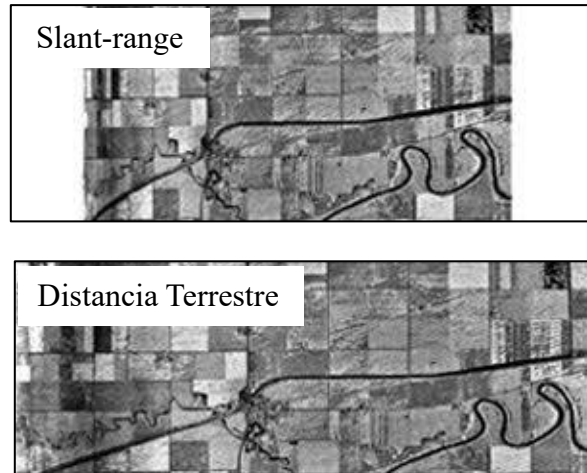


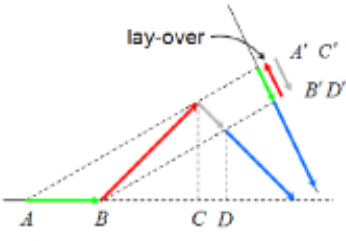
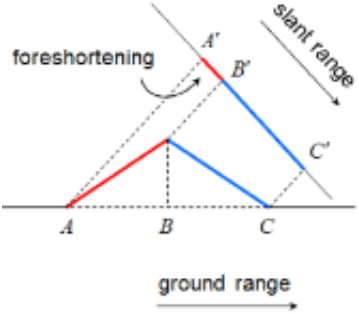
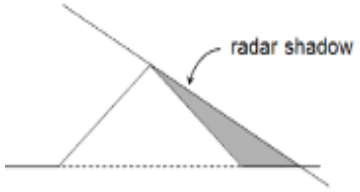
Figura 2-28: Distorsión por slant-range. Fuente: Natural Resources Canada, 2015.

2.10.4.2. Distorsiones geométricas

Existen varias distorsiones inherentes a los datos SAR debido a la naturaleza de observación lateral del sensor, y estas distorsiones son evidentes en áreas con terreno con muchas pendientes. El proceso de corrección radiométrica del terreno aborda las distorsiones geométricas que provocan errores de geolocalización en las características del terreno y normaliza los valores de retro dispersión según el área real que contribuye a los retornos (ASF, s.f.-b).

Las principales distorsiones presentes en las imágenes SAR son el acortamiento, solapamiento y sombra (ASF, s.f.-b).

Tabla 2-6:Tipos de distorsiones geométricas: Solapamiento, acortamiento y sombra. Fuente: Ferreti et al., 2007; ASF, s.f.-b.

Solapamiento o Layover	Acortamiento o Foreshortening	Sombra o shadow
 <p data-bbox="240 569 594 684">Figura 2-29: Solapamiento (lay-over) en la imagen SAR. Fuente: ASF, s.f-b</p>	 <p data-bbox="646 632 1024 747">Figura 2-30: Acortamiento (foreshortening) en la imagen SAR. Fuente: ASF, s.f.-b.</p>	 <p data-bbox="1097 569 1422 684">Figura 2-31: Sombra (shadow) en la imagen SAR. Fuente: ASF, s.f.-b.</p>
<p data-bbox="240 789 594 1283">Distorsión que ocurre cuando la pendiente del terreno es tan pronunciada que supera el ángulo off-nadir del radar. Cuando esto ocurre los dispersores se imprimen en orden inverso y se superponen a la contribución proveniente de otras áreas, provocando pérdida de identidad de los puntos terrestres.</p>	<p data-bbox="618 789 1065 1451">Distorsión causada por un aumento en la pendiente del terreno en comparación con una superficie horizontal plana. A medida la pendiente aumenta, la normal del terreno se desplaza hacia el LOS, incrementando la dimensión de la celda de resolución y resultando en la pérdida de detalles en la imagen SAR. Este fenómeno afecta significativamente la amplitud de la imagen, siendo áreas con acortamiento más brillantes debido a la mayor celda de resolución y un ángulo de incidencia más pronunciado.</p>	<p data-bbox="1089 789 1438 1325">Distorsión que ocurre como consecuencia del lay-over cuando una pendiente es tan pronunciada, se produce un área de terreno en sombra, el cual puede mostrar un área oscura o sin información. Esto resulta en pérdida de información sobre la topografía y características del terreno en esas regiones.</p>

2.10.4.3. Distorsión radiométrica

Efecto o influencia de la topografía en los valores de retrodispersión. Para corregir esta dispersión se elimina la retrodispersión brillante causada por la reflexión del radar en pendientes pronunciadas, dejando solo la retrodispersión que revela características superficiales (ASF, s.f.-a).

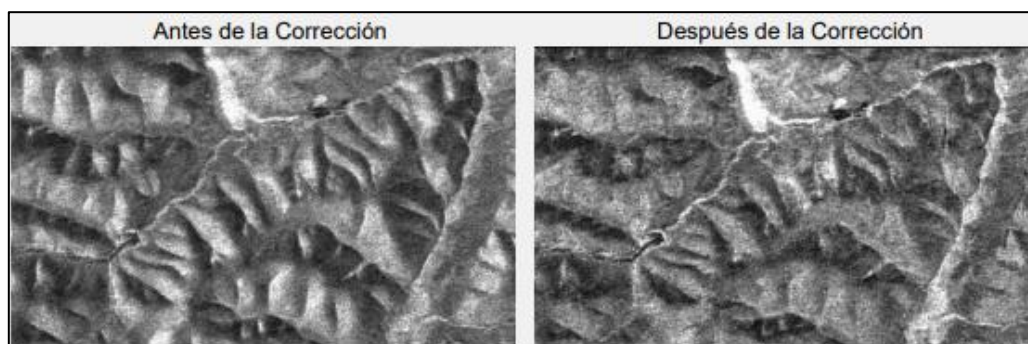


Figura 2-32: Distorsión radiométrica. Fuente: ARSET, 2017a.

2.10.4.4. Moteado (Speckle)

Las imágenes SAR presentan una apariencia granulada denominada moteado o speckle, causado por la superposición de las señales reflejadas por muchos objetos o dispersores en cada píxel como se muestra en la Figura 2-20 (Ferreti et al., 2007). Este moteado, considerado como un “ruido” granular afecta la calidad de las imágenes de SAR. Sin embargo, al tomar imágenes de la misma área en diferentes momentos o desde ángulos ligeramente diferentes, es posible reducir significativamente este efecto mejorando la visibilidad de los detalles (Ferreti et al., 2007).



Figura 2-33: Efecto speckle en una imagen SAR detectada en Italia mediante satélite ERS-2.
Fuente: Ferreti et al., 2007.

2.10.5. Satélite Sentinel-1

En este estudio se utiliza información obtenida mediante los satélites Sentinel-1 mencionados en la sección anterior. Sentinel-1 es una misión de imágenes radar para la observación de la Tierra que consta de los satélites: Sentinel-1A y Sentinel-1B. Estos operan con banda C (Tabla 2-5), proporcionando imágenes continuas en cualquier momento y condición meteorológica (ESA, s.f.-g).

Estos satélites tienen el potencial de capturar imágenes de todas las masas terrestres a nivel global, zonas costeras y rutas marítimas en aguas europeas en alta resolución, y cubre los océanos a intervalos regulares, mediante 4 modos de adquisición exclusivos (Figura 2-34): Stripmap (SM), Interferometric Wide Swath (IW), Extra-Wide Swath (EW) y Wave (WV). Estos modos cambian entre sí dependiendo de las zonas en que se encuentren, sin producir conflictos (ESA, s.f.g).

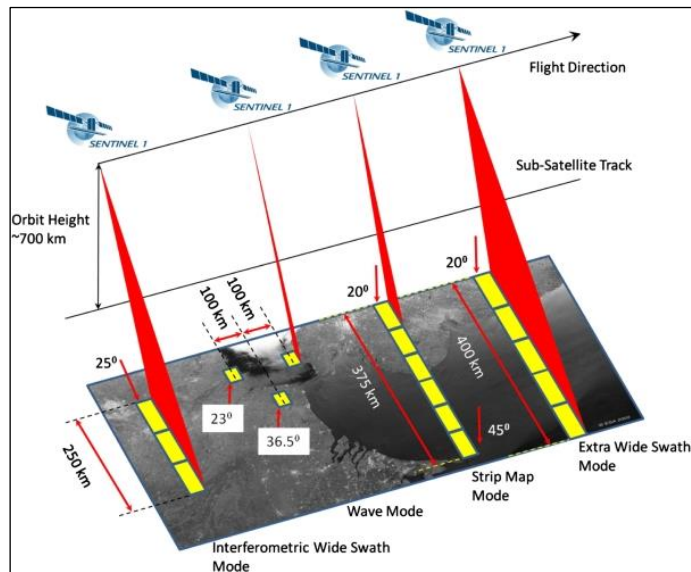


Figura 2-34: Modos de adquisición de Sentinel-1 y sus coberturas. Fuente: ESA, s.f.-1.

El modo operativo predeterminado y principal sobre tierra es el Interferometric Wide Swath (IW) y es el utilizado en este estudio. Este modo de captura satisface la mayoría de los requisitos de servicio actuales, evita conflictos, permite visitar con eficiencia las mismas áreas en múltiples ocasiones, reduce los costos operativos, entre otros (ESA, s.f.-a). Se obtienen tres sub-bandas como se observa en la Figura 2-34 mediante el principio de adquisición de Observación del Terreno con Barridos Progresivos SAR (TOPSAR) (ESA, s.f.; INTA, 2019).

Se pueden obtener distintos tipos de productos, ya sea Single Look Complex (SLC), Ground Range Detected (GRD), Ocean (OCN) y Wave (WV). Se utilizan en este estudio los productos SLC con resoluciones espaciales con el modo IW de 2.7 x 22 m hasta 3.5 x 22 m.

Cada satélite Sentinel-1 está en una órbita cercana al polo, síncrona con el sol, con un ciclo de repetición de 12 días y 175 órbitas por ciclo. Ambos satélites comparten el mismo plano orbital con una diferencia de 180° en la fase orbital. Un solo satélite tiene el potencial de mapear áreas de la Tierra en el modo de franja ancha interferométrica una vez cada 12 días, en un solo paso (ascendente o descendente) (ESA, s.f.-k).

2.11. Interferometría satelital

La interferometría satelital se presenta como una solución eficiente y económica para la vigilancia de áreas extensas de manera frecuente y sin necesidad de personal en terreno, proporcionando datos comparables al monitoreo in situ (STINGS Consortium, 2020).

El enfoque de interferometría abordado en esta tesis se centra en los interferómetros transversales al movimiento. Estos interferómetros están equipados con sensores que comparan la fase de dos imágenes capturadas en diferentes ubicaciones, pero con la misma dirección de vuelo del satélite, como se observa en la Figura 2-35. Sus mediciones, que analizan la variación en el camino de viaje en función de la posición del satélite y el momento de adquisición permiten realizar dos

aplicaciones: la generación del DEM (Figura 2-26) y la medición de deformaciones superficiales milimétricas del terreno (Ferreti et al., 2007; ARSET, 2017b).

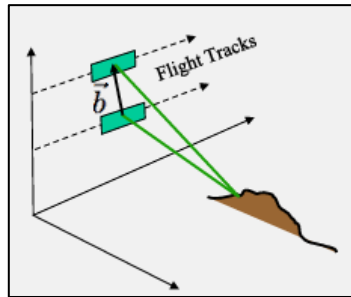


Figura 2-35: Interferómetro transversal al movimiento o Cross-track interferometer. Fuente: ARSET, 2017b.

La interferometría satelital abarca diferentes técnicas, una de ellas es la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y sus variantes. En este capítulo se presentan estas técnicas utilizadas, su precisión y las limitaciones de cada una de ellas.

2.11.1. Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una configuración interferométrica de SAR, que se destaca por su capacidad de realizar mediciones precisas del trayecto de las ondas, especialmente en la determinación de las elevaciones del terreno (ESA, 2014).

Las aplicaciones de InSAR incluyen la creación de modelos de elevación, la evaluación de la acumulación de energía en fallas que pueden producir terremotos, el seguimiento de movimientos y geometría de fallas que se rompen durante terremotos, el estudio de cámaras magmáticas bajo volcanes, la monitorización del movimiento y balance de masa de glaciares, y el estudio de la extracción de agua en acuíferos y campos geotermales, entre otros (Observatorio G-Data, Universidad de Chile, s.f.).

Como se menciona en la Sección 2.10.1 y en la Sección 2.10.2, la fase total de la señal es el número de ciclos ejecutados entre el radar y la superficie, más el componente aleatorio de la superficie (rotación de fase introducida por el objetivo). Este componente aleatorio se compone de un conjunto de distancias radar-objetivo provocados por la topografía, vegetación, entre otros, complicando la interpretación precisa de la fase (ARSET, 2017b).

Dado que este componente aleatorio no puede ser determinado directamente y su valor es desconocido, dependiendo de la estructura del objetivo (distribución de la dispersión en la celda de resolución), InSAR resuelve este problema al medir la diferencia de fases entre dos imágenes (ARSET, 2017b). Esto es lo que se denomina fase interferométrica (Ecuación (4)) entre dos observaciones SAR complejas tomadas desde ubicaciones ligeramente diferentes para obtener información de distancia sobre la superficie terrestre (ESA, s.f.-d; Grunfeld, s.f.).

$$\phi = \psi_2 - \psi_1 = -\frac{4\pi(d_1 - d_2)}{\lambda} + \psi_{target} - \psi_{target} = -\frac{4\pi(d_1 - d_2)}{\lambda} \quad (4)$$

Donde:

ϕ : Fase interferométrica.

ψ_1 : Fase de la adquisición 1.

ψ_2 : Fase de la adquisición 2.

d_1 : Distancia de la adquisición 1.

d_2 : Distancia de la adquisición 2.

λ : Longitud de la señal.

Si los dispersadores cambian entre las dos adquisiciones, el término correspondiente al ψ_{target} en la fase interferométrica no se cancela (Grunfeld, s.f.).

2.11.1.1. Sensibilidad a la topografía

Si se observa el mismo target desde dos posiciones diferentes (Figura 2-36) se puede vincular la fase interferométrica a la altura “z” del target iluminado (asumiendo que la fase de los targets es la misma en ambas adquisiciones).

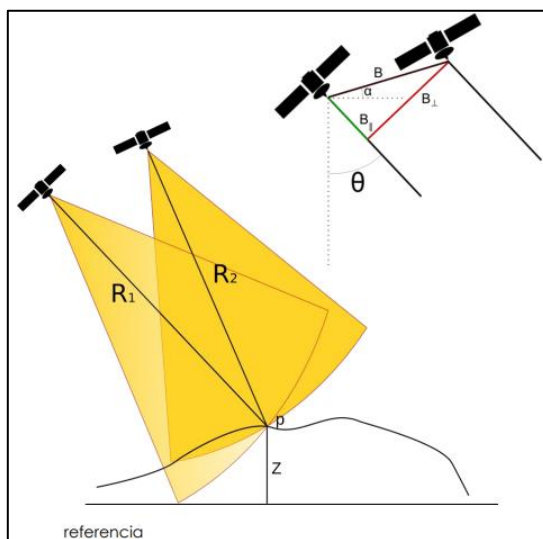


Figura 2-36: Medición de altura “z” de un objetivo con dos adquisiciones con satélite desde dos posiciones diferentes. Fuente: Grunfeld, s.f.

La fase interferométrica se relaciona con la altura z utilizando el parámetro de *baseline* (B). Este corresponde a la distancia entre satélites (Grunfeld, s.f.). La relación se detalla a continuación:

$$\phi = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin\theta} z + \phi_{reference} \quad (5)$$

Donde:

ϕ : Fase interferométrica

z : Altura del target iluminado

θ : Ángulo de incidencia

B_{\perp} : Baseline perpendicular

R_1 : Distancia sensor-objetivo de la primera adquisición.

$\phi_{reference}$: Fase de referencia relativo a la forma de la Tierra.

2.11.1.2. Obtención de interferogramas

Las imágenes SAR requieren ser adquiridas desde la misma órbita y ángulo de incidencia, seguido por el proceso de co-registración. Este procedimiento asegura la alineación de las imágenes, garantizando que los píxeles correspondientes contengan la misma porción del terreno. Se elige una imagen como referencia (imagen principal) y las demás imágenes se muestrean en una misma cuadrícula de coordenadas donde cada celda de resolución se representa con un color que muestra el valor de fase correspondiente (Perissin, 2016).

Al combinar la fase de dos adquisiciones, se puede generar un *interferograma* donde la fase está altamente correlacionada con la topografía del terreno. Si, además, proporcionamos un mapa de fase proporcional a la altitud relativa del terreno, se obtiene un *interferograma aplanado* proporcionando un mapa de fase proporcional a la altitud relativa del terreno.

Dado la naturaleza cíclica de la fase, la diferencia de altitud entre dos adquisiciones puede estar representada por una fracción de ciclo. Para corregir esto, se le asigna los múltiplos de 2π a las franjas interferométricas para obtener una medición continua y no ambigua de la variación de la altitud. Esto se denomina *phase unwrapping* o *desenrollado de fase* (Ferreti et al., 2007). Este es el primer paso para obtener un DEM.

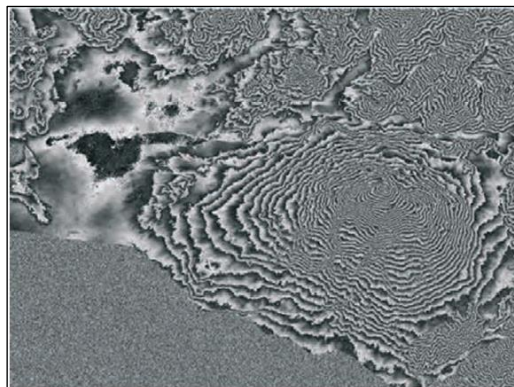


Figura 2-37: Interferograma aplanado del Monte Etna a partir de pares de imágenes ERS.

2.11.2. Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética o DInSAR

Si se consideran adquisiciones en momentos diferentes y se obtienen dos interferogramas aplanados, al calcular la diferencia entre estos interferogramas, se muestran patrones de deformación en la superficie ocurridos entre estas dos fechas de adquisición. Esta técnica se denomina Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) (ESA, s.f.-d).

DInSAR a diferencia de InSAR se emplea para medir desplazamientos del orden de los milímetros dado que la sensibilidad a la deformación es mucho mayor que a la topografía (ESA, 2014; Grunfeld, s.f.).

Si se observa un objetivo en dos tiempos diferentes t_1 y t_2 desde la misma órbita y ángulo de incidencia, es difícil que la segunda adquisición sea medida exactamente en el mismo punto que la primera. Si además se supone que ese objetivo sufre un desplazamiento horizontal, se puede medir el desplazamiento “d”.

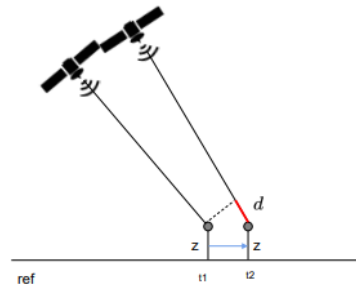


Figura 2-38: Medición del desplazamiento “d” con satélite en distinta posición en t_1 y t_2 . Fuente: Grunfeld, s.f.

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}d - \frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin \theta}z + \phi_{ref} \quad (6)$$

Donde:

ϕ : Fase interferométrica.

d : Desplazamiento en el LOS.

λ : Longitud de onda de la señal

z : Desplazamiento horizontal

θ : Ángulo de incidencia

B_{\perp} : Baseline perpendicular

R_1 : Distancia sensor-objetivo de la primera adquisición.

$\phi_{reference}$: Fase del punto de referencia

El desplazamiento se obtiene restando la contribución de fase debido a la topografía (utilizando un DEM) y la contribución de la fase de referencia debido a la forma de la Tierra con un modelo de elipsoide como WGS84. La técnica SAR solo permite medir desplazamientos en la dirección del slant-range o LOS del satélite. Así que el cambio de fase representa una combinación debido al movimiento de la superficie y a la distancia entre la ubicación del satélite en ambos tiempos.

Cabe destacar que, si bien InSAR y DInSAR son técnicas valiosas para la generación de DEM y monitoreo de desplazamientos, las distorsiones temporales y geométricas pueden influir en la generación de interferogramas volviendo la fase ilegible. La distorsión temporal ocurre cuando hay

una modificación en las características del terreno (forma, material, orientación), y suele ocurrir en la vegetación, pero también en caso de actividades humanas (Perissin, 2016). Además, las diferentes condiciones atmosféricas, especialmente, el vapor de agua retrasa las señales de radar disminuyendo la precisión de la técnica (Perissin, 2016).

Para poder eliminar los efectos de la decorrelación se utiliza un filtrado en los interferogramas, el más ampliamente utilizado es el propuesto por Goldstein y que luego fue modificado por otros autores. En cuanto al retraso atmosférico se han intentado utilizar modelos numéricos en el tiempo, redes GPS que proporcionen mapas de vapor de agua y mitigar los efectos atmosféricos, sin embargo, solo a baja resolución y longitudes de onda espaciales muy largas (Perissin, 2016).

2.11.3. Interferometría de Dispersores Persistentes (PSI)

La Interferometría de Dispersores Persistentes (PSI) es una técnica que surgió a principios de los 2000, en la Politécnica de Milán, y se basa en la idea de que, explotando largas series de imágenes SAR, es posible identificar objetivos que no se vean afectados por distorsiones temporales o geométricas además de poder predecir el retraso atmosférico (Perissin, 2016), limitaciones que afectaban al DInSAR convencional (ESA, s.f.-d).

Las técnicas de PSI pueden superar tales limitaciones al relajar las restricciones habituales de línea de base y tiempo, y maximizar el número de interferogramas utilizables, que luego se pueden utilizar para calcular tendencias promedio a lo largo del tiempo a partir de un extenso historial de interferogramas. Solo se consideran los objetivos con una coherencia lo suficientemente alta, lo que resulta en una menor densidad de píxeles (ESA, s.f.-d).

Esta es una rama de la interferometría que explora dispersores puntuales, con fuerte retrodispersión de radar, en un período largo de tiempo (años) para proporcionar un historial de fase del objetivo puntual a lo largo del tiempo. Los dispersores persistentes pueden ser características pequeñas en la superficie de la Tierra, generalmente edificios, estructuras, postes de luz, etc., que mantienen una correlación muy alta con el tiempo (ESA, s.f.-d).

La estimación de deformaciones para este método se calcula de la siguiente forma, donde se observa que se considera la componente de fase (Lazecky et al, 2013):

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{desplazamiento} + \Delta\phi_{altura} + \Delta\phi_{atmósfera} + \Delta\phi_{ruido} \quad (7)$$

Donde:

$\Delta\phi_{desplazamiento}$: Diferencia de fase causa por un desplazamiento físico en el LOS del satélite.

$\Delta\phi_{altura}$: Diferencia de fase inducida por topografía/elevación de reflectores debido a la posición diferente del satélite durante las adquisiciones.

$\Delta\phi_{atmósfera}$: Diferencia de fase causado por diferentes interferencias en la señal de radar durante la penetración a través de la atmósfera.

$\Delta\phi_{ruido}$: Otras contribuciones, incluyendo imprecisiones de la órbita del satélite, errores de procesamiento o ruido.

La fase interferométrica de la Ecuación (7 no considera el término de terreno plano, ya que este puede ser estimado a partir de datos orbitales y posteriormente eliminado. Por simplicidad, no se tienen en cuenta posibles inexactitudes orbitales. La fase del desplazamiento se calcula asumiendo linealidad en el tiempo, sin embargo, esta suposición no siempre es válida. La fase topográfica se elimina mediante el uso de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Para abordar la fase atmosférica se recurre al procesamiento Atmospheric Phase Screen. Por último, el ruido se estima a partir de los residuos de fase del modelo (Phase residuals), lo cual indica estabilidad y confiabilidad del objetivo (Perissin, 2016)

2.11.3.1. Precisión de la técnica PSI

Para hablar de la precisión de los resultados obtenidos mediante la técnica PSI, se deben tener en cuenta la desviación estándar y coherencia temporal de los resultados obtenidos. Estos entregan la medida de los phase residuals o fase interferométrica después del procesamiento de la información y obtención de deformaciones mediante un software para el procesamiento de datos SAR e InSAR (Perissin, 2018).

La coherencia temporal es el parámetro normalmente utilizado para verificar la precisión de una estimación de series de tiempo InSAR en el dominio complejo, siendo la desviación estándar un parámetro alternativo a este (Perissin, 2011).

El valor de la coherencia temporal del punto p entrega la confiabilidad de la estimación o que tan cercano a la realidad es el modelo procesado. Se toma en cuenta las imágenes i y k con objetivo el punto p y punto de referencia p_0 . La *fase interferométrica* del objetivo p depende de la geometría del área, del desplazamiento, perturbaciones atmosféricas y el ruido (Perissin, 2011).

Esto se muestra en la siguiente ecuación (Perissin, 2011):

$$\hat{\xi}_p = \max(|\xi_p|) \quad (8)$$

$$\xi_p = \frac{1}{M} \sum_{(i,k)} e^{j(\Delta\phi_p^{i,k} - \Delta\phi_{H,p}^{i,k} - \Delta\phi_{D,p}^{i,k})} \quad (9)$$

Donde:

$\Delta\phi_p^{i,k}$ es la fase interferométrica (compensada con los términos estimados en el procesamiento de los datos).

$\Delta\phi_{H,p}^{i,k}$ es el término dependiente de la altura del objetivo p .

$\Delta\phi_{D,p}^{i,k}$ es el término dependiente de la velocidad de deformación del objetivo p .

M : Número de pares i, k .

El término de la *fase interferométrica* del objetivo p de la Ecuación (9) depende de la geometría del área, del desplazamiento, perturbaciones atmosféricas y el ruido. Los últimos dos términos de

esta ecuación se pueden expresar de la siguiente forma (considerando un modelo de velocidad lineal) (Perissin, 2011):

$$\Delta\phi_{H,p}^{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{R \sin \theta} \Delta h_{p,p_0} B_n^{i,k} \quad (10)$$

$$\Delta\phi_{D,p}^{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta v_{p,p_0} B_t^{i,k} \quad (11)$$

Donde:

$\Delta h_{p,p_0}$: Altura del objetivo p.

$\Delta v_{p,p_0}$: Velocidad de deformación del objetivo p.

$B_n^{i,k}$: Baseline normal interferométrico.

$B_t^{i,k}$: Baseline temporal.

θ : Ángulo de incidencia.

λ : Longitud de onda.

R : Distancia desde el sensor al objetivo.

De esta forma, para calcular la coherencia temporal y obtener la precisión de los resultados se necesita observar los resultados desde distintas perspectivas de espacio y tiempo. Según lo observado en la Ecuación (9), la coherencia temporal se ve afectada por el número de interferogramas generados, de la fase interferométrica (geometría del área, desplazamiento, perturbaciones atmosféricas y el ruido) y de la geometría del sistema SAR (baselines, parámetros de la señal).

Cuando el modelo de deformaciones coincide con la fase observada la coherencia temporal tiende a 1. Por el contrario, si el modelo no coincide con la fase observada la coherencia temporal muestra valores bajos. En caso de que las tendencias de desplazamientos no fueran lineales y no están correlacionadas con la temperatura, un buen modelo a utilizar es una aproximación polinómica que considere aceleración, aunque también es posible analizar series temporales sin la necesidad de modelos (Perissin, 2016).

Número de interferogramas: Un bajo número de interferogramas (y, por lo tanto, número de adquisiciones) provoca valores altos de coherencia, pero dificultad en distinguir entre puntos estables y con ruido (Perissin, 2016).

Por otro lado, bajo número de interferogramas en un período corto o bajo baseline temporal, provoca una alta coherencia. Con esta misma cantidad de interferogramas en un período largo, hay mayor decorrelación del terreno y perturbaciones atmosféricas que afecten el proceso de APS.

Fase interferométrica: Su confiabilidad puede ser medida con la medición de la coherencia espacial γ , una baja coherencia espacial indica *decorrelación de fase*, lo que significa que se tiene una fase ruidosa y poco confiable (Perissin, 2016).

Factores que afectan la fase interferométrica, son errores orbitales, atmosféricos y ruido.

Cuando dos imágenes SAR interferométricas no son simultáneas, el camino de viaje de la radiación para cada una puede verse afectado de manera diferente por la atmósfera. En particular, las diferencias en la humedad, temperatura y presión atmosférica entre las dos tomas tendrán una consecuencia visible en la fase interferométrica. Este efecto generalmente se limita a una fase interferométrica peak a peak de 2 a lo largo de la imagen con una variabilidad espacial suave. El impacto de dicha contribución afecta tanto a la altitud (especialmente en el caso de líneas de base pequeñas) como a las mediciones de deformación del terreno (Ferreti et al., 2007).

2.11.3.2. Deformaciones medidas y método de doble geometría

Como se menciona anteriormente es posible medir deformaciones superficiales sólo en la dirección del satélite o LOS, esto significa que solo se pueden medir deformaciones que indican acercamiento o distanciamiento hacia el satélite.

En la literatura se han descrito diversos métodos de descomposición 3D a partir de órbitas ascendentes y descendentes. Cuando se dispone de datos de las órbitas ascendente y descendente, es posible obtener componentes verticales y horizontales de este a oeste (Pawluszek et al., 2020). El método de doble geometría permite descomponer las deformaciones en la dirección del LOS en las componentes vertical y horizontal (esta únicamente en la dirección Este-Oeste).

Richter y otros (2018), mencionan como utilizar las deformaciones en LOS ascendentes y descendente, para obtener los desplazamientos en la dirección vertical y horizontal.

$$dv = \frac{d_{LOS}^A * \sin(\theta_D) + d_{LOS}^D * \sin(\theta_A)}{\sin(\theta_A + \theta_D)} \quad (12)$$

$$de = \frac{d_{LOS}^A * \cos(\theta_D) - d_{LOS}^D * \cos(\theta_A)}{\sin(\theta_A + \theta_D)} \quad (13)$$

Donde

dv : desplazamiento vertical

de : desplazamiento horizontal este-oeste

d_{LOS}^A : velocidad de desplazamiento LOS promediada en el tiempo en ascendente.

d_{LOS}^D : velocidad de desplazamiento LOS promediada en el tiempo en descendente.

θ_A : Ángulo de incidencia ascendente.

θ_D : Ángulo de incidencia descendente.

InSAR tiene una deformación máxima de medición, por lo cual, las imágenes que se utilicen deben ser en períodos de tiempo cortos. El límite de deformación de la interferometría satelital se puede calcular de forma teórica multiplicando la longitud de onda por el número de imágenes dividido por 4.

2.12. Software SARPROZ

En la actualidad, existen diferentes herramientas de software disponibles para aplicar técnicas de InSAR de imágenes múltiples. En esta tesis, se utiliza SARPROZ, un software desarrollado por Daniele Perissin.

SARPROZ (Perissin, 2011) es un software versátil para el procesamiento de datos SAR e InSAR. Programado en Matlab, ofrece formas sencillas de ampliar la biblioteca existente de funciones. Al mismo tiempo, se basa en interfaces gráficas y se puede utilizar sin conocimientos de programación. La herramienta implementa diversos tipos de técnicas como InSAR, DInSAR, PSI y cualquier tipo de combinación interferométrica multi-máster y apilamiento (Perissin, 2012).

En la Figura 2-39 se muestran las velocidades verticales y Este-Oeste en orden de mm/año medidas con SARPROZ un caso de un depósito localizado en el Río Tigris, en Iraq. Este estudio muestra el proceso continuo de desestabilización de esta presa.

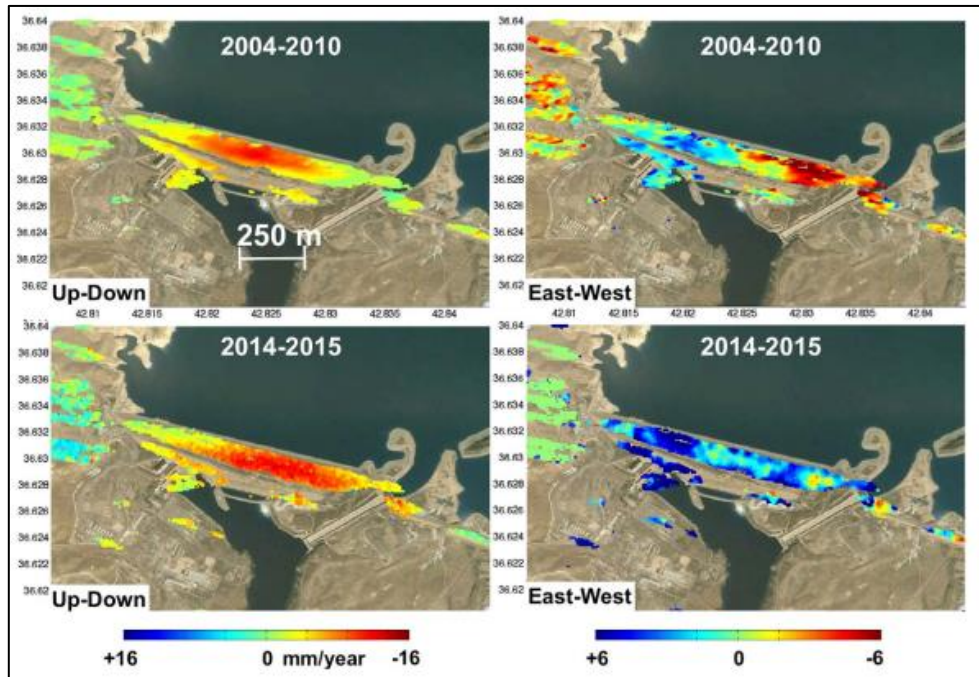


Figura 2-39: Caso de estudio: The Mosul Dam: Deformaciones verticales y E-O con software SARPROZ. Fuente: Milillo, 2016.

Este software ha sido ampliamente por la comunidad científica para el procesamiento y análisis de datos SAR, en campos tales como la geología, monitorización de infraestructuras, gestión de desastre naturales y estudio de procesos geofísicos.

Como se menciona anteriormente, con SARPROZ se puede realizar la técnica PSI que considera extraer la fase atmosférica de la fase interferométrica. Esta técnica como se menciona en la Sección 2.11.3, permite obtener mejor coherencia que otras técnicas multitemporales. De esta forma, se pueden obtener deformaciones con precisión milimétrica.

SARPROZ cuenta con varias ventanas con funciones (Perissin, 2011):

- *DataSet Selection*: Dentro de esta ventana, se puede seleccionar el conjunto de datos a procesar.
- *DataSet Description*: Dentro de esta ventana, se puede visualizar los parámetros principales del conjunto de datos.
- *Site Processing*: Dentro de esta ventana, se puede elegir entre varias operaciones para realizar en el conjunto de datos importados (Figura 2-40)
- *Small Area Processing*: Dentro de esta ventana se inicia una sesión de procesamiento independiente. Aquí se procesan áreas pequeñas para analizarlas en detalle o probar diferentes técnicas.

En la se observan las aplicaciones que tiene el software SARPROZ para la data importada.



Figura 2-40: Site processing de SARPROZ. Fuente: Perissin, 2011.

3 Metodología de trabajo

La metodología de este estudio se divide en siete etapas o pasos como se muestra en la Figura 3-1. Si bien algunos de estos pasos representan principalmente aportes al Proyecto FONDEF (2022), cada uno de ellos son necesarios para la ejecución de este estudio y, por consecuencia, para poder cumplir los objetivos de esta tesis.

De esta manera, se observa que los pasos 1, 2 y 3 contribuyen directamente a los objetivos específicos del Proyecto FONDEF (2022), ya que se centran en la selección de depósitos pilotos, la elaboración de un catastro de estos y la definición de variables de monitoreo a medir en función de sus características. No obstante, estos pasos son esenciales para poder desarrollar los pasos 4, 5, 6 y 7. Estos están enfocados en el propósito del estudio.

En el paso 1, se seleccionan los depósitos de relaves pilotos para el Proyecto FONDEF (2022) y los criterios utilizados para dicha selección. En el paso 2, se recopila información de cada uno de estos depósitos y se elabora para un catastro de estos depósitos que sirve como línea base para el monitoreo remoto de la estabilidad física de las estructuras. En el paso 3, se detalla la definición de variables de monitoreo para estos depósitos.

En el paso 4, se seleccionan los depósitos a analizar y la deformación superficial como la variable a medir. En el paso 5, se miden estas deformaciones utilizando la técnica interferometría satelital a través del software SARPROZ mencionado en la Sección 2.12. En el paso 6, se estiman las deformaciones por compresión secundaria en estos depósitos. Cabe mencionar que el paso 5 y 6 se realizan de forma paralela.

Se realiza una comparación entre las deformaciones medidas con interferometría y las estimadas mediante la compresión secundaria o creep. El propósito principal es determinar si la herramienta es útil para medir deformaciones dentro de lo esperado y se proponen fenómenos que podrían provocar estas deformaciones

Una vez completado este análisis, en el paso 7, se evalúa la condición de estabilidad de los depósitos en función de las variaciones de las deformaciones medidas y la diferencia entre ellas a lo largo del tiempo.

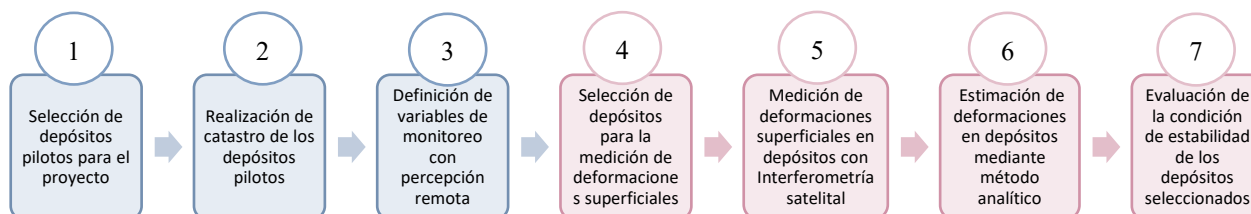


Figura 3-1: Metodología de tesis. Los pasos en azul (1, 2 y 3) se enfocan en los depósitos pilotos para el proyecto (13 depósitos). Los pasos en rojo (4, 5, 6 y 7) se enfocan en los depósitos seleccionados para el estudio de deformaciones (5 depósitos). Fuente: Elaboración propia.

3.1. Selección de depósitos pilotos para el proyecto

La selección de los depósitos sujetos a análisis fue un proceso colaborativo entre Sernageomin, la Subsecretaría de Minería y el equipo de investigación de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile como parte del Proyecto FONDEF (2022).

Los criterios de selección establecidos son los siguientes:

1. Superficie del depósito: Se escogen depósitos con superficies mayores a 2 há.
2. Estado de los depósitos: Se escogen depósitos inactivos o abandonados.
3. Exposición del depósito a las personas: Se consideran aquellos depósitos más cercanos a las poblaciones.
4. Exposición a infraestructura crítica en caso de colapso: Se consideran aquellos depósitos más cercanos a infraestructuras críticas.
5. Exposición del depósito al medio ambiente: Se considera el impacto potencial de la instalación en el entorno natural, incluyendo cursos de agua, quebradas, flora y fauna.
6. Inclusión en el Plan Nacional de Relaves encabezado por el Ministerio de Minería (2019): Se tiene en cuenta aquellos que se encuentren en el Plan Nacional de relaves.
7. Tipo de instalación: Se otorga prioridad a los tranques de relaves como primera opción y a los embalses de relaves como segunda opción.
8. Método de construcción: Se da prioridad a los depósitos construidos mediante el método de aguas arriba, mientras que las estructuras sin información sobre el método de construcción o de método desconocido se consideraron como segunda opción.

Los depósitos seleccionados pueden ser encontrados en el Catastro de Depósitos de Relaves en Chile de Sernageomin (2022) bajo los nombres de “Pajonales”, “San Miguel 2 (Ex – Andacollo 2)”, “San Miguel 6 (Ex – Andacollo 6)”, “Tranque 4”, “Desconocido”, “Farah 1-2-3-4-5-6-7”, “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Bodega Alto”, “Depósito de relave 3”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “La Africana 1-2”.

3.2. Realización de catastro de los depósitos pilotos

Se planea la elaboración de un catastro de depósitos destinado a resumir la información disponible hasta la fecha de los depósitos pilotos. Este catastro debe tener la capacidad de poder incorporar características de nuevos depósitos en el futuro, permitiendo así gestionar un registro completo de toda la información disponible en una única plataforma.

Es importante destacar que la condición de inactivos y abandonados, así como su antigüedad, dificultan la búsqueda de información, ya sea debido a la falta de información como a la dispersión de la información en diversos documentos.

Este catastro se elabora en Power BI. Esta plataforma es una colección de servicios de software, aplicaciones y conectores que funcionan conjuntamente para convertir orígenes de datos sin relación entre sí, es información coherente, interactiva y atractiva visualmente (Microsoft, 2023). En el contexto de la creación del catastro de depósitos, se pueden almacenar datos para poder ser visualizados de manera gráfica y amigable mediante la incorporación de objetos visuales y sintetizando la información provista.

En primer lugar, para la creación del catastro se debe revisar y recopilar los antecedentes en una hoja de cálculo de Excel. La revisión de antecedentes incluye la consulta de diversos recursos, como informes de visitas técnicas realizadas entre 2015 y 2016, fotografías de campo tomadas en estas visitas, el Catastro de Depósitos de Relaves proporcionado por Sernageomin en 2022, tres levantamientos catastrales de depósitos de relaves por Sernageomin (1989, 1990a y 1990b), imágenes satelitales obtenidas de Google Earth, actas de inspección y fiscalización, entre otros. Cabe mencionar que todos estos datos son proporcionados por el Sernageomin.

Posteriormente, este catastro en Excel se traslada a la plataforma Sharepoint, un servicio basado en la nube, hospedado por Microsoft para la gestión de documentos y trabajo en equipo. A través de esta plataforma es posible almacenar información, compartirla con otras personas y a su vez crear una conexión de estos datos con Power BI. Esto facilita la actualización automática de datos entre ambas plataformas y, además, permite la integración de nuevos depósitos al catastro y modificación de información.

Posteriormente, en PowerBI se crea un panel de visualización o dashboard mediante el uso de objetos interactivos que manejan la información disponible, permitiendo acceder a la información de manera más rápida e intuitiva.

3.3. Definición de variables de monitoreo con percepción remota

Considerando los depósitos de relaves inactivos y abandonados seleccionados, sus características, el impacto en su entorno y sus modos de fallas, se proponen las variables de medición con percepción remota o teledetección que son medibles como parte del Proyecto FONDEF (2022) y este estudio.

En particular se consideran aquellas variables medibles principalmente con las técnicas de medición óptica e interferometría satelital, y que son indicadores claves anticipatorios de los modos de fallas probables en estos depósitos de relaves, mencionados en la Sección 2.6.

3.4. Selección de depósitos para la medición de deformaciones superficiales

Se escogen cinco depósitos de relaves de los previamente seleccionados como pilotos para el Proyecto FONDEF (2022), para desarrollar los objetivos de este estudio.

Los criterios de selección de los depósitos son los siguientes:

1. Mayor cantidad de información: Se da preferencia a aquellos depósitos de los cuales se tenga más información.
2. Densidad de depósitos: Se da preferencia a los depósitos ubicados en áreas con alta densidad de depósitos.
3. Área del depósito: Se da preferencia a depósitos más grandes.
4. Cercanía a zonas urbanas: Se da preferencia a aquellos más cercanos a la población.
5. Proximidad espacial: Se da preferencia a depósitos que están más cerca entre sí, para optimizar la eficiencia en la recopilación de datos y permitir la captura de múltiples depósitos en una sola imagen de radar SAR.

6. Estado inactivo y abandonado: Se da preferencia a seleccionar depósitos que sean inactivos y abandonados, y no solo un tipo.

Los depósitos seleccionados son “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “Desconocido”. Los primeros cuatro depósitos son escogidos por encontrarse en la zona con la segunda zona con más densidad de depósitos como lo es la Región de Atacama (esto se detalla en el Capítulo 1), por ser depósitos de gran área, por estar muy cerca de zonas urbanas, y que se encuentran a muy cercana proximidad. Los depósitos Santa Laura se encuentran a 50 metros aproximadamente entre sí y los depósitos Ojancos se encuentran a 200 metros aproximadamente. A su vez, los depósitos Santa Laura están a menos de 5 km de los depósitos Ojancos.

Además, se cuenta con la información del plan de cierre de los depósitos “Ojancos 1” y “Ojancos 2” (CMC Sali Hochschild, 2009).

El depósito de nombre “Desconocido” se escoge por ser el único depósito abandonado de los depósitos pilotos del proyecto, además, por encontrarse en la zona con la mayor densidad de depósitos como lo es la Región de Coquimbo (esto se detalla en el Capítulo 1) y por estar cerca de la zona urbana.

La variable seleccionada para el monitoreo en este estudio es la deformación superficial. Esta elección se fundamenta en la aplicación del método de interferometría satelital, una técnica detallada en la Sección 2.11, no invasiva, que permite medir variaciones de deformación en la superficie terrestre a lo largo del tiempo.

3.5. Medición de deformaciones superficiales en depósitos con interferometría satelital

Se desea medir deformaciones superficiales LOS y verticales mediante la técnica PSI de interferometría satelital en los cinco depósitos de estudio escogidos en el paso anterior y generar un documento de Power BI de visualización de las deformaciones con énfasis en el coronamiento de cada depósito.

Para ello, se decide utilizar el software SARPROZ, una herramienta versátil que implementa un amplio rango de técnicas de procesamiento SAR. En este estudio se utiliza la técnica multi-temporal PSI mencionada en la Sección 2.11.3.

La metodología para la obtención de deformaciones contempla la selección de datos, la importación y preparación de datos, la estimación del APS, el análisis multi-temporal, la entrega de resultados (deformaciones en LOS y deformaciones verticales) y la visualización de datos.

Dado que también se desean obtener deformaciones verticales a partir de las deformaciones LOS, se debe obtener y procesar imágenes SAR de órbita ascendente y órbita descendente para cada depósito.

Para esta metodología se utilizan diferentes programas. En la selección de datos, se utiliza Google Earth para establecer las áreas a analizar. Para la importación de datos, estimación del APS, el

análisis multi-temporal y entrega de resultados, se utiliza SARPROZ, siguiendo la metodología explicada por Qin (2018). Por último, para la visualización de los resultados de manera gráfica se utiliza Power BI.

A continuación, se detalla el procedimiento de la técnica PSI mediante el software SARPROZ para la obtención de deformaciones superficiales sobre el coronamiento de cada depósito

3.5.1. Selección de datos

Para la selección de datos, se debe tener en cuenta las dos zonas donde se ubican los depósitos a analizar y se trazan polígonos en Google Earth que abarquen los depósitos en cuestión (Figura 3-2).

Además de las áreas, se debe tener en cuenta entre que fechas se mide deformación. El año 2021 posee datos tanto para trayectorias ascendentes como descendentes que al ser combinadas permiten obtener las deformaciones verticales superficiales.

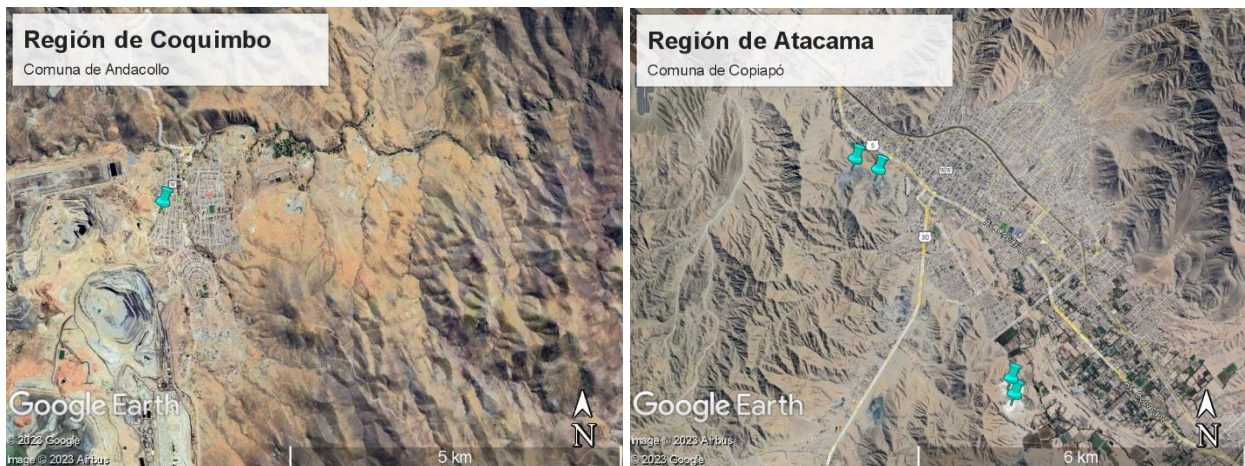


Figura 3-2: Áreas seleccionada para los cinco depósitos de estudio. Fuente: Google Earth.

Se importan los polígonos de las áreas en la página web ASF Data Search (<https://search.asf.alaska.edu/#/>).

Se descarga para cada zona entre 25-30 imágenes SLC ascendentes y 25-30 imágenes SLC descendentes entre enero de 2021 a diciembre de 2021. Estas imágenes se almacenan en una carpeta. Las imágenes deben ser de modo IW, de tipo SLC de Nivel 1, clase estándar, y polarización dual (VV+VH), aunque solo se utiliza el modo VV.

El número de imágenes utilizado se ve limitado por la capacidad del equipo utilizado para el procesamiento ya que cada imagen tiene un peso de 4 GB.

3.5.2. Importar los datos y selección de área de análisis

Estas imágenes se cargan al software SARPROZ, donde se utiliza la técnica PSI de interferometría satelital, la cual se detalla en la Sección 2.11.3 del Capítulo 2 de esta tesis.

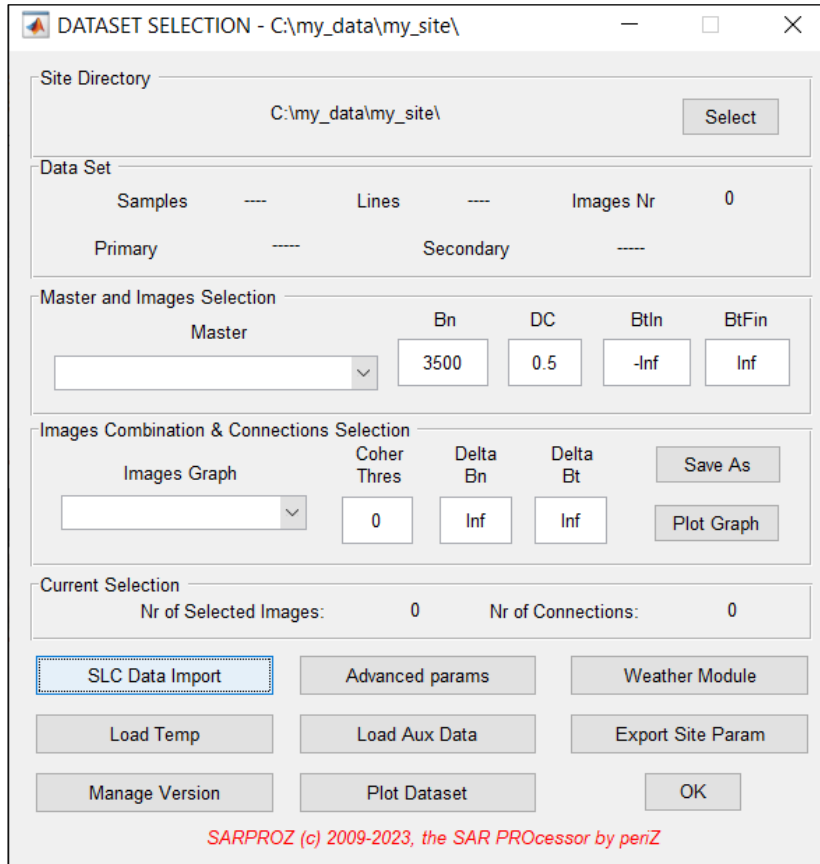


Figura 3-3: Software SARPROZ. Se selecciona carpeta de origen de las imágenes. Fuente: SARPROZ.

Para la importación de los datos, de deben procesar los datos en la ventana “SLC DATA processing” de SARPROZ (Figura 3-4). El software extrae los datos y comienza la selección de parámetros de procesamiento de los datos.

Se escoge para el procesamiento la polarización VV tal como se muestra en la Figura 3-4. Dado que la información obtenida se hace mediante el modo IW de Sentinel-1, se tienen 3 franjas de las cuales se escoge el aquella donde se encuentra el área de interés (Figura 3-2). Posteriormente, se selecciona el área específica que se quiere medir insertando la longitud y latitud de una coordenada central del área y seleccionando el radio.

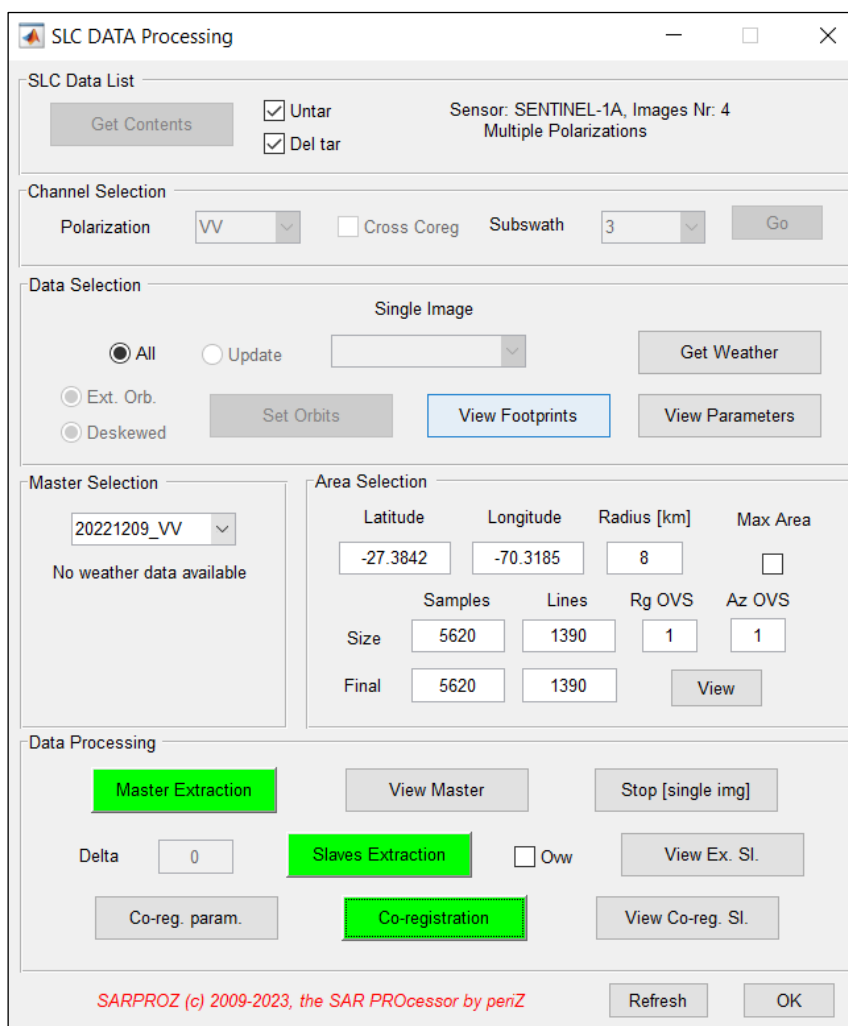


Figura 3-4: Selección del área y corrección de imágenes. Fuente: SARPROZ.

El programa selecciona una imagen SAR como primaria, esta se selecciona según la combinación de imágenes que se quiere realizar y es la que se utiliza como referencia para medir las deformaciones.

Se debe hacer el co-registro de imágenes utilizando la combinación STAR (Figura 3-5). Esta combinación considera una imagen primaria de referencia y la cual se vincula con cada una de las imágenes secundarias. Para este caso es recomendable utilizar una imagen primaria a la mitad del período escogido y cercano a las demás adquisiciones para poder disminuir los efectos de los baselines o líneas base temporal y normal ya que cuanto mayor es la línea de base, mayor es el impacto de la decorrelación o distorsión (Perissin, 2012).

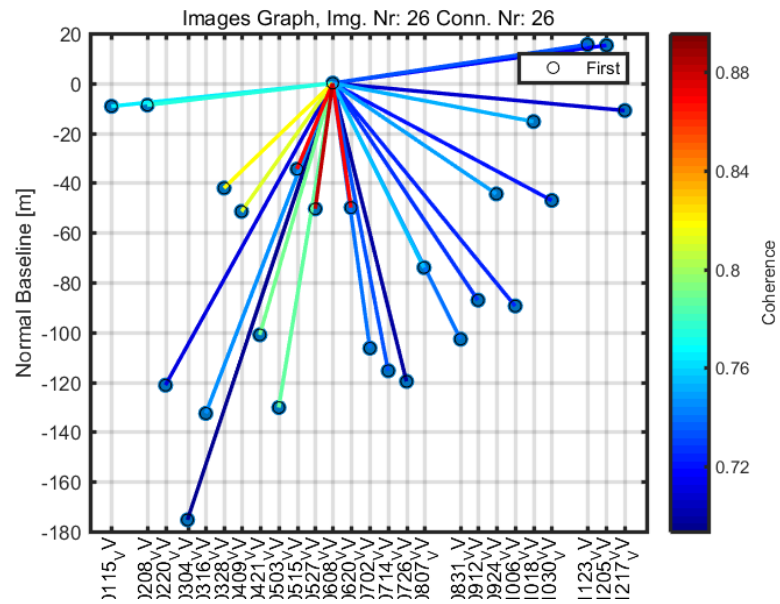


Figura 3-5: Combinación STAR entre imágenes SAR. A la derecha se observa la coherencia temporal entre imágenes secundarias con la imagen primaria. Fuente: SARPROZ.

Después de estos pasos, el software genera el mapa de reflectividad o reflectante que muestra el índice de estabilidad de amplitud en coordenadas de samples (slant-range) y line (azimut).

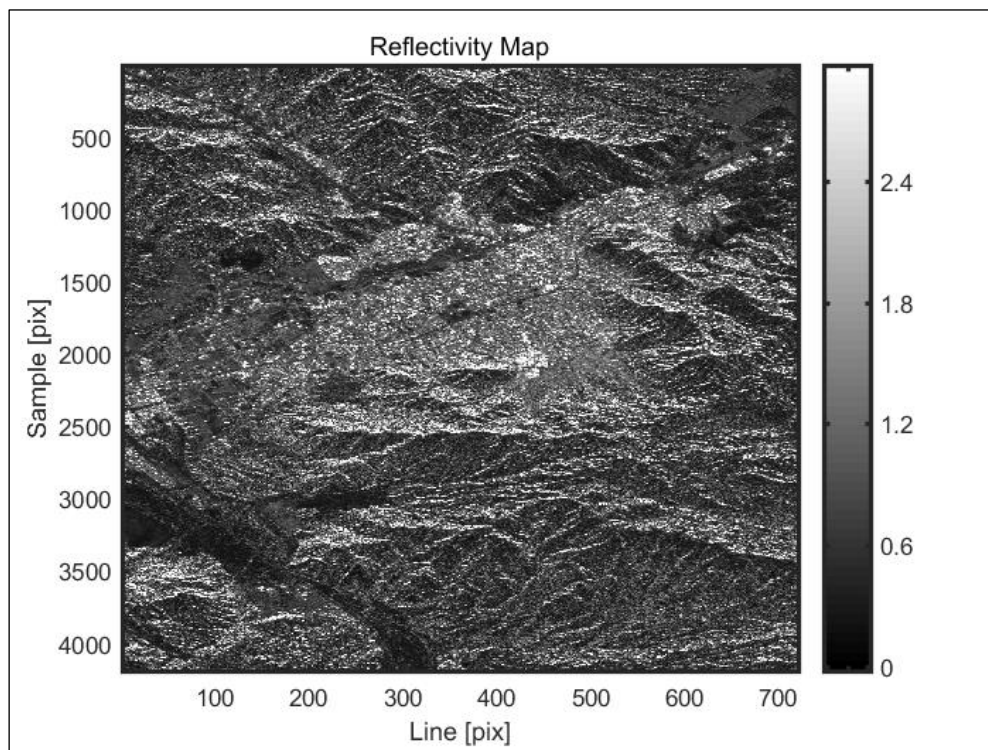


Figura 3-6: Ejemplo mapa reflectante del área seleccionada. Fuente: SARPROZ.

Se puede continuar procesando esta área, o escoger una más específica. En este estudio, se selecciona un área que abarca específicamente el depósito a analizar para poder enfocar el análisis en la estructura.

3.5.3. Eliminación de la fase topográfica

Posterior a la selección del área se utiliza un DEM, para la eliminación de la fase topográfica. Se utiliza para el procesamiento el External DEM SRTM90 que está por defecto en el software y el cual posee una resolución de 90 metros.

3.5.4. Selección de GCP

Se selecciona el Ground Control Point (GCP) (Figura 3-7). Este debe ser un punto estable en el tiempo, como puede ser el centro de una estructura o un elemento muy reflectante, y que esté lejos de zonas donde haya mucha deformación (como podría ser una zona donde se encuentre agua o haya un depósito de relaves en operación) (Lazecky, 2013). Este además debe poseer un índice de estabilidad de amplitud y reflectividad muy altos, es decir, cercanos a 1.

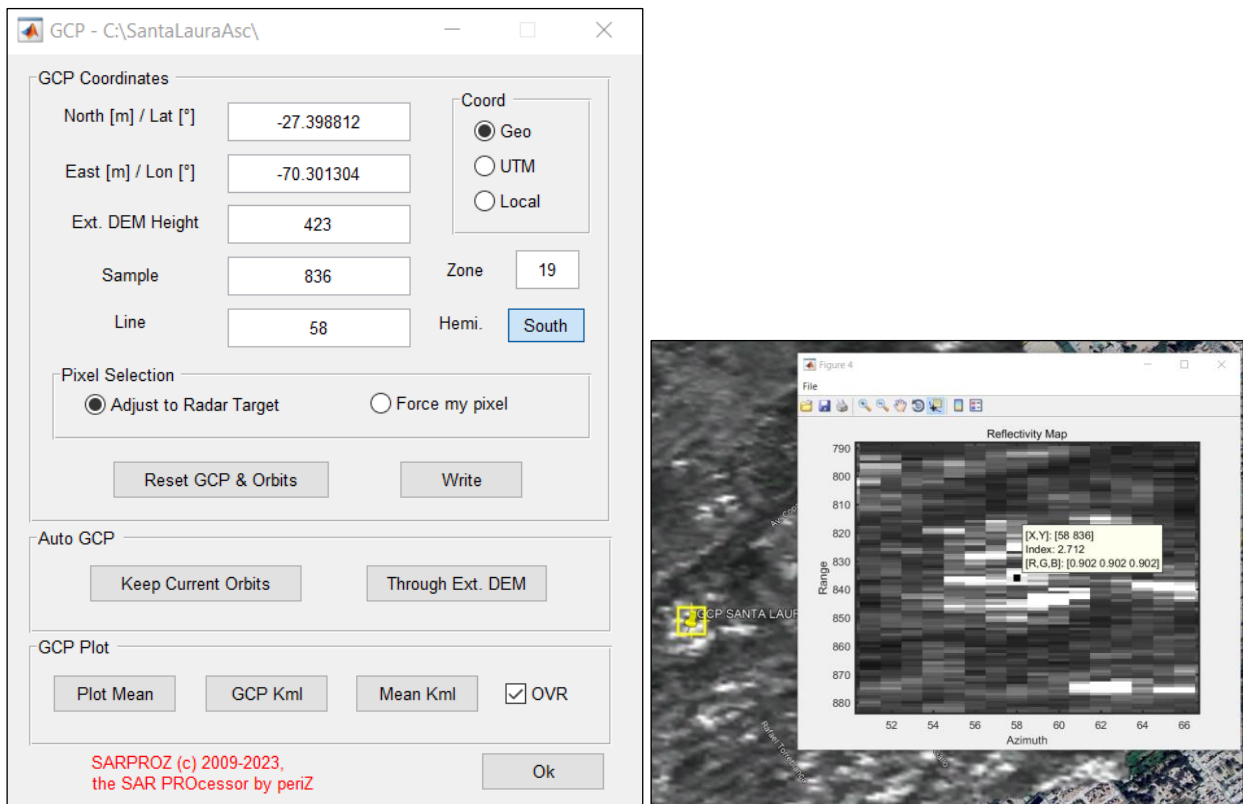


Figura 3-7: Ejemplo de selección de GCP, en este caso, se selecciona el techo de una estructura.
Fuente: SARPROZ.

3.5.5. Obtención de interferogramas

Se obtienen los interferogramas e interferogramas desenrollados, donde se utiliza la configuración de la Figura 3-8. Según se observa se puede aplicar el filtro Goldstein para la eliminación de ruido o distorsiones en el interferograma.

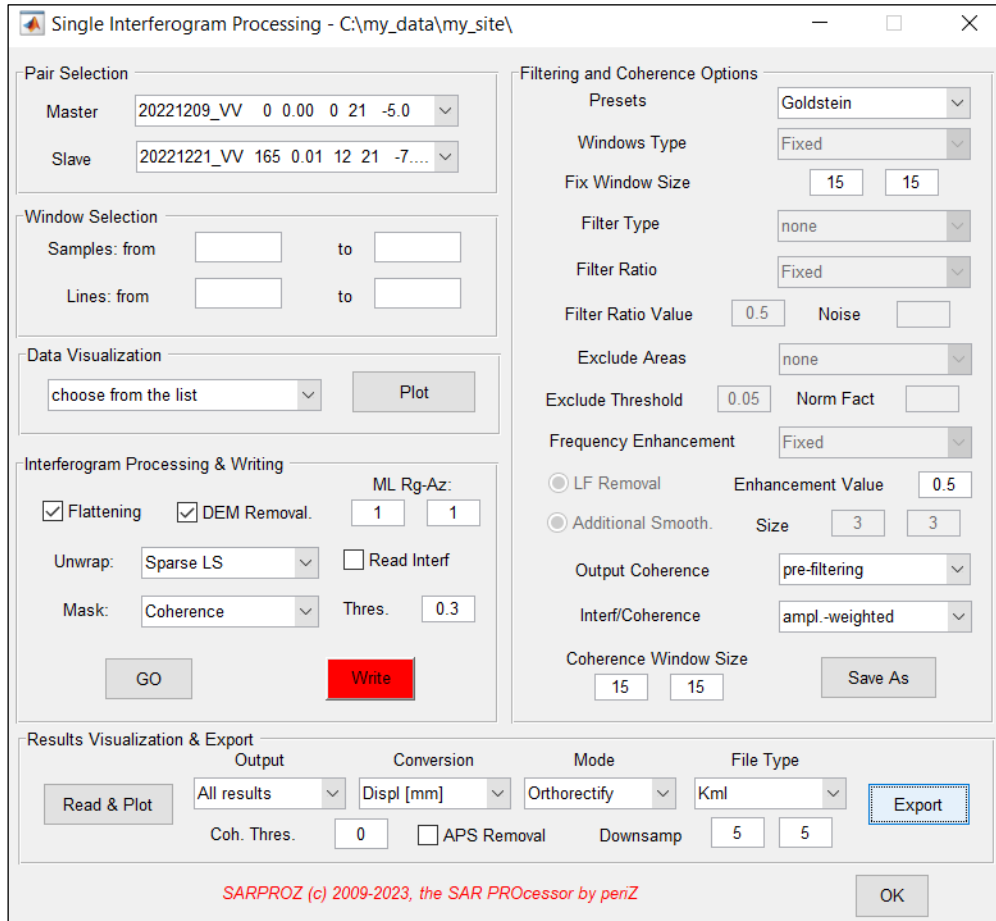


Figura 3-8: Parámetros utilizados para la obtención de interferogramas. Fuente: SARPROZ.

3.5.6. Eliminación de la fase atmosférica o APS

La estimación de la fase atmosférica se realiza para un conjunto de píxeles dispersados en la imagen SAR (sparse points). Estos píxeles deben tener un alto índice de estabilidad de amplitud (ASI), en este caso se realiza un filtro de píxeles con ASI mayor a 0.7, tomando en consideración tener píxeles sobre el depósito de relaves analizado.

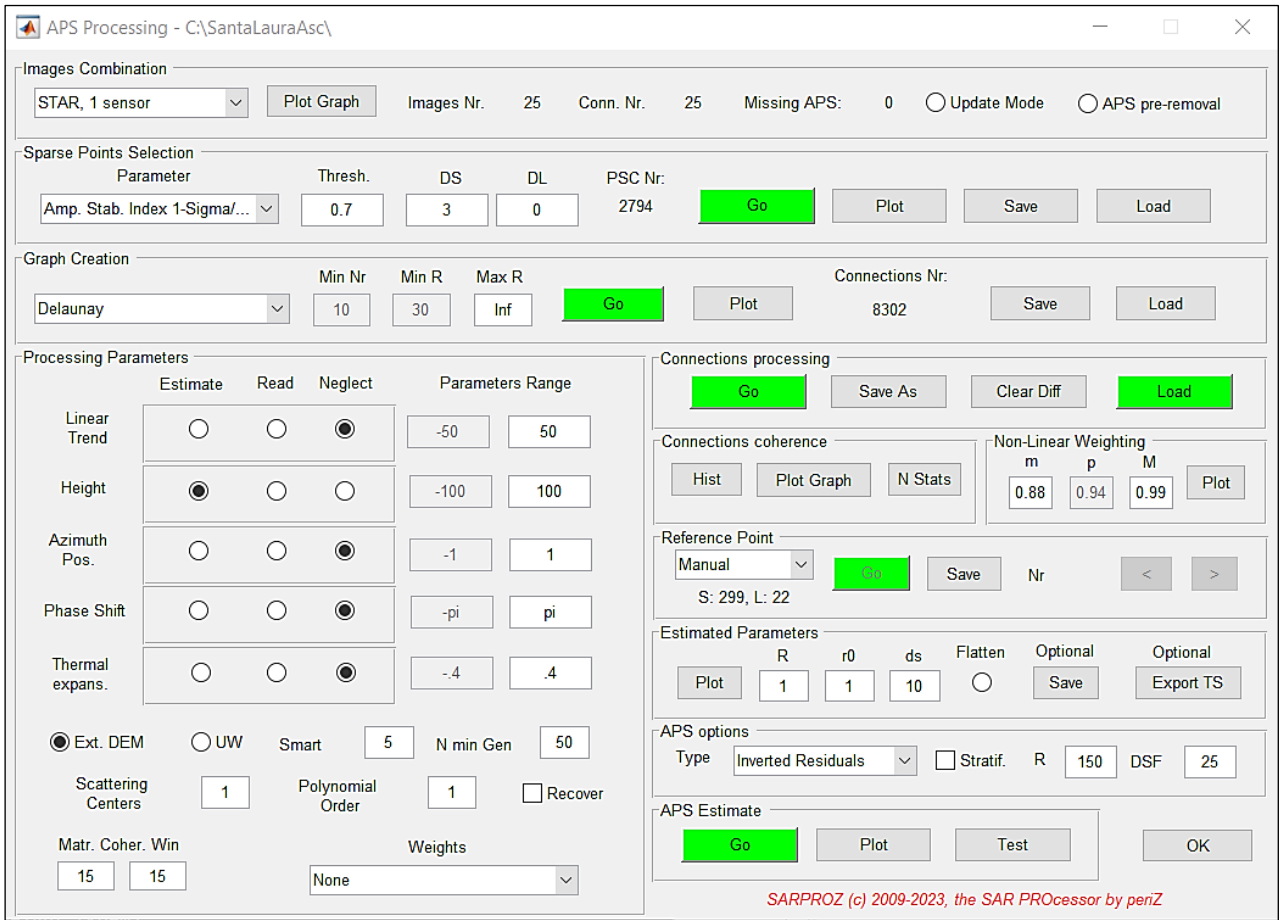


Figura 3-9: Ejemplo de estimación de la fase atmosférica o APS. Fuente: SARPROZ.

Se muestra un ejemplo de cómo se visualiza la fase atmosférica extraída para una adquisición en la Figura 3-10.

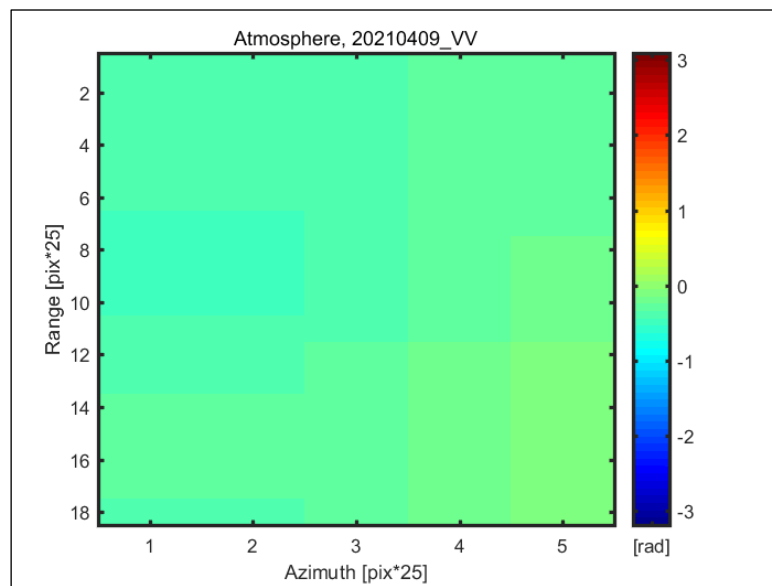


Figura 3-10: Ejemplo de fase atmosférica estimada (APS). Fuente: SARPROZ.

3.5.7. Análisis multi-temporal y eliminación de los residuos de fase

Se seleccionan los pixeles donde se miden las deformaciones con el análisis multi-temporal. Estos pixeles o puntos deben tener un ASI preferentemente mayor a 0.7 para tener mayor coherencia temporal en los datos, sin embargo, cuando se observan pocos puntos con esta condición sobre el depósito se usa un filtro de ASI mayor a 0.6 y así se tienen más puntos.

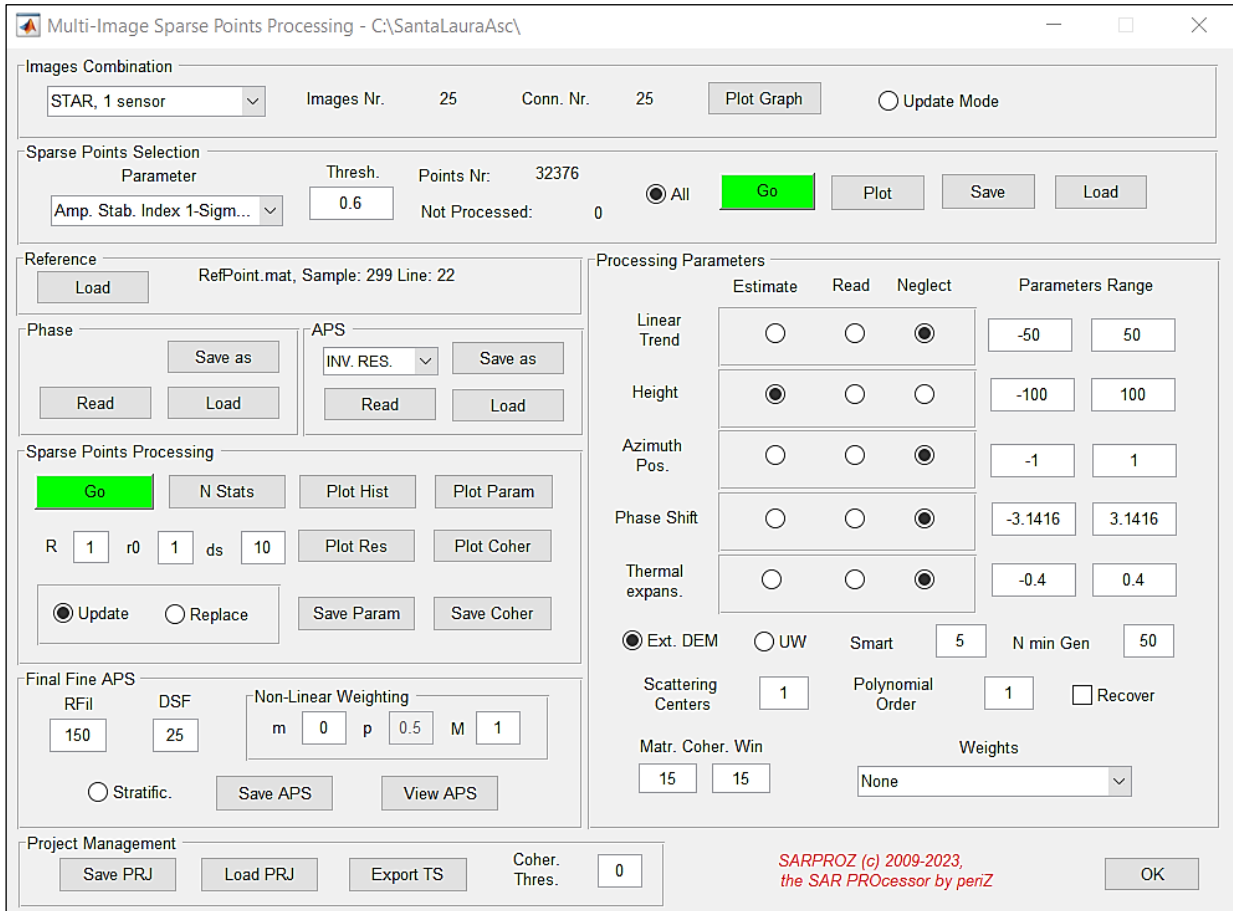


Figura 3-11: Ventana de análisis multi-temporal de SARPROZ. Fuente: SARPROZ.

De la Figura 3-11, se observa que el procedimiento utilizado en este estudio será considerando un modelo de deformación no lineal, es decir, que considere las posibles aceleraciones que pudieran aparecer.

En la Figura 3-12, se muestra cómo se obtiene la fase residual o ruido producto del análisis multitemporal para una adquisición en particular. Esta es después extraída de los resultados para obtener coherencias temporales mayores.

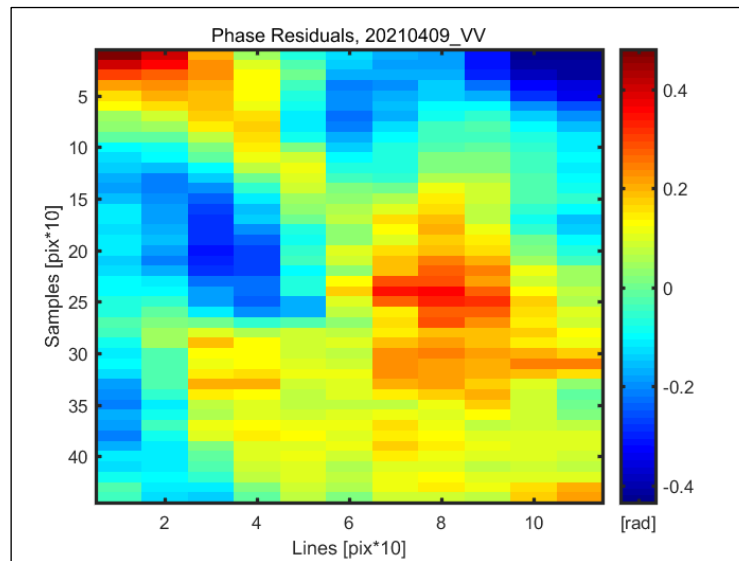


Figura 3-12: Ejemplo de fase residual extraída de las deformaciones. Fuente: SARPROZ.

La elección de los sparse points es importante para poder tener la suficiente cantidad de puntos en las áreas que uno desea, en este caso, en el coronamiento, y a su vez, estos puntos deben ser poseer un alto índice de estabilidad de amplitud (ASI) y con ello poder asegurar una alta coherencia en los resultados.

3.5.8. Obtención de deformaciones LOS y verticales, y visualización de resultados.

Las deformaciones LOS se extraen mediante un archivo CSV de Excel. Una vez obtenidos tanto deformaciones superficiales ascendentes como deformaciones superficiales descendentes, se puede obtener las deformaciones verticales utilizando la Ecuación (12) y deformaciones horizontales Este-Oeste con la Ecuación (13). Para ello, además de necesitar la deformación ascendente y descendente se necesita el valor de los ángulos de incidencia.

Sin embargo, para este estudio se utiliza el software SARPROZ capaz de combinar ambas deformaciones LOS de forma automática para obtener deformaciones verticales y Este-Oeste.

Las medidas de las deformaciones se importan al software Power BI que permite visualizar los datos en un mapa y graficar las deformaciones para su posterior interpretación. Cabe destacar que se filtran aquellos puntos con coherencia mayor a 0.8 para tener resultados más precisos. De esta forma, se logra generar un documento de visualización de deformaciones superficiales LOS y verticales para cada uno de los depósitos.

Para la interpretación de los resultados, los desplazamientos LOS negativos son desplazamientos de alejamiento al satélite, y los desplazamientos LOS positivos son desplazamientos de acercamiento al satélite. Los desplazamientos verticales negativos corresponden a hundimientos y los desplazamientos verticales positivos a alzamientos.

3.5.9. Precisión de los resultados

La precisión de los valores de deformación obtenidos se define con la coherencia temporal y desviación estándar (ambos son equivalentes) como se explica en la sección 2.11.3.1. SARPROZ calcula la coherencia temporal en cada uno de los procedimientos realizados, obteniendo un valor de coherencia temporal y desviación estándar final.

La coherencia temporal, depende de varios factores que deben ser analizados. El número de imágenes utilizadas, el tamaño de baseline o línea base normal y temporal, la fase interferométrica, y también el ruido. Esto se detalla mejor en la sección 2.11.3.1.

3.6. Estimación de deformaciones en depósitos mediante método analítico

Se realiza un estudio analítico de las deformaciones superficiales en la sección más alta de los muros de los cinco depósitos de relaves de estudio escogidos en el Paso 4. Se desea estimar la variación en deformación a comienzos y finales del año 2021, en la sección más elevada del muro de los depósitos para así comparar esta diferencia con la deformación calculada mediante el método interferométrico.

Dado que los depósitos inactivos y abandonados no presentan cargas externas, solo por peso propio, se descarta que estas estructuras puedan deformarse instantáneamente. Además, la composición de los muros de los depósitos es de material grueso por lo que se descarta la consolidación primaria. La deformación a medir es por compresión secundaria o creep.

A continuación, se señalan las consideraciones tomadas para la estimación de deformaciones por compresión secundaria.

La Ecuación (1) permite medir la compresión secundaria hasta un tiempo t teniendo en cuenta la altura del muro inicial H_0 , el tiempo cuando finaliza la consolidación primaria t_p , el coeficiente de compresión secundaria C_α y el índice de vacíos al finalizar la consolidación primaria e_p .

Se considera que t_p es la fecha cuando el depósito deja de operar pues ya no recibe fuerzas externas y solo hay cargas en el muro por peso propio. Este valor se calcula como la diferencia entre la fecha de inicio de sus operaciones y su cierre. El rango de fechas se obtiene de la información recopilada en el Catastro de Depósitos, en particular, en Sernageomin (1989, 1990a, 1990b) y en el Plan de Cierre de Ojancos (CMC Sali Hochschild, 2009).

La altura de muro H_0 corresponde a la altura máxima medida cuando deja de operar el depósito. Estos se obtienen del Plan de Cierre de Ojancos (CMC Sali Hochschild, 2009) o se utilizan las alturas actuales en caso de no tener información.

Para conocer el coeficiente de compresión secundaria y el índice de vacíos se hace necesario conocer el tipo de suelo que componen estos muros y realizar ensayos triaxiales o ensayos edométricos a carga constante y variable según corresponda para poder obtener la curva de consolidación.

Gracias a la información obtenida en el Catastro de depósitos realizado en el Paso 2 de esta metodología, se sabe que el tipo de suelo que componen los muros de estos depósitos es de arenas y ripios.

Dado que no se han hecho ensayos triaxiales y edométricos para muestras de muro en estos depósitos, se debe revisar estudios donde se estime el coeficiente de deformación secundaria e índice de vacíos para suelos arenosos y ripios.

3.6.1. Muros de suelo arenoso

Se utilizan los resultados obtenidos por Osses (2019) de ensayos edométricos (Figura 3-13) realizados en muestras de arenas de la comuna de Colina. Las muestras de arenas experimentaron el fenómeno de creep y por ello pueden servir para este estudio.

En los resultados (Figura 3-13) se observa como el coeficiente de deformación secundaria varía dependiendo de la presión vertical. El término Ψ corresponde a la succión de la muestra. Esta propiedad del suelo no es considerada para el estudio (Quiroz, 2021).

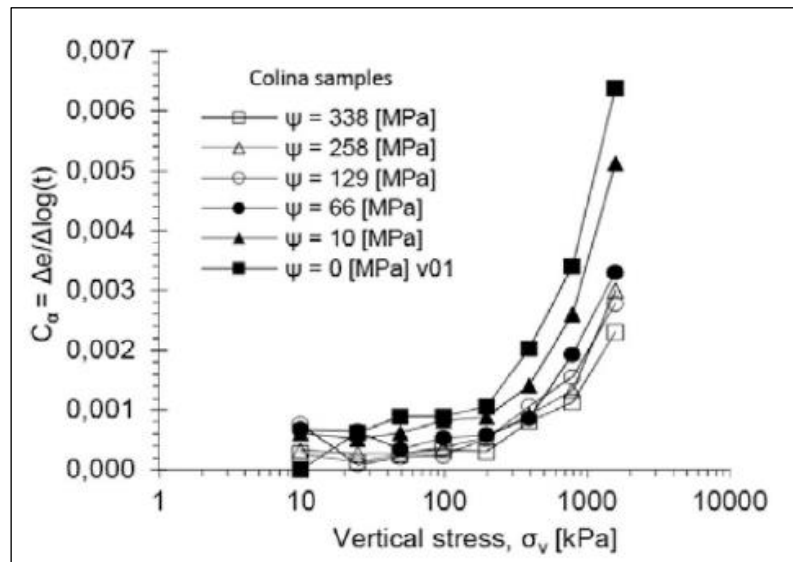


Figura 3-13: Variación del índice C_α según presión vertical. Fuente: Osses, 2019.

Para el estudio, se realiza una estimación aproximada de la presión vertical de los muros de un depósito de relaves y se estima que el coeficiente de deformación secundaria es aproximadamente de 0.001 considerando los resultados de la muestra sin succión.

Para estimar el índice de vacíos inicial de la curva de compresión secundaria, se utiliza los resultados de los ensayos edométricos en arenas de relaves de Chile realizados por Carmi (2013) (Figura 3-14). En la leyenda de la figura se observa que hay muestras con porcentaje de finos del 55% y del 33%.

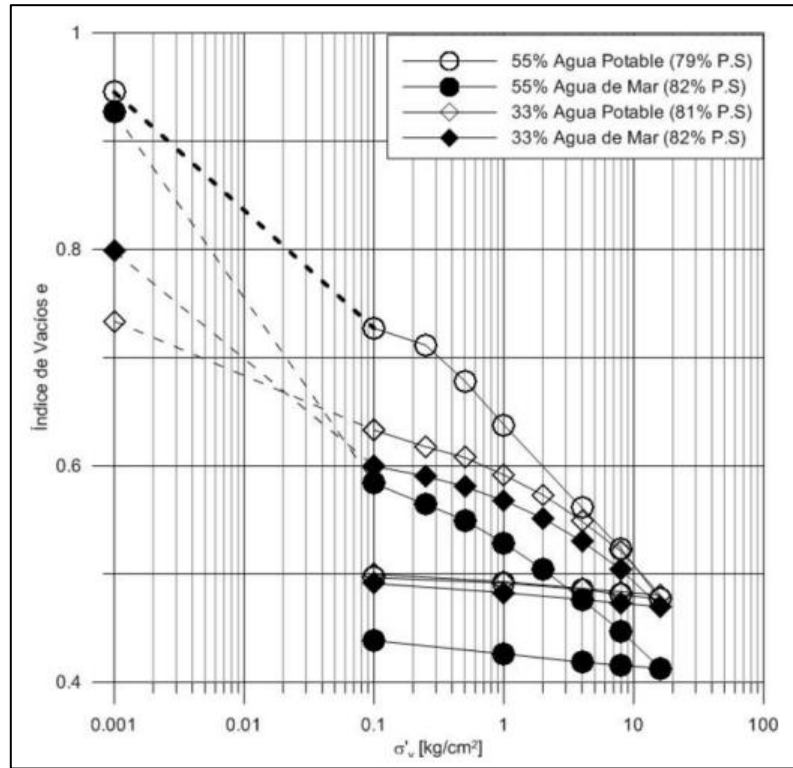


Figura 3-14: Ensayos edométricos de arenas de relaves. Fuente: Carmi, 2013.

En la Figura 3-14, se observa el punto en la curva donde la mayoría de las muestras de suelo comienzan la deformación por compresión secundaria obteniendo un índice de vacíos inicial de 0.48.

3.6.2. Muros de ripios

Para estimar el índice de vacíos inicial de la curva de compresión secundaria, se utiliza los resultados de los ensayos edométricos en ripios realizados por Wachtendorff (2015) (Figura 3-15).

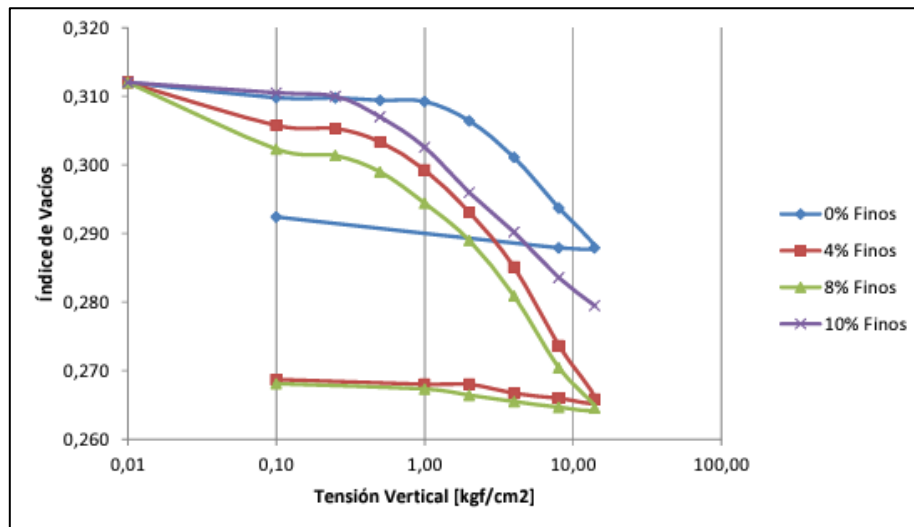


Figura 3-15: Ensayos edométricos en ripios. Fuente: Wachtendorff, 2015.

Los ensayos edométricos fueron realizados en el Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) para material proveniente de pilas de lixiviación y sometidos al chancado, extracción por solventes y electro obtención (Wachtendorff, 2015).

Se escogen las curvas de 4% y 8% de finos, y se utiliza entonces un índice de vacíos inicial de e_0 de 0.265.

El ensayo edométrico para suelos más gruesos se debe realizar con máquinas triaxiales gigantes, las cuales son escasas en el mundo y además no pueden ser utilizadas por tiempos prolongados. En este contexto, los valores de coeficiente de deformación secundaria C_α en materiales gruesos chilenos no ha sido definida, pero se tiene en consideración que su valor es menor que en arenas y suelos finos (Garlanger, 1972). Para este estudio se decide usar la misma constante que en arenas.

3.7. Evaluación de la condición de estabilidad de los depósitos

La evaluación de la condición de estabilidad de los depósitos para este estudio consiste en el análisis de las variaciones de deformaciones en el coronamiento obtenidas mediante interferometría satelital a lo largo del año 2021.

En específico, se desea comparar las magnitudes de las variaciones de deformaciones entre pares de adquisición. Este análisis si bien no establece la condición de estabilidad de los depósitos es un indicador que puede evidenciar posibles inestabilidades.

De este modo, si las variaciones de deformación se mantienen constantes o disminuyen, este es un indicador de estabilidad en el muro. En cambio, si se observan variaciones de deformaciones que aumentan a lo largo del tiempo, este podría ser un indicador de inestabilidad.

4 Proyecto FONDEF (2022): Selección de depósitos de relaves y variables de monitoreo

Este capítulo se divide en dos secciones: Los depósitos de relaves seleccionados y sus variables de monitoreo. En la primera parte, se detallan los depósitos de relaves seleccionados para el proyecto FONDEF (2022) siguiendo los criterios establecidos en la Sección 3.1. En la segunda parte, se proponen variables de monitoreo según las características de los depósitos, el impacto que tienen en su entorno y los mecanismos de falla que estos pueden presentar impactando en su estabilidad física (Sección 2.6).

Los depósitos inactivos y abandonados seleccionados tienen el propósito de establecer una línea base para el monitoreo remoto en este tipo de estructuras. Se desea identificar sus características fundamentales para poder establecer las variables de monitoreo a considerar con técnicas de medición remota.

4.1. Depósitos de relaves pilotos

En esta sección se mencionan los 13 depósitos seleccionados para el proyecto y se realizó una breve descripción de cada uno de ellos.

La información es obtenida de Catastro de Depósitos de Relaves de Sernageomin (2022), informes de visitas técnicas realizadas entre 2015 y 2016 proporcionados por Sernageomin e imágenes satelitales obtenidas de Google Earth. También se revisaron levantamientos catastrales de depósitos de relaves, Sernageomin (1989, 1990a y 1990b), y Plan de Cierre de Ojancos (Compañía Minera y Comercial Sali Hochschild [CMC Sali Hochschild S.A.], 2009). Además, en caso de no existir información respecto a alguna dimensión del depósito, estas se estimaron con fotografías de las visitas a terreno o se midieron utilizando Google Earth.

En cuanto a su ubicación, cinco de ellos se encuentran en la Región de Coquimbo, siete en la Región de Atacama y uno en la Región Metropolitana. Además, 12 de ellos se encuentra en estado inactivo y el depósito restante en estado abandonado.

Cabe mencionar que hay cierta contradicción entre las fuentes utilizadas respecto a la composición de los muros que permita clasificarlos en tranques o embalses (Sección 2.4.2). En particular, se menciona en el Catastro de Depósitos de Relaves de Sernageomin (2022) y Sernageomin (1989, 1990a y 1990b) que todos los muros de los depósitos están compuestos por arenas de relaves, sin embargo, para los depósitos “Ojancos 1” y “Depósito de relaves 3” se menciona en el Plan de Cierre de Ojancos (CMC Sali Hochschild S.A, 2009) que están compuestos por material de empréstito. Se toma en cuenta para este estudio que todos corresponden a tranques de relaves a excepción de “Ojancos 1” y “Depósito de relaves 3” que corresponden a embalses.

4.1.1. Depósito Pajonales

El depósito de relaves “Pajonales” (Figura 4-1) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Coquimbo, comuna de La Serena (referencia en coordenadas S 6.685.306 E 294.174). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena Pajonales de la Planta Pajonales, la cual procesaba principalmente cobre y de forma secundaria plata. El depósito cubre un área de 4,1 hás. Las dimensiones del depósito no se encuentran reportadas. Sin embargo, mediante fotos, se estimó que el muro tiene una altura máxima actual inferior a 10 m con un ángulo de talud de aguas abajo irregular, pero de máximo 30°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.

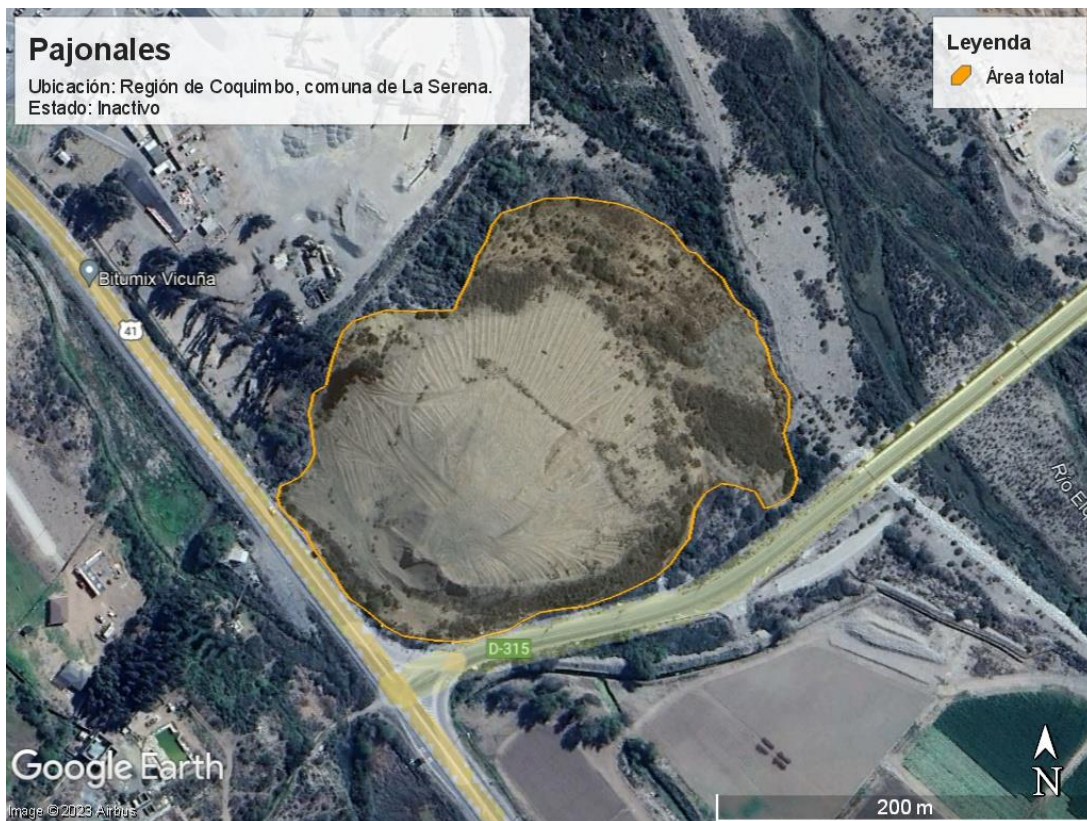


Figura 4-1: Depósito de relaves inactivo “Pajonales”. Fuente: Google Earth.

4.1.2. Depósito “San Miguel 2 (Ex - Andacollo 2)”

El depósito de relaves “San Miguel 2” (Figura 4-2) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Coquimbo, comuna de Andacollo (referencia en coordenadas UTM S 6.653.560 E 301.062). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena San Miguel (Ex Andacollo) de la Sociedad Minera San Miguel, la cual procesaba principalmente oro. El depósito cubre un área de 2,44 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 5 m con un ángulo de talud de aguas abajo que se estimó mediante fotos de terreno de 40°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.

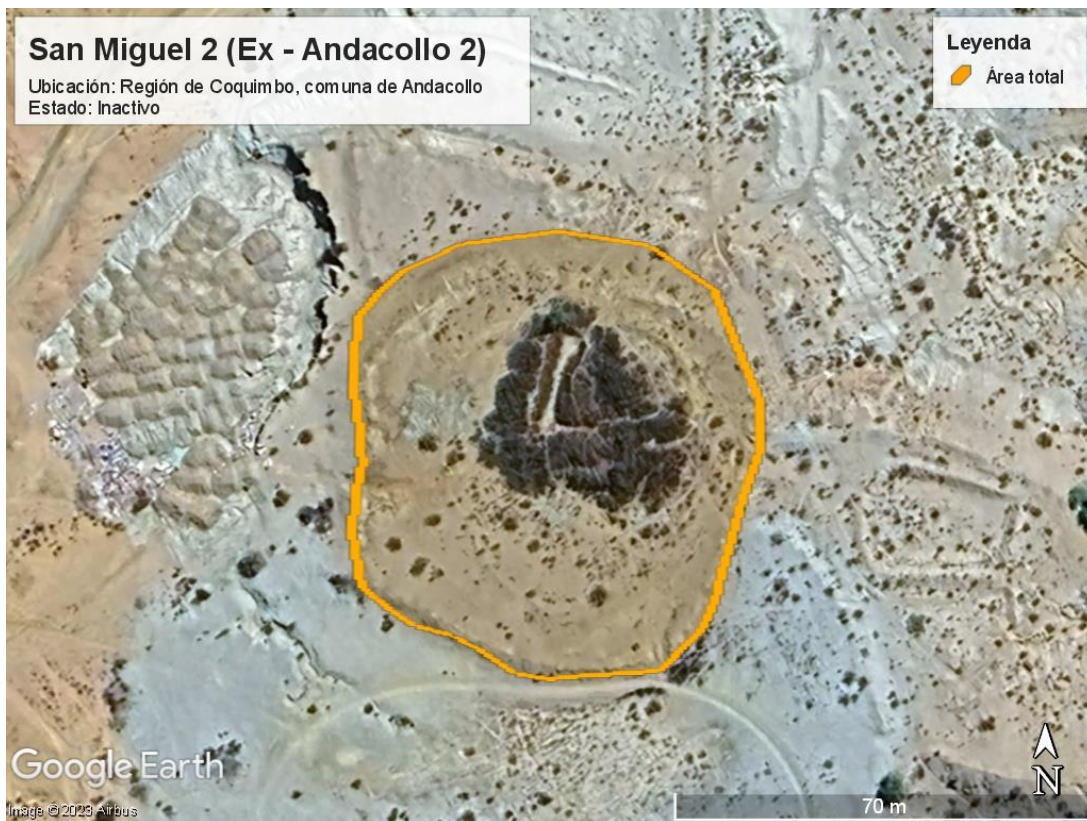


Figura 4-2: Depósito de relaves inactivo “San Miguel 2 (Ex – Andacollo 2)”. Fuente: Google Earth.

4.1.3. Depósito San Miguel 6 (Ex – Andacollo 6)

El depósito de relaves “San Miguel 6” (Figura 4-3) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Coquimbo, comuna de Andacollo (referencia en coordenadas UTM S 6.653.570 E 301.221). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena San Miguel (Ex Andacollo) de la Sociedad Minera San Miguel, la cual procesaba principalmente oro. El depósito cubre un área de 2,84 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 15 m con un ángulo de talud de aguas abajo que se estimó mediante fotos de terreno entre 30° y 40°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.

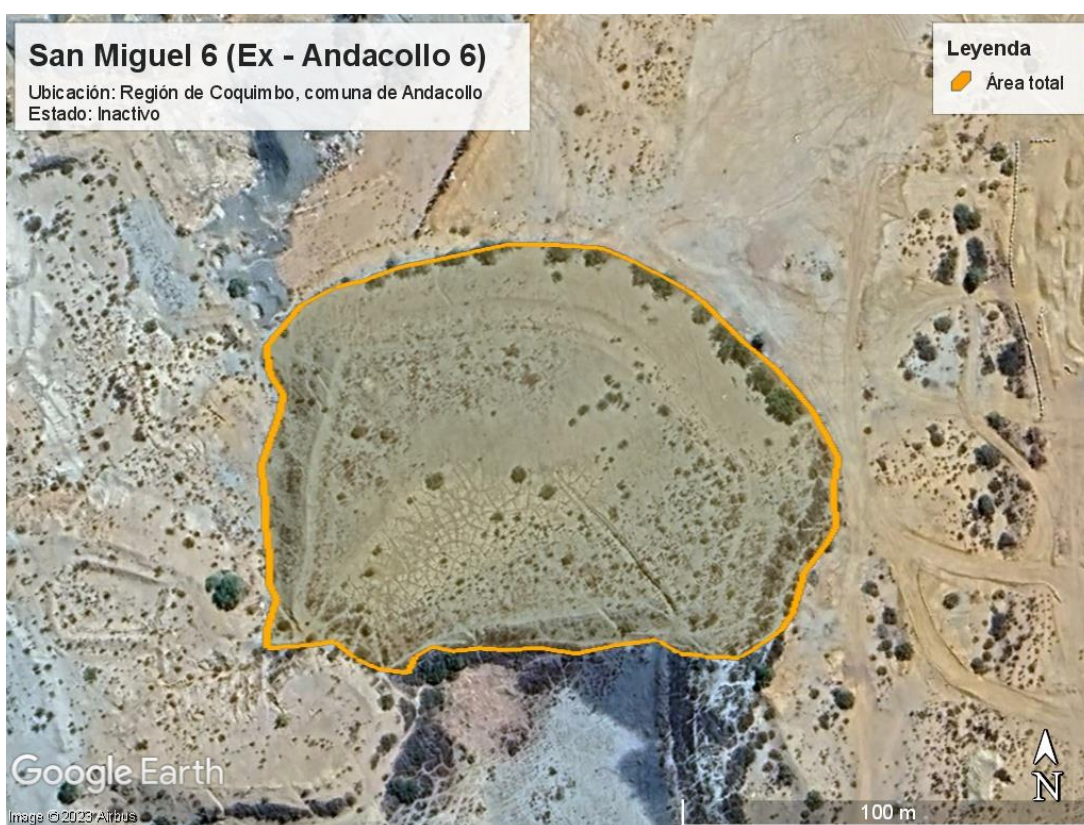


Figura 4-3: Depósito de relaves inactivo “San Miguel 6 (Ex – Andacollo 6)”. Fuente: Google Earth.

4.1.4. Depósito Tranque 4

El depósito de relaves “Tranque 4” (Figura 4-4) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Coquimbo, comuna de Andacollo (referencia en coordenadas UTM S 6.651.572 E 299.834). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena Planta Miranda, la cual procesaba principalmente oro. El depósito cubre un área de 2,06 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 4 m con un ángulo de talud de aguas abajo de 40°. Su coronamiento posee un ancho menor a 2 m y largo de 200 m, aproximadamente.



Figura 4-4: Depósito de relaves inactivo “Tranque 4”. Fuente: Google Earth.

4.1.5. Depósito “Desconocido”

El depósito de relaves de nombre “Desconocido”, de ahora en adelante denominado “Depósito Desconocido” (Figura 4-5) se encuentra en estado abandonado y se ubica en la Región de Coquimbo, comuna de Andacollo (referencia en coordenadas UTM S 6.653.413 E 299.072). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas abajo y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves. Su faena y empresa constructora se desconoce, pero se sabe que procesaba principalmente oro. El depósito cubre un área de 2,01 há. El muro tiene una altura máxima actual de 4 m con un ángulo de talud de aguas abajo que se estimó mediante fotos de terreno entre 40° y 45°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.



Figura 4-5: Depósito de relaves abandonado “Desconocido”. Fuente: Google Earth.

4.1.6. Depósito “Farah 1-2-3-4-5-6-7”

El depósito de relaves “Farah 1-2-3-4-5-6-7” (Figura 4-6) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.967.802 E 366.906). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas abajo y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la Planta Farah de OP Mining Chile S.P.A la cual procesaba cobre, oro y hierro. El depósito cubre un área de 7,97 há. El muro tiene una altura máxima actual de 4 m con un ángulo del talud de aguas abajo que se estimó mediante fotos de terreno de 30°. Su coronamiento es de un ancho menor a 2 m y largo de 400 m, aproximadamente.



Figura 4-6: Depósito de relaves inactivo “Farah 1-2-3-4-5-6-7”. Fuente: Google Earth.

4.1.7. Depósito “Ojancos 1”

El depósito de relaves “Ojancos 1” (Figura 4-7) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.972.041 E 366.892). Este depósito estuvo en servicio desde los años treinta hasta 1970, el muro de este depósito fue construido con un prisma de empréstito, recibiendo rios de lixiviación de oro y cobre, y relaves, por mediante del método de aguas arriba. Dada la composición del muro, se trata de un embalse de relaves perteneciente a la faena Ojancos de la empresa CMC Sali Hochschild S.A. la cual procesaba principalmente cobre. El depósito cubre un área de 5,2 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 30 m con un ángulo de talud de aguas abajo de 20°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.

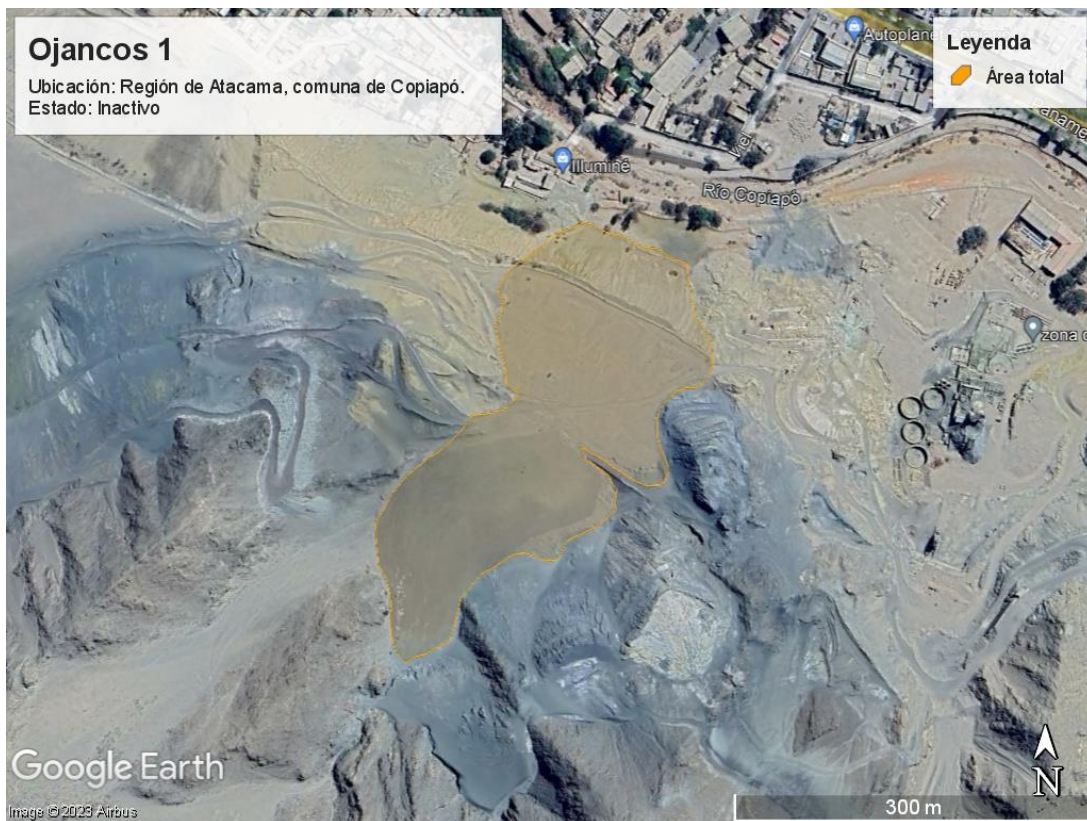


Figura 4-7: Depósito de relaves inactivo “Ojancos 1”. Fuente: Google Earth.

4.1.8. Depósito “Ojancos 2”

El depósito de relaves “Ojancos 2” (Figura 4-8) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.972.231 E 366.465). Este depósito estuvo en servicio desde 1967 hasta 1971 y desde 1974 hasta 1977, y el muro de este depósito fue construido con un prisma de arenas de relave mediante el método de aguas arriba. Dado la composición del muro, corresponde a un tranque de relaves perteneciente a la faena Ojancos de la empresa CMC Sali Hochschild S.A la cual procesaba principalmente cobre. El depósito cubre un área de 6,2 há. El muro tiene una altura máxima actual de 30 m con un ángulo de talud de aguas abajo de 18°. Su coronamiento es de un ancho de 3 m y largo de 300 m, aproximadamente.



Figura 4-8: Depósito de relaves inactivo “Ojancos 2”. Fuente: Google Earth.

4.1.9. Depósito “Bodega Alto”

El depósito de relaves “Bodega Alto” (Figura 4-9) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.973.769 E 364.521). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena “Bodega Alto” de CMC SALI HOCHSCHILD S.A., la cual procesaba principalmente cobre y oro. El depósito cubre un área de 3,3 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 11 m con un ángulo de talud de aguas abajo que se estimó mediante Google Earth de 15°. Su coronamiento posee un ancho de 4 m y un largo de 300 m, aproximadamente.



Figura 4-9: Depósito de relaves inactivo “Bodega Alto”. Fuente: Google Earth.

4.1.10. Depósito “Depósito de relave 3”

El depósito de relaves “Depósito de relave 3” (Figura 4-10) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.973.741 E 365.002). No se tiene claridad respecto al método utilizado para la construcción del muro, sin embargo, su muro fue construido con un prisma de empréstito. Dada la composición del muro, se trata de un embalse de relaves perteneciente a la faena Bodega Alto, propiedad de CMC SALI HOCHSCHILD S.A., la cual procesaba principalmente cobre y oro. El depósito cubre un área de 12,8 há. El muro tiene una altura máxima actual de 11 m con un ángulo de talud de aguas abajo de 34° . Su coronamiento posee un ancho de 4 m y un largo de 500 m, aproximadamente.



Figura 4-10: Depósito de relaves inactivo “Depósito de relaves 3”. Fuente: Google Earth.

4.1.11. Depósito “Santa Laura 1”

El depósito de relaves “Santa Laura 1” (Figura 4-11) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.967.960 E 369.432). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena Planta San Esteban (Ex Santa Laura), propiedad de Compañía Minera San Esteban Primera, la cual procesaba principalmente oro. El depósito posee un área de 8,01 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 76 m con un ángulo de talud de aguas abajo de 38°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.

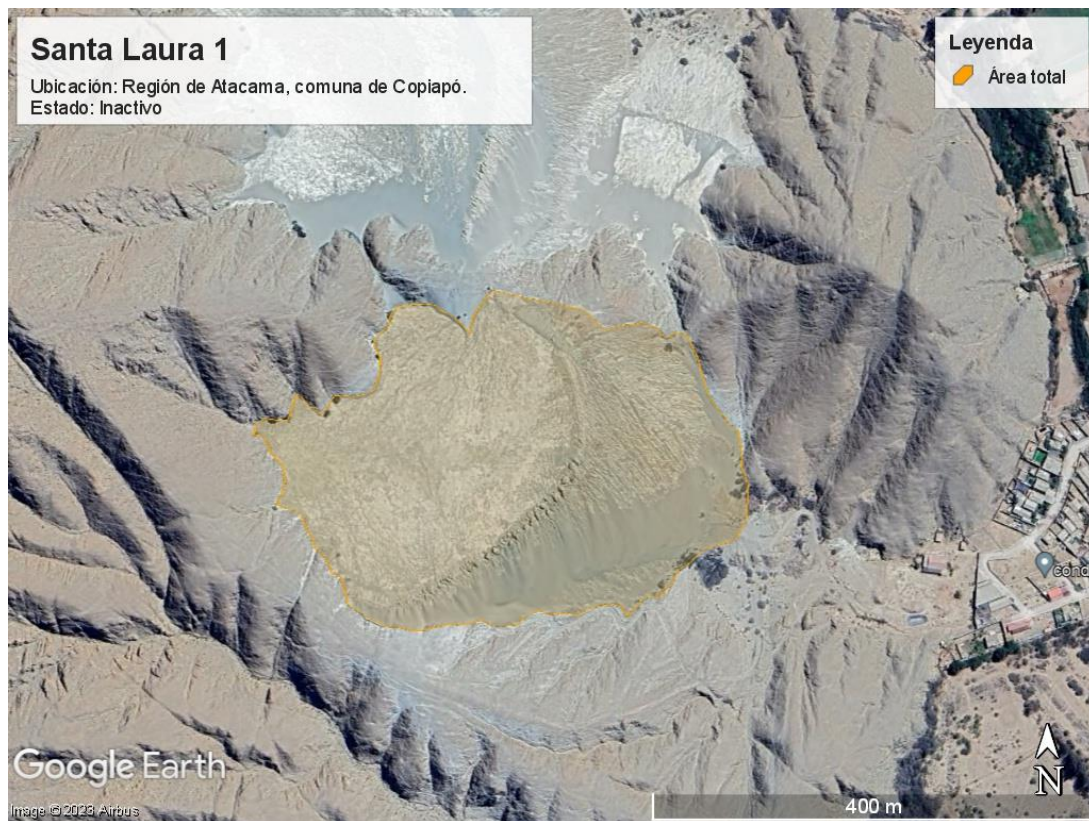


Figura 4-11: Depósito de relaves inactivo “Santa Laura 1”. Fuente: Google Earth.

4.1.12. Depósito “Santa Laura 2”

El depósito de relaves “Santa Laura 2” (Figura 4-12) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región de Atacama, comuna de Copiapó (referencia en coordenadas UTM S 6.968.251 E 369370.3621 están contenidas en el depósito). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas arriba y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la faena Planta San Esteban (Ex Santa Laura), propiedad de Compañía Minera San Esteban Primera, la cual procesaba principalmente oro. El depósito posee un área de 9,91 há. Mediante Google Earth, se estimó que el muro tiene una altura máxima actual de 70 m y un ángulo de talud de aguas abajo de 27°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.



Figura 4-12: Depósito de relaves inactivo “Santa Laura 2”. Fuente: Google Earth.

4.1.13. Depósito La Africana 1-2

El depósito de relaves “La Africana 1-2” (Figura 4-13) se encuentra en estado inactivo y se ubica en la Región Metropolitana, comuna de Maipú (referencia en coordenadas UTM S 6.296.146 E 331.325). El muro de este depósito fue construido mediante el método de aguas abajo y está compuesto por arenas, lo cual confirma su clasificación como un tranque de relaves perteneciente a la Planta La Africana de la empresa Minera Nueva Pudahuel, la cual procesaba principalmente cobre y de manera secundaria plata. El depósito cubre un área de 22 hás. El muro tiene una altura máxima actual de 31 m con un ángulo de talud de aguas abajo irregular pero que se estimó mediante fotos de terreno de máximo 30°. Este depósito no tiene un ancho de coronamiento evidente.



Figura 4-13: Depósito de relaves inactivo “La Africana 1-2”. Fuente: Google Earth.

4.2. Variables de monitoreo a medir con técnicas de medición remota

Las variables de monitoreo a escoger dependen de las características y ubicaciones de estos depósitos, señalado en la sección anterior. Se debe tener en cuenta cuales son las variables, indicadores clave, de los posibles mecanismos de falla (mencionados Sección 2.6) a los que pueden verse afectados estos tipos de depósitos, impactando en su la estabilidad física. También se tienen en cuenta las variables a medir que pueden afectar al entorno u otras infraestructuras.

Las variables que se propusieron para el proyecto son: Deformaciones superficiales, humedad, intervención humana, erosión, cantidad de polvo en suspensión, variación del área vegetada en torno al depósito, avance de infraestructura sobre el depósito, inestabilidad o falla en la infraestructura por condiciones meteorológicas.

En la Tabla 4-1 y Tabla 4-3 se presentan los parámetros de interés, las variables asociadas, el interés de medición, los modos de falla física que se pueden presentar y las fuentes de datos de entrada. Estos proporcionan una base sólida para el monitoreo anticipado de la eventual falla de depósitos de relaves inactivos y abandonados, contribuyendo a los objetivos del proyecto.

Los parámetros representan los factores clave que influyen en el comportamiento de estos depósitos, por otro lado, las variables constituyen medidas específicas que cuantifican o evalúan dichos parámetros, y su medición se lleva a cabo mediante diversas técnicas de percepción remota.

Tabla 4-1: Parámetros y variables a medir establecidas para el Proyecto FONDEF (2022). Fuente: Elaboración propia.

Nº	Parámetro	Variable	Interés de medición	Modos de falla física	Fuentes de datos de entrada
1	Deformaciones superficiales: Coronamiento y talud	Deformación vertical y horizontal de coronamiento y talud.	Estabilidad física	Falla en la fundación. Erosión interna. Inestabilidad del talud.	InSAR.
	Deformaciones superficiales: Cubeta	1. Deformación vertical y horizontal en cubeta 2. Aparición de socavones	Estabilidad física	Erosión interna.	1. InSAR 2. Medición óptica.
2	Evolución del área del depósito	Variación temporal del área de emplazamiento	Afectación a terceros e infraestructuras	No aplica	Medición óptica.

Tabla 4-2: Parámetros y variables a medir establecidas para el Proyecto FONDEF (2022)
(Continuación). Fuente: Elaboración propia.

Nº	Parámetro	Variable	Interés de medición	Modos de falla física	Fuentes de datos de entrada
3	Humedad	Índices asociados a cambios de humedad	Estabilidad física	Falla en la fundación. Erosión interna. Inestabilidad del talud.	Medición óptica.
4	Intervención humana	1. Deformación vertical 2. Cambios geométricos	Estabilidad física/Afectación a terceros	Inestabilidad del talud.	Combinación: 1. InSAR. 2. Medición óptica.
5	Erosión	Grietas/erosión (y medición de vientos y precipitaciones)	Estabilidad física	Inestabilidad del talud.	InSAR. Medición óptica. Estaciones meteorológicas.
6	Cantidad de polvo en suspensión	Dirección del viento y área de influencia.	Afectación a terceros	Inestabilidad de talud.	Medición óptica Sensores particulados.
7	Variación del área vegetada en el depósito	Presencia o ausencia de vegetación Áreas de vegetación	Estabilidad física: Afloramientos de humedad o zanjas de drenaje obstruidas con vegetación.	Falla en la fundación. Erosión interna.	Medición óptica: NIR
8	Avance de infraestructuras sobre el depósito	Áreas (píxeles) de estructuras externas al depósito.	Estabilidad física	Inestabilidad del talud.	Medición óptica.
9	Falla o inestabilidad por condiciones meteorológicas	Vientos y precipitaciones históricos	Para entender causas de variación de las demás variables: Estabilidad física.	Inestabilidad del talud. Falla en la fundación.	Estaciones meteorológicas aledañas.

Tabla 4-3: Parámetros y variables a medir establecidas para el Proyecto FONDEF (2022)
(Continuación). Fuente: Elaboración propia.

Se propone una descripción detallada de los parámetros críticos mencionados en la Tabla 4-1 y Tabla 4-3 en el marco del monitoreo para anticipar la eventual falla de depósitos de relaves inactivos y abandonados. Cada entrada incluye información sobre las variables medidas, la ubicación de la medición, el propósito de dicha medición, y cómo estas mediciones contribuyen a mantener la estabilidad física del depósito. Además, se destaca cómo estas variables permiten anticipar posibles modos de falla.

4.2.1. Deformaciones superficiales: Coronamiento y talud

Para la medición de deformaciones superficiales verticales (asentamientos) y horizontales en coronamiento, talud y cubeta y observación de posibles socavones. El propósito de medición es controlar la estabilidad física del depósito.

Según Woodward (2005) pueden producirse tres tipos de asentamientos:

1. Compresión entre las partículas del suelo debido a una carga aplicada, eliminación de agua o vibración.
2. Consolidación producto de la expulsión de agua del suelo debido a una carga aplicada.
3. Erosión: eliminación de finos que puede provocar inestabilidad en la estructura.

Los modos de falla que pueden presentarse y como evitarlos:

- Fallas por inestabilidad de talud: Se deben medir deformaciones horizontales en coronamiento, talud y cubeta. Principalmente, en coronamiento y talud pues los relaves depositados en la cubeta y el peso propio pueden generar esfuerzos lo suficientemente altos para producir este tipo de deformaciones.
- Fallas por capacidad de soporte: se miden deformaciones verticales en coronamiento y talud.
- Erosión interna: se miden deformaciones verticales en coronamiento, talud y cubeta (este último solo si no existe muro de contención).

Otro motivo importante para el monitoreo de las deformaciones verticales en la cubeta es que pueden servir como indicadores tempranos de posibles socavones que pueden aparecer.

4.2.2. Evolución del área del depósito

Corresponde a la medición de la variación temporal del área de emplazamiento abarcando coronamiento, talud y cubeta del depósito a lo largo del tiempo.

El área del depósito puede variar significativamente producto de las precipitaciones y vientos que permiten el movimiento y dispersión de partículas del depósito, e incluso la acumulación de partículas externas sobre este provocando un aumento en el área de emplazamiento. La intervención humana también puede provocar variaciones en las áreas de estas estructuras.

El propósito de medición es debido a que las variaciones significativas del área de emplazamiento pueden afectar a terceros e infraestructuras que se encuentren cercanos al depósito. No está asociada necesariamente a un mecanismo de falla específico.

4.2.3. Humedad

La medición de índices asociados a cambios de humedad en la cubeta, coronamiento y talud del depósito. La humedad en un depósito puede deberse a diferentes motivos, generalmente a las lagunas. Dada la ausencia de lagunas en depósitos de relaves inactivos y abandonados la humedad que se contempla es la provocada por las precipitaciones de la zona.

El propósito de medición es controlar la estabilidad física del depósito pues pueden producirse distintos tipos de falla debido a altas humedades.

Se pueden producir erosiones internas e inestabilidades del talud producto a acumulaciones de agua sobre la estructura. Por otro lado, una falla por capacidad de soporte se puede producir debido a flujos de agua significativos en el depósito.

Por otro lado, la humedad del depósito tiene un impacto en la erosión superficial que puede ocurrir en ellos:

- La erosión hídrica o por agua se produce ante un alto contenido de humedad.
- La erosión eólica se produce en condiciones de baja humedad, combinada con otros factores, ocasionando la generación de polvo desde el depósito.

4.2.4. Intervención humana

Se puede observar mediante la medición de deformaciones verticales que representen intervenciones significativas, como movilizaciones de tierra y cambios geométricos como la construcción de un camino o estructura.

El interés de medición de esta variable se relaciona con la estabilidad física y afectación a terceros. Una intervención considerable sobre el depósito puede dañar la infraestructura modificando su geometría y dimensiones, y de esta forma, provocar deslizamientos o inestabilidad en el talud. Además, se pueden generar levantamientos de polvo que puede afectar a terceros y al entorno.

Por último, el control de intervenciones sobre el depósito puede justificar el origen de las deformaciones en el depósito medidas con el método interferométrico. Es decir, las deformaciones obtenidas pueden proceder de períodos donde hubo cambios significativos en el depósito.

4.2.5. Erosión

Observación de erosión superficial por agua (erosión hídrica) y por viento (erosión eólica) a través de la aparición de ciertos indicadores de erosión sobre el depósito. Se desea poder observar erosiones en surco, cárcavas, grietas de tracción, grietas de secación y grietas verticales. El interés de medición de esta variable corresponde en mantener la estabilidad física de los depósitos. La aparición de grietas o erosiones en el coronamiento o en la cara del talud son un indicador de una posible inestabilidad del talud en el futuro (Clarkson, 2021).

La erosión hídrica superficial corresponde a la pérdida parcial o total de material de superficie debido a la lluvia, deshielo o al flujo de agua superficial. Si se considera el talud del muro del depósito, el agua desplaza las partículas de suelo dejándolas a niveles más bajos, constituyendo nuevos suelos o acabando en depósitos de agua cercanos.

La erosión eólica corresponde a la pérdida del material producto del arrastre de partículas debido a la acción del viento, dependiendo también de las características del suelo y su susceptibilidad de erosionarse, siendo también un factor importante la vegetación existente.

La pérdida de material producto de la erosión eólica genera una disminución de la masa que constituye el talud del tranque formando cárcavas que son zonas potenciales de falla, que afectan la estabilidad del muro del tranque. Las emisiones de partículas finas de relave pueden viajar grandes distancias afectando áreas adyacentes y zonas pobladas. En esos casos los efectos pueden ser más severos, si se considera que las emisiones de polvo contienen elementos que afectan las vías respiratorias de los seres humanos (Espinace et al., 2006).

4.2.6. Cantidad de polvo en suspensión

Consiste en la medición de la dirección del viento y área de influencia del polvo en suspensión. El interés de medición de esta variable corresponde a la posible afectación a terceros.

Los relaves están compuestos por partículas que poseen elementos tales como metales y metaloides (As, Sb, Hg, entre otros) que acompañaban al mineral principal y secundario que se haya explotado. Dependiendo de la concentración y la fase mineralógica en que se encuentren dichos elementos pueden ser un riesgo para la salud pública (Cesar et al., 2022; Dong et al., 2021).

Las partículas de los relaves pueden dispersarse a través de cursos de agua o, en condiciones de baja humedad, pueden ser transportadas por el viento en forma de polvo, siendo este el medio de transporte que alcanza mayores distancias (Breshears et al., 2003; Csavina et al., 2012).

4.2.7. Variación del área vegetada en el depósito

La observación y medición de áreas vegetadas en depósitos de relaves son esenciales para anticipar cambios en la humedad y evaluar posibles problemas en el sistema de drenaje de aguas lluvias. La presencia de vegetación puede indicar afloramientos de humedad y obstrucciones en zanjales de drenaje acumulando flujos de agua en períodos de precipitación. Este monitoreo es crucial para prevenir erosiones internas y posibles fallas por capacidad de soporte debido a flujos significativos de agua.

Por otro lado, la vegetación puede tener impactos beneficiosos al actuar como una capa protectora contra la erosión eólica. Sus hojas y tallos absorben la energía del viento, reduciendo su impacto en el suelo. La incorporación de materia orgánica al suelo por parte de la vegetación, según Espinace et al. (2006), mejora la agregación del suelo, disminuyendo su erodabilidad. En resumen, la observación de la vegetación no solo es indicativa de posibles problemas, sino que también revela beneficios importantes para la estabilidad del depósito.

4.2.8. Avance de infraestructuras sobre el depósito

La observación de áreas externas a la estructura del depósito, ya sea construcciones o tomas ilegales, es esencial para evaluar su estabilidad física. La presencia de construcciones o tomas no autorizadas puede introducir cargas no previstas, generando riesgos de inestabilidad en el talud. Además, estas intervenciones pueden modificar la geometría y dimensiones de la estructura, contribuyendo potencialmente a su falla.

Adicionalmente, la realización de obras puede desencadenar levantamientos de polvo, afectando tanto a terceros como al entorno circundante. El control del avance de infraestructura sobre el depósito, así como la intervención humana, pueden ser el motivo de las deformaciones medidas mediante interferometría.

4.2.9. Falla o inestabilidad por condiciones meteorológicas

La medición de viento y precipitaciones históricas es esencial para comprender las causas de variación de otras variables y asegurar la estabilidad física del depósito.

Las variables hidrometeorológicas por considerar incluyen viento, temperatura y precipitaciones, tanto líquidas como sólidas (nieve). La información se recopila en estaciones meteorológicas cercanas a los relaves, obteniendo datos históricos de la intensidad y dirección del viento, temperaturas extremas y cantidad de precipitación líquida.

La erosión eólica, pérdida de material por el arrastre de partículas impulsadas por el viento, se relaciona con la intensidad del viento y factores climáticos como precipitación, temperatura y humedad atmosférica. La obtención de datos de precipitaciones líquidas y temperaturas se utiliza para justificar deformaciones, humedad superficial y erosiones, tanto eólicas como hídricas (Espinace et al., 2006)

Las precipitaciones líquidas, especialmente en eventos de gran intensidad y corta duración, desencadenan erosión hídrica, con impactos negativos en la estabilidad del relave. La intensidad y dirección del viento justifican deformaciones superficiales y erosión eólica.

La recopilación precisa de datos históricos y presentes de estas variables desde estaciones meteorológicas cercanas complementa las mediciones actuales, proporcionando información crucial para anticipar modos de falla como la inestabilidad del talud y la falla en la fundación (Espinace et al., 2006). El mantenimiento de la estabilidad física de los depósitos es esencial en este contexto.

5 Resultados

En el Capítulo 4, se llevan a cabo la selección de los depósitos pilotos y variables de monitoreo para el Proyecto FONDEF (2022). A continuación, se exponen los resultados posteriores a los realizados en el capítulo anterior, según se indica en los pasos metodológicos señalados en la Figura 3-1 del Capítulo 3 de esta tesis.

En un principio, se muestran los resultados del Catastro de depósitos para los 13 depósitos pilotos del proyecto. Esto corresponde al Catastro de depósitos como un archivo digital de Power BI. Posteriormente, se presentan los parámetros utilizados en la técnica de medición de deformaciones superficiales con interferometría satelital para los cinco depósitos en estudio y sus valores en conjunto con su precisión. Finalmente, se presentan los parámetros para la estimación de deformaciones mediante el método analítico y los resultados de estas estimaciones.

5.1. Catastro de depósitos pilotos

El catastro compila y sintetiza información de los 13 depósitos pilotos para el Proyecto FONDEF en la plataforma Power BI para una visualización más gráfica y amigable de la información, y con la intención de poder ampliarse a futuro. Este se trata de un archivo digital en formato .pbix de Power BI.

La portada de este archivo digital se observa en la Figura 5-1. La información recopilada se organiza en dos ventanas, la primera de “Características generales” y la segunda de “Fuentes de Información y Observaciones”.



Figura 5-1: Portada del catastro, Proyecto FONDEF (2022). Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Cabe señalar que cada uno de los depósitos contiene información tanto en “Características generales” como en “Observaciones y fuentes de información”.

Al entrar en la ventana de “Características generales” (Figura 5-2) se puede consultar lo siguiente:

- Información de la empresa responsable del depósito
- Inicio y fin de la construcción (si están disponibles)
- Ubicación geográfica
- Características y dimensiones del depósito
- Geología de la zona
- Presencia de erosión
- Minerales extraídos,
- entre otros.

DEPÓSITOS

Total depósitos	ID	Nombre depósito	Área total [ha] (I)	Altura muro [m] (I)	Ancho coronamiento [m] (I)	Largo coronamiento [m] (I)
13	445	BODEGA ALTO	3.30	11	4	300
	1025	DEPOSITO DE RELAVE 3	12.80	11	4	500
	1022	DESCONOCIDO	2.01	4	0	0
	35	FARAH 1-2-3-4-5-6-7	7.97	4	< 2	PERIMETRO
	1045	LA AFRICANA 1-2	22.00	31	0	S/I
	742	OJANCOS 1	5.20	30	0	200
	69	OJANCOS 2	6.20	30	3	300
	320	PAJONALES	4.10	S/I	S/I	S/I
	693	SAN MIGUEL 2 (EX-ANDACOLLO 2)	2.44	5	0	0

GEOLÓGIA DEL DEPÓSITO
Depósitos aluviales y fluviales, alternancia de arenas limosas y/o arcillosas, con contenidos de grava y gravilla con estratos formados por un conglomerado de gravas, arenas, limos y/o arcillas

EROSIÓN

Erosión en surco	Cárcavas	Grieta de tracción	Erosión interna	Grieta vertical	Grieta de secación
NO	NO	NO	NO	NO	NO

MINERAL

Flotación	370	S/I	~ 15 (GE)
Tratamiento de mineral	Cota [m.s.n.m]	± talud est. [°] (I)	± talud est. [°] (F/GE)
	515.600	773.398	3.30
	Vol total [m ³] (E)	Masa total [ton] (E)	Área total [ha] (E)
COBRE - ORO	Cercanía a poblado		
Mineral principal	850.0 metros		

OTROS

Muro de cola	Muro de pie	Vegetación	Intervención
NO	NO	SI	SI
Sist. drenaje	Canal de contorno	Instrumentación	
NO	NO	NO	

GLOSARIO

N/E: No existe	Obtenido mediante:
N/A: No aplica	(F): Fotos o Google Earth
N/D: No definido	(GE): Google Earth
S/I: Sin información	(I): Informe visita técnica
S/C: Sin comentarios	(E): Excel Sernageomin
est: Estimado	(LC): Lev. Catastral 1990

Figura 5-2: Características generales depósito de relaves “Bodega Alto”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la ventana de “Fuentes de información y Observaciones” (Figura 5-3) se encuentran los documentos y fuentes de información utilizados para recopilar los datos. También se incluyen observaciones que abarcan tanto datos recientes sobre el depósito, su cubeta y muro, como observaciones que datan de 1990 (Sernageomin, 1989, 1990a y 1990b). Además, para los depósitos “Ojancos 1”, “Ojancos 2” y “Depósito de relave 3”, se incorporan observaciones procedentes del plan de cierre de la estructura (CMC Sali Hochschule S.A, 2009).

FUENTES DE INFORMACIÓN			
ID	Depósito	1. Informe visita técnica	1. Excel Sernageomin
445	BODEGA ALTO	INF-GQDNA-2016-218 (may-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)
1025	DEPOSITO DE RELAVE 3	INF-GQDNA-2016-217 (may-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)

OBSERVACIONES MÁS RECIENTES			
Depósito (I)	Cubeta (I)	Muro (I)	Estado actual (2023)
S/C	CUBETA CUBIERTA CON EMPRESTITO, CUBETA EN TERRAZAS	S/C	S/I

OBSERVACIONES DE 1990 (LC)		
Fenómenos no sísmicos que podrían afectar al depósito		
Crecida del río Copiapó, provocando erosión superficial en el talud de aguas debajo de los muros.		
Observaciones análisis de estabilidad		
FS	< 1,4	Estática
	< 1,2	Sísmica
Situación deficiente ante condiciones sísmicas. La eventual falla de uno o más de estos tranques podría tener serias consecuencias.		
Observaciones Estado		
La estabilidad del muro de este tranque es deficiente, especialmente en condiciones sísmicas. Por lo tanto, se requiere mejorar la situación actual de este tranque. Al respecto se recomienda lo siguiente: Proceder a disminuir la inclinación de los taludes de aguas abajo del muro, a no más de unos 25°. Dejar la mayor distancia posible entre la poza de sedimentación y la parte más alta del muro.		

OBSERVACIONES PLAN DE CIERRE PARA OJANCOS, DEPÓSITO DE RELAVES 3 Y BODEGA ALTO		
Situación general a junio de 1999	Generalidades	Conclusiones informe de estabilidad
Los taludes de las pozas 6, 7 y 8 de este tranque no tienen daño y están secos. Las obras del Tranque Bodega Alto cortaron los taludes del prisma de la poza 6 para realizar drenajes, las caras expuestas fueron encontradas secas y drenadas	Fue construido con un prisma de empréstito, recibió lamas de relave y su construcción comprendió diversas piscinas de evaporación solar. Su conformación comprende las últimas piscinas del Tranque n°3 y se extiende en dirección sur, a ambos lados de la línea de alta tensión, generando sus propias piscinas números 6, al Este de la línea, 7 al Oeste de la misma y 8 nuevamente al Este pero al Sur de la poza 6 y en una cota superior. El talud frontal de la poza 6 ya no existe por haber sido cortado por los drenajes del proyecto Bodega Alto, versión II, que fuera construido sobre él.	N/A

Figura 5-3: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves Bodega Alto. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Los resultados de este catastro se muestran en el Anexo A.

5.2. Medición de deformaciones superficiales en depósitos mediante interferometría satelital

En esta sección, se miden las deformaciones superficiales en el coronamiento de los muros de los depósitos de estudio. Para ello, se considera un rango de tiempo de medición de un año, escogiendo el año 2021 según se menciona en el Capítulo 3.

Cabe destacar que el método de interferometría satelital a utilizar para la medición de deformaciones superficiales es el método PSI detallado en la Sección 2.11.3 a través del software SARPROZ. Como se menciona en la sección 2.12, SARPROZ es un software creado para aplicar muchas de las técnicas SAR mencionadas en esta tesis. En el Anexo B, se encuentran los resultados de las estimaciones del APS y el Multi-Image Sparse Points Processing (MISP).

Para la interpretación de los resultados, los desplazamientos LOS negativos son desplazamientos de alejamiento al satélite, y los desplazamientos LOS positivos son desplazamientos de acercamiento al satélite. Los desplazamientos verticales negativos corresponden a hundimientos y los desplazamientos verticales positivos a alzamientos.

5.2.1. Selección de información para la técnica PSI de interferometría satelital

Según lo explicado en el Capítulo 3, se obtiene información o data de dos zonas: Región de Atacama y Región de Coquimbo. Esto significa que dado que los depósitos “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”, se encuentran todos en la Región de Atacama, se utiliza la

misma data para estos 4 depósitos. En cambio, para el depósito “Desconocido”, se debe obtener nuevas imágenes de la Región de Coquimbo.

Las deformaciones superficiales obtenidas como se menciona en el Capítulo 2, se calculan para cada píxel de la imagen SAR mediante la medición de fase obtenida de los interferogramas. El tamaño del píxel depende de la resolución del modo utilizado por el sensor SAR del satélite Sentinel 1.

A continuación, se detalla acerca de la selección de información y parámetros para la medición de deformaciones superficiales en los muros de los diferentes depósitos.

5.2.1.1. Selección de información para depósitos en Región de Atacama

Para los depósitos “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”, se utiliza la misma información. Se recolectan 25 imágenes SAR ascendentes y 30 imágenes SAR descendentes. En la Tabla 5-1, se muestra más información sobre la data recopilada para la realización de la metodología PSI de interferometría satelital para estos depósitos.

Tabla 5-1: Información seleccionada para depósitos en Región de Atacama. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de órbita	Nº imágenes/ Modo	Satélite	Fecha	Ángulo de incidencia [°]	Polarización	Combinación de adquisiciones
Descendente	25 imágenes/ SLC - IW	Sentinel 1-B	06/01/2021 – 20/12/2021	43.78	VV	STAR
Ascendente	30 imágenes/ SLC - IW	Sentinel 1-B	15/01/2021 – 17/12/2021	43.55	VV	STAR

Dado el tipo de información recopilada (imágenes SLC) y el modo de adquisición (IW), el tamaño de píxel tiene un tamaño de 2.7 x 22 m hasta 3.5 x 22 m. En el Anexo C, se muestra la imagen primaria utilizada para cada combinación STAR.

5.2.1.2. Selección de información para depósitos en Región de Coquimbo

Se utilizan para el depósito “Desconocido”, 26 imágenes SAR ascendentes y 30 imágenes SAR descendentes. En la Tabla 5-2, se muestra más información sobre la data recopilada para la realización de la metodología PSI de interferometría satelital para este depósito.

Tabla 5-2: Información seleccionada para depósitos en Región de Coquimbo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de órbita	N° imágenes/ Modo	Satélite	Fecha	Ángulo de incidencia [°]	Polarización	Combinación de adquisiciones
Descendente	30 imágenes/ SLC - IW	Sentinel 1-B	06/01/2021 – 20/12/2021	39.07	VV	STAR
Ascendente	26 imágenes/ SLC - IW	Sentinel 1-B	15/01/2021 – 17/12/2021	33.59	VV	STAR

Dado el tipo de información recopilada (imágenes SLC) y el modo de adquisición (IW), el tamaño de pixel tiene un tamaño de 2.7 x 22 m hasta 3.5 x 22 m. En el Anexo C, se muestra la imagen primaria utilizada para cada combinación STAR.

5.2.2. Resultados de deformaciones superficiales en coronamiento de depósitos mediante interferometría satelital

Mediante la aplicación de la técnica PSI en los cinco depósitos de estudio, la cual se detalla en la Sección 2.11.3 y explica su procedimiento en el Capítulo 3, se entregan los resultados de deformaciones superficiales en el coronamiento del muro de los depósitos “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “Desconocido”.

Los resultados de las deformaciones están acompañados de su error de medición, el cual entrega la precisión de los resultados obtenidos. La precisión es detallada en la Sección 2.11.3.1 del Capítulo 2 de esta tesis, donde se menciona que la coherencia temporal y desviación estándar definen la precisión de los resultados. Sin embargo, la coherencia temporal es el principal parámetro de precisión utilizado para las técnicas InSAR. Los píxeles son seleccionados en la etapa de análisis multitemporal y con un filtro de coherencia mayor o igual a 0.8 para mayor precisión.

Se utiliza la convención de la para las deformaciones medidas con técnicas InSAR:

Tabla 5-3: Convención de signos para las deformaciones. Fuente: Elaboración propia.

Deformaciones positivas (+)	Deformaciones negativas (-)
LOS: Se acerca al satélite Vertical: Alzamiento	LOS: Se aleja del satélite Vertical: Hundimiento o subsidencia

Se extraen los datos del documento Power BI creado para la visualización de los resultados de deformación.

5.2.2.1. Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Los píxeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Ojancos 1” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-4. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS ascendentes en el coronamiento.

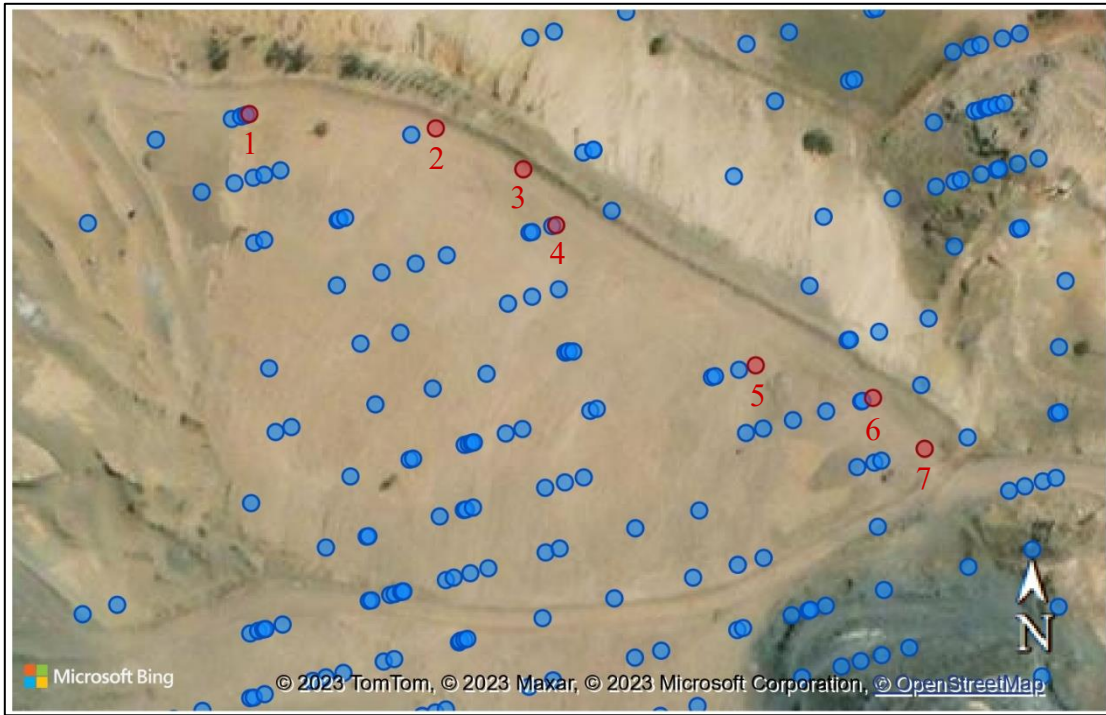


Figura 5-4: Depósito “Ojancos 1”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-4 (señalados en rojo). En la Figura 5-5, se muestra la variación de deformación en LOS de los 7 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

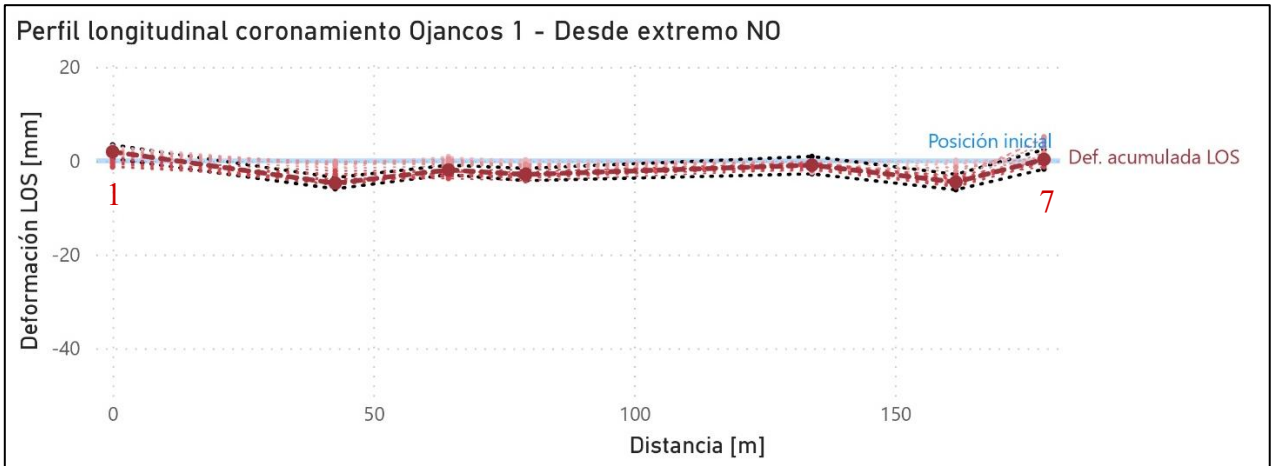


Figura 5-5: Depósito “Ojancos 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-4 se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-4: Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	1.92	1.48	0.95
2	-4.78	1.20	0.97
3	-1.95	1.01	0.98
4	-2.92	1.32	0.96
5	-0.93	1.86	0.92
6	-4.54	1.65	0.94
7	0.30	2.08	0.9

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Ojancos 1”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 4.

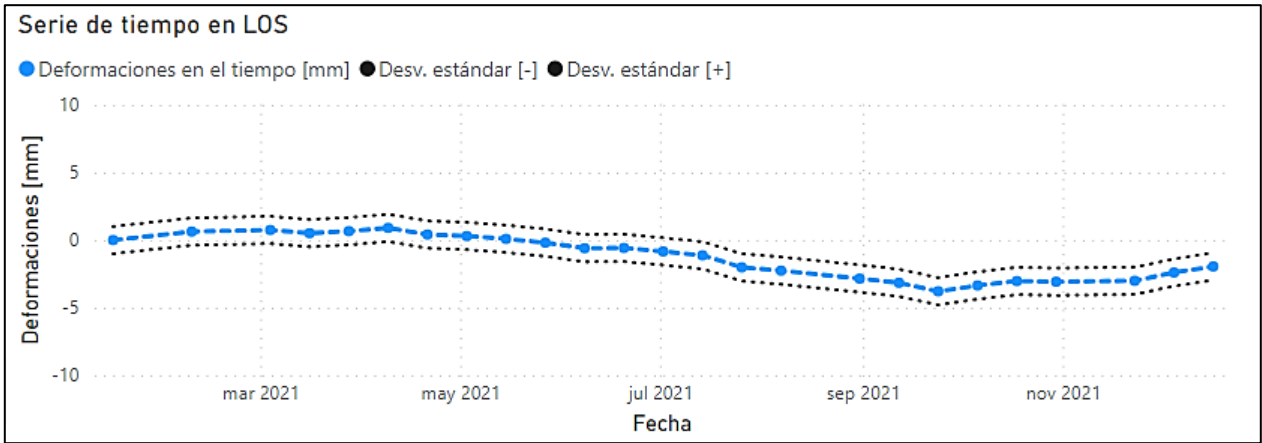


Figura 5-6: Depósito “Ojancos 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 4), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. estándar es de 1.32 mm.
Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.2. Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS en órbita descendente

Los píxeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Ojancos 1” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-7. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS descendentes en el coronamiento.

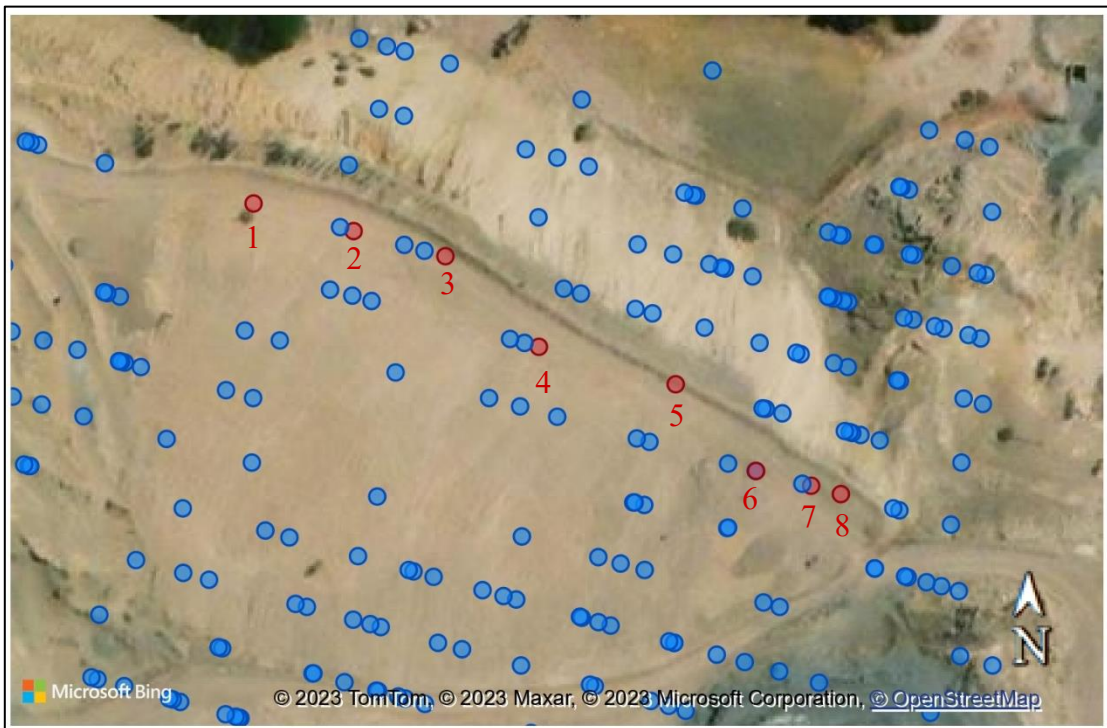


Figura 5-7: Depósito “Ojancos 1”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-7 (señalados en rojo). En la Figura 5-8, se muestra la variación de deformación en LOS de los 8 puntos en el

coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021.

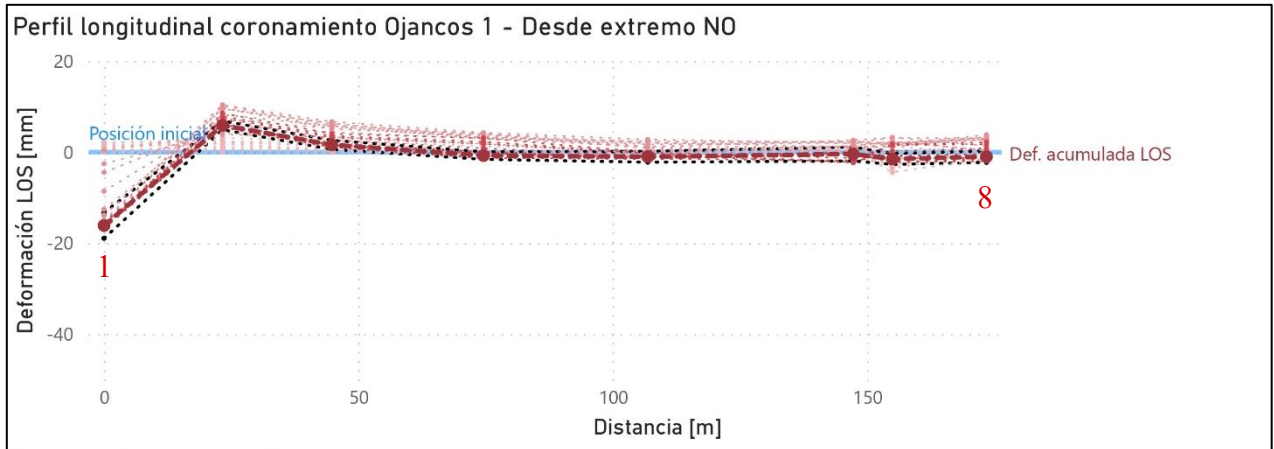


Figura 5-8: Depósito “Ojancos 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-5, se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre de 2021.

Tabla 5-5: Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-16.11	2.82	0.83
2	5.90	0.97	0.98
3	1.61	1.00	0.98
4	-0.74	0.83	0.98
5	-1.01	1.19	0.97
6	-0.98	1.25	0.96
7	-0.40	1.53	0.94
8	-1.50	1.19	0.97

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Ojancos 1”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 4.

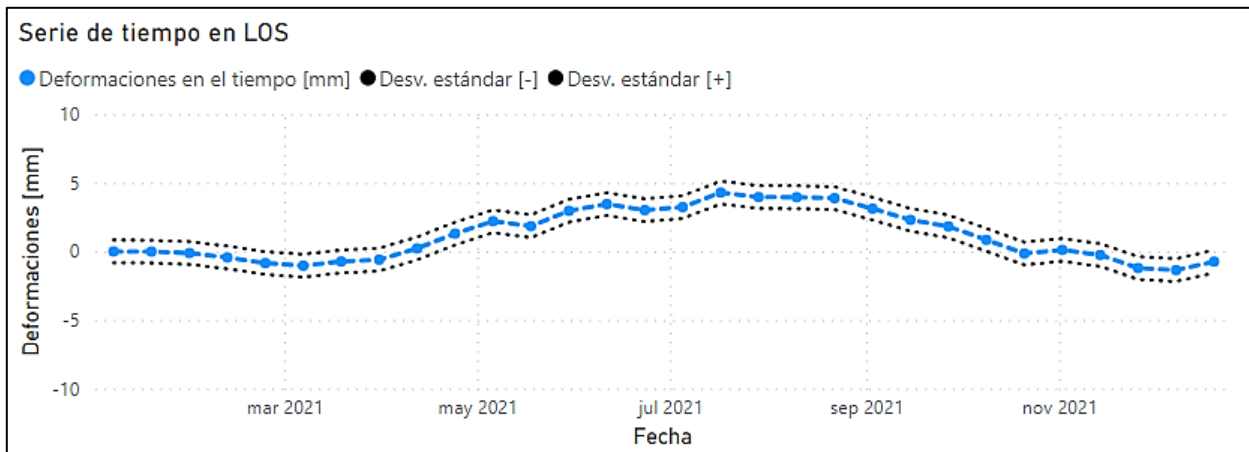


Figura 5-9: Depósito “Ojancos 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 4), en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. estándar es de 0.83 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.3. Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones verticales

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación verticales para el depósito “Ojancos 1” se muestran en azul y rojo. Los rojos son los utilizados para medir deformaciones verticales en el coronamiento.

Como se explica en el Capítulo 3, se miden deformaciones verticales mediante la combinación de deformaciones en LOS ascendentes con descendentes en el software SARPROZ.

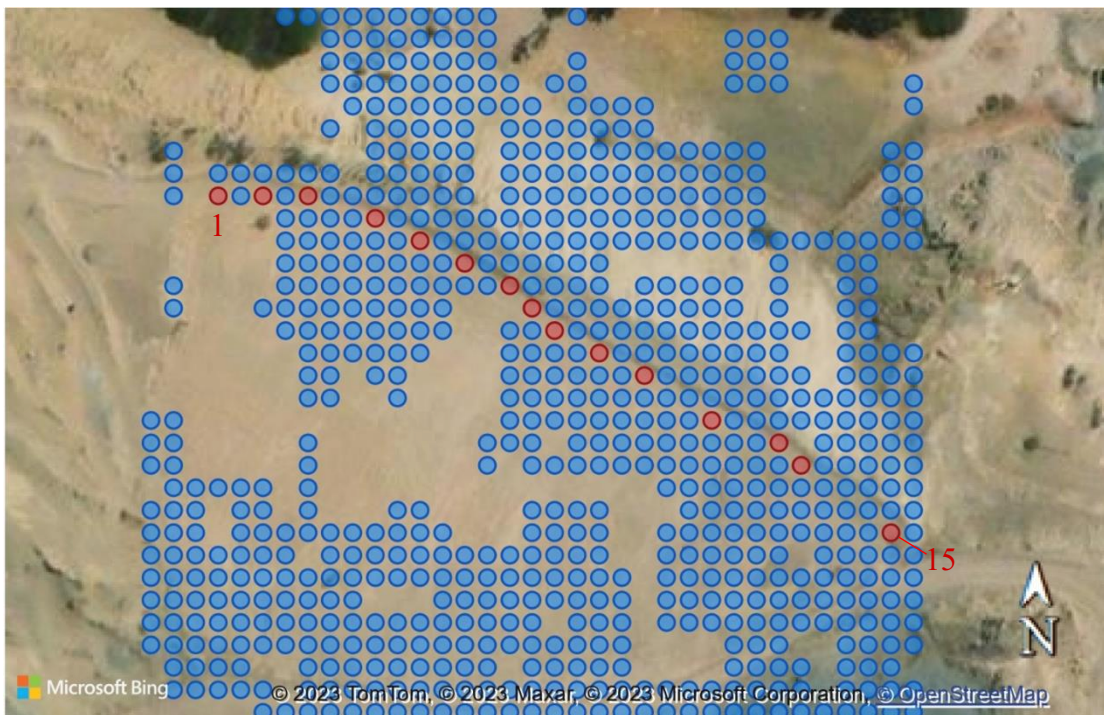


Figura 5-10: Depósito “Ojancos 1”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones verticales de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-10 (señalados en rojo).

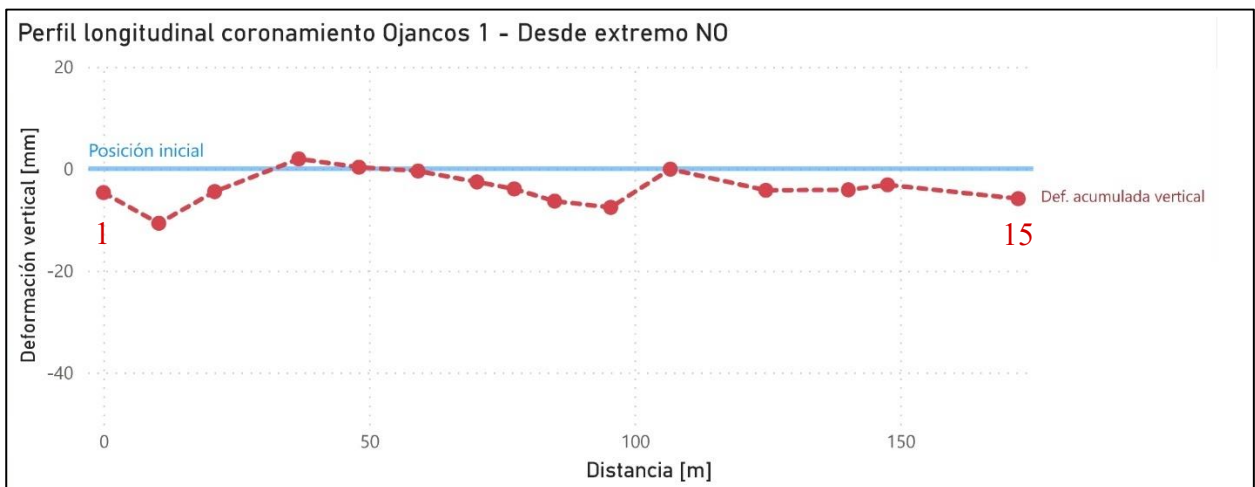


Figura 5-11: Depósito “Ojancos 1”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Figura 5-11 se muestra la deformación acumulada de los puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm) hasta diciembre de 2021.

Tabla 5-6: Depósito “Ojancos 1”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Vertical Acumulada [mm]	Coherencia temporal
1	-4.69	0.83
2	-10.70	0.85
3	-4.48	0.91
4	1.92	0.98
5	0.30	0.92
6	-0.46	0.97
7	-2.59	0.91
8	-3.96	0.88
9	-6.36	0.97
10	-7.58	0.86
11	-0.08	0.95
12	-4.23	0.95
13	-4.15	0.85
14	-3.16	0.88
15	-5.88	0.91

5.2.2.4. Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Los píxeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Ojancos 2” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-12. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS ascendentes en el coronamiento.

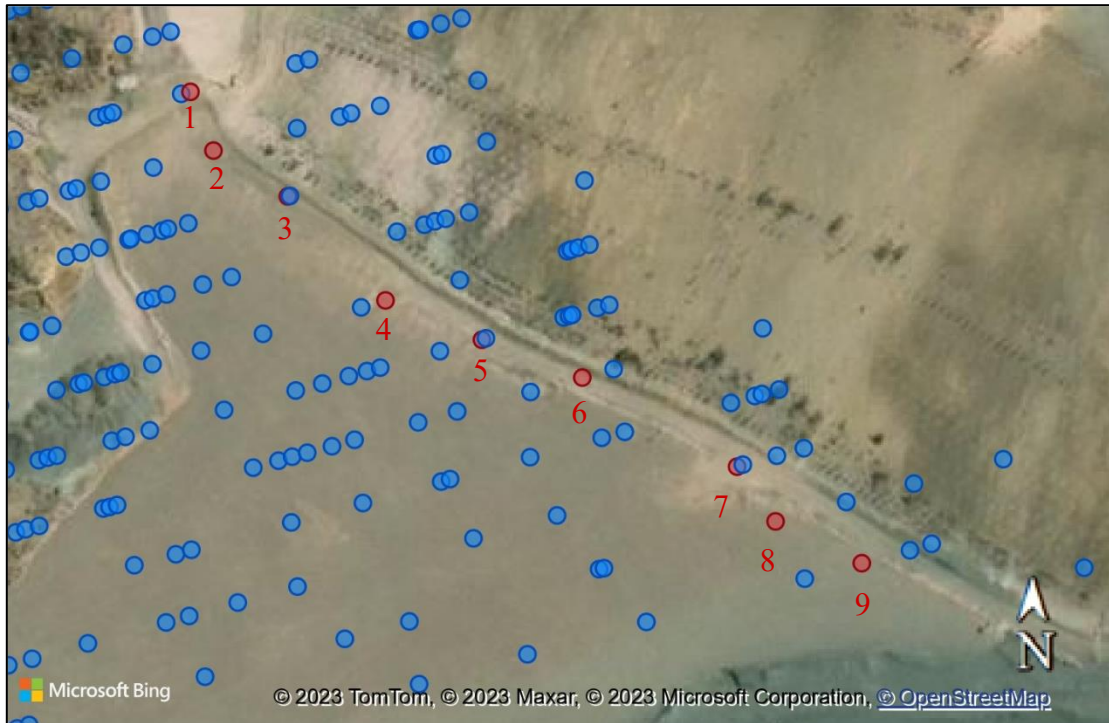


Figura 5-12: Depósito “Ojancos 2”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-12 (señalados en rojo). En la Figura 5-13, se muestra la variación de deformación en LOS de los 9 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021.

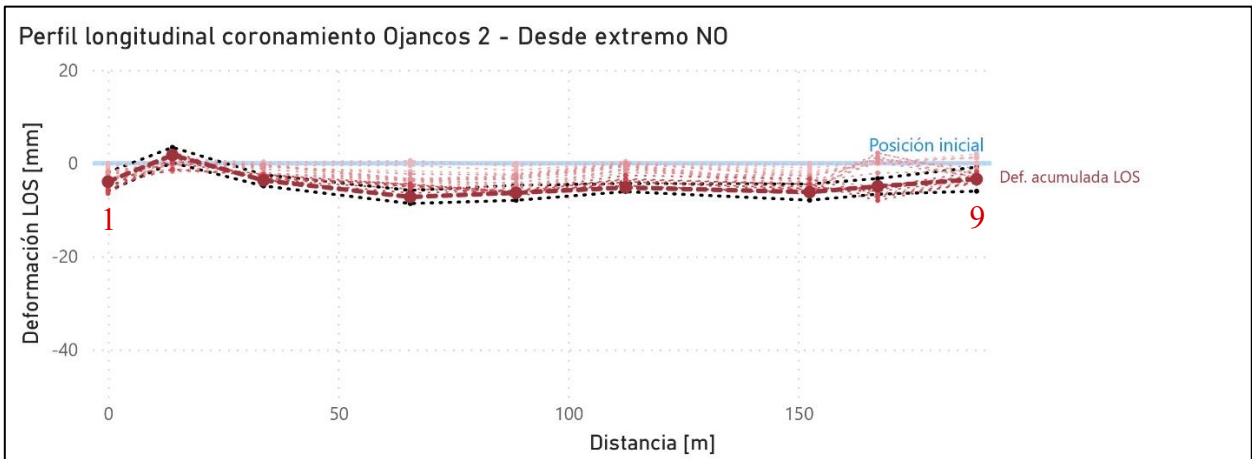


Figura 5-13: Depósito “Ojancos 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-7, se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre de 2021.

Tabla 5-7: Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-3.96	2.01	0.90
2	1.76	1.65	0.93
3	-3.68	1.20	0.97
4	-7.24	1.41	0.95
5	-6.35	1.61	0.94
6	-5.23	0.87	0.98
7	-6.20	1.74	0.93
8	-4.96	1.68	0.93
9	-3.42	2.58	0.85

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Ojancos 2”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 6.

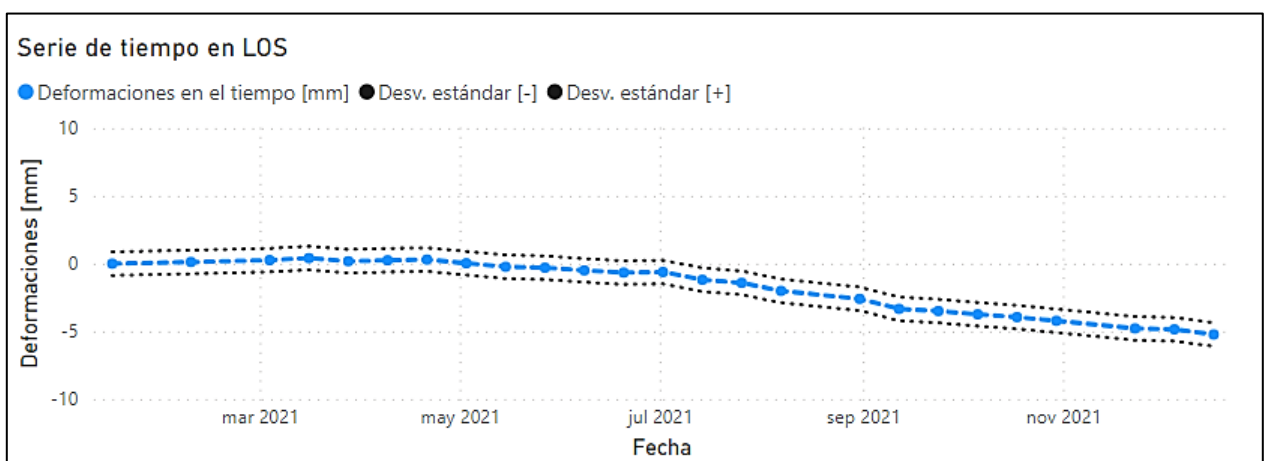


Figura 5-14: Depósito “Ojancos 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 6), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 0.87 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.5. Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones en LOS en órbita descendente

Los píxeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Ojancos 2” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-15. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en los descendentes en el coronamiento.

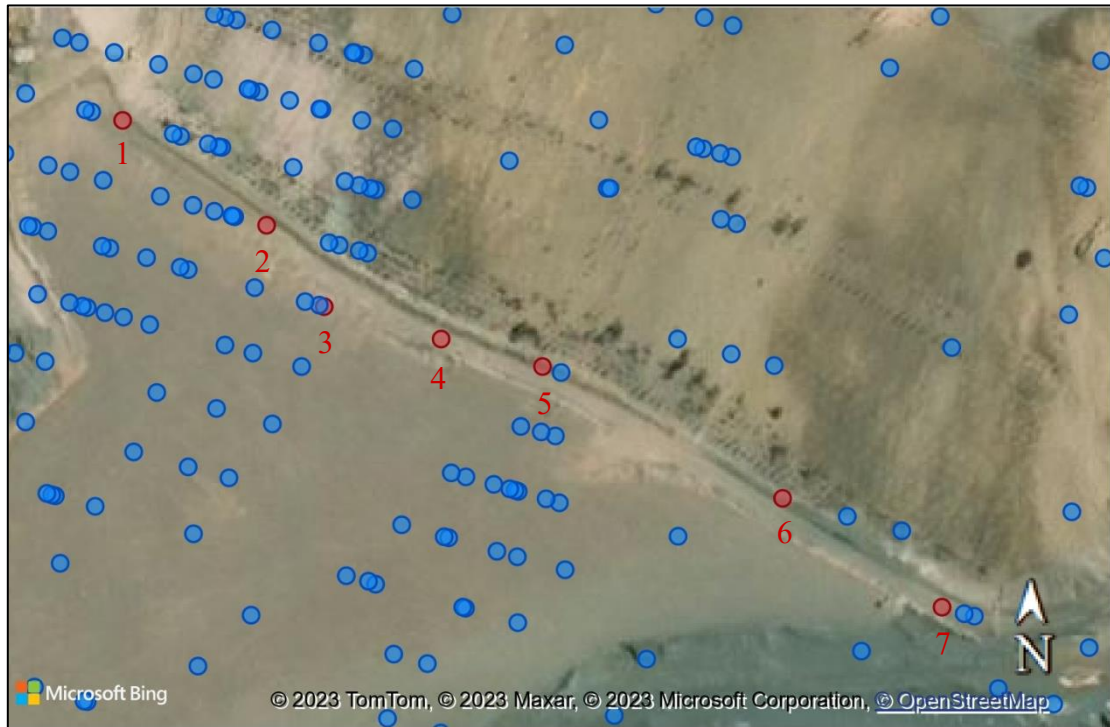


Figura 5-15: Depósito “Ojancos 2”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-15 (señalados en rojo). En la Figura 5-16, se muestra la variación de deformación en LOS de los 7 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

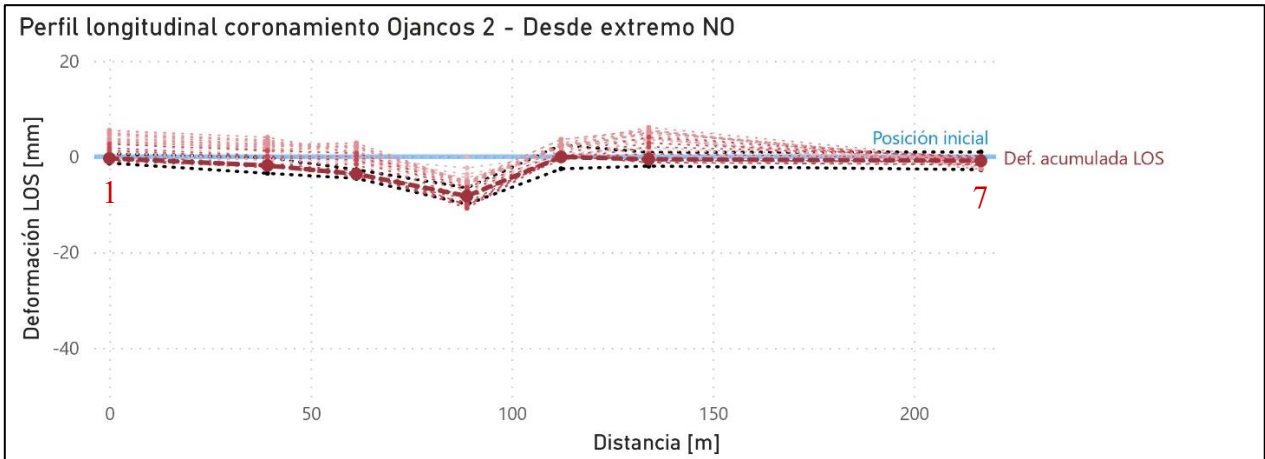


Figura 5-16: Depósito “Ojancos 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-8, se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre de 2021.

Tabla 5-8: “Depósito Ojancos 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-0.36	0.99	0.98
2	-1.85	1.64	0.93
3	-3.63	0.91	0.98
4	-8.25	1.73	0.93
5	-0.06	2.48	0.86
6	-0.54	1.43	0.95
7	-0.88	1.84	0.93

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Ojancos 2”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 5.

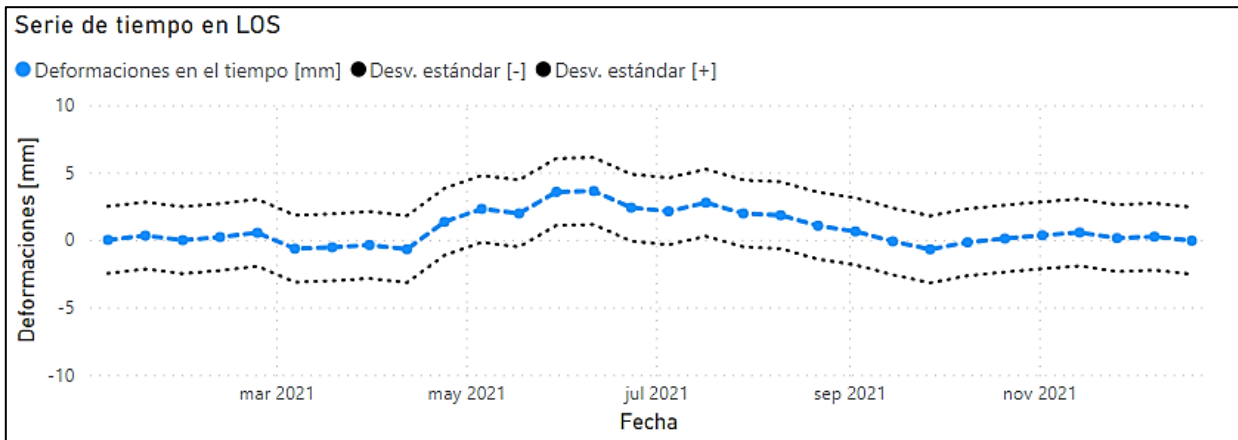


Figura 5-17: Depósito “Ojancos 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5) en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 2.48 mm.
Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.6. Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones verticales

Los píxeles donde se obtienen medidas de deformación verticales para el depósito “Ojancos 2” se muestran en azul y rojo punto. Los rojos son utilizados para medir deformaciones verticales el coronamiento.

Como se explica en el Capítulo 3, se miden deformaciones verticales mediante la combinación de deformaciones en LOS ascendentes con descendentes en el software SARPROZ.



Figura 5-18: Depósito “Ojancos 2”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones verticales de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-18 (señalados en rojo).

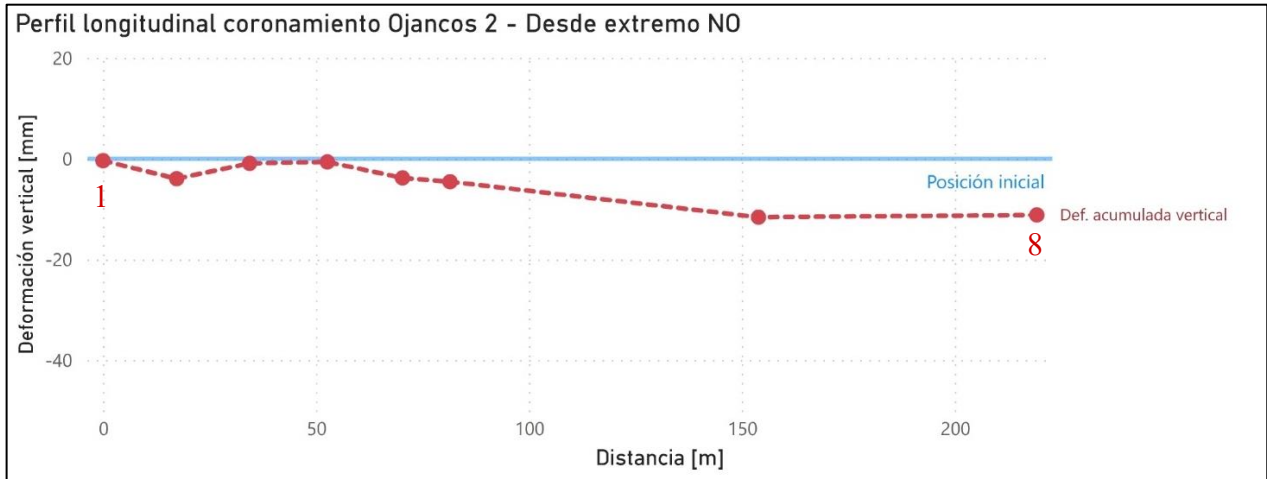


Figura 5-19: Depósito “Ojancos 2”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Figura 5-19 se muestra la deformación acumulada de los puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm) hasta diciembre de 2021.

Tabla 5-9: Depósito “Ojancos 2”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Vertical Acumulada [mm]	Coherencia temporal
1	-0.38	0.97
2	-3.95	0.91
3	-0.90	0.93
4	-0.63	0.97
5	-3.81	0.88
6	-4.56	0.91
7	-11.60	0.80
8	-11.16	0.82

5.2.2.7. Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Santa Laura 1” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-20. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS ascendentes en el coronamiento.

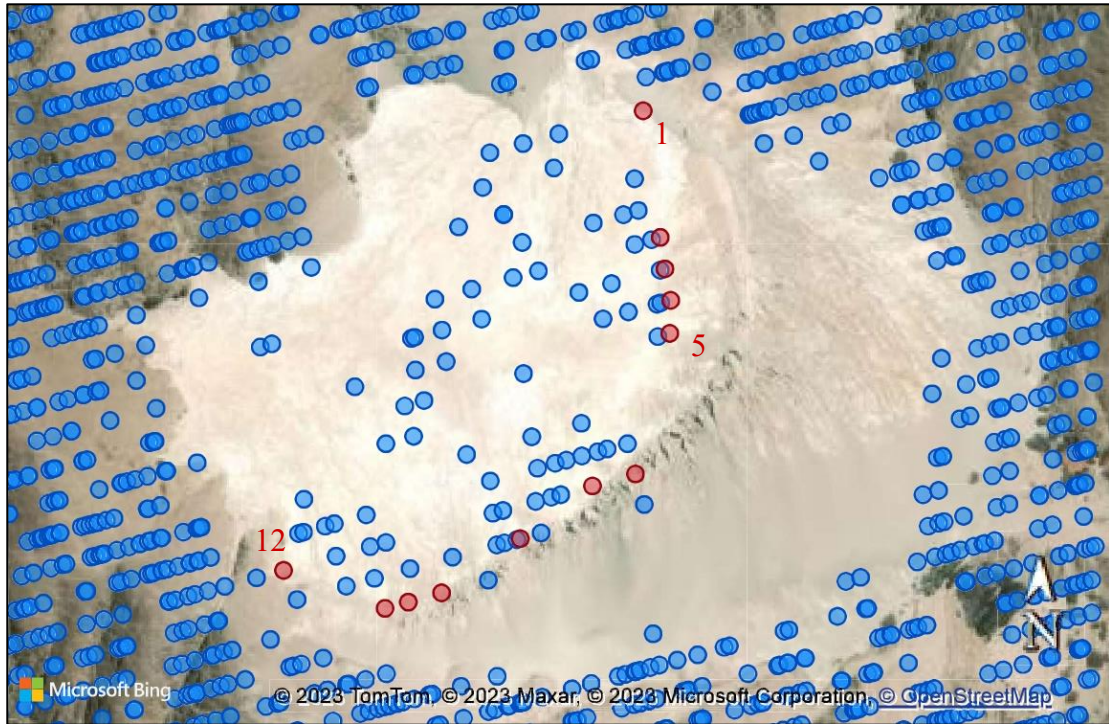


Figura 5-20: Depósito “Santa Laura 1”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-20 (señalados en rojo). En la Figura 5-21, se muestra la variación de deformación en LOS de los 12 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021.

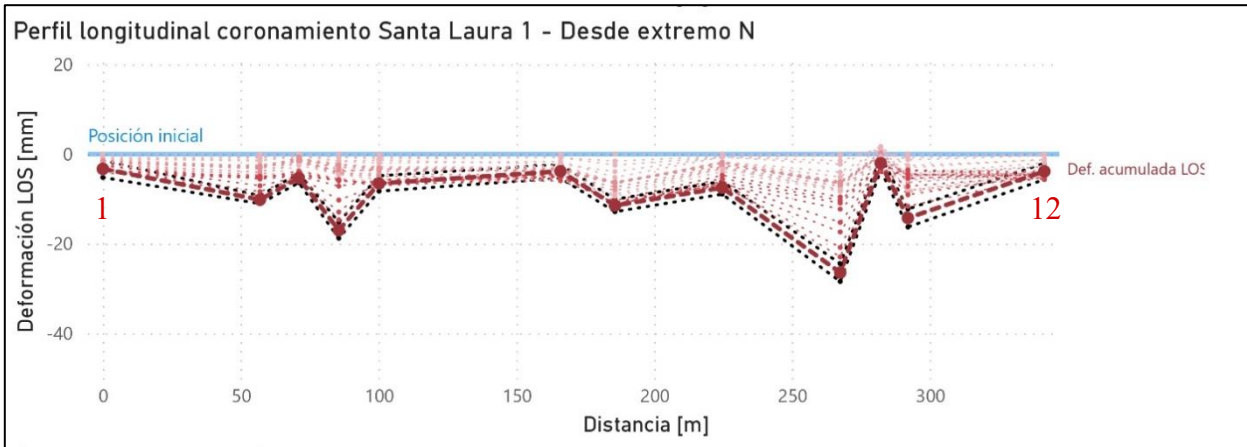


Figura 5-21: Depósito “Santa Laura 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-10 se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-10: Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-3.31	1.90	0.92
2	-10.18	0.89	0.98
3	-7.69	0.64	0.99
4	-16.99	1.79	0.93
5	-6.56	1.72	0.93
6	-3.83	1.54	0.94
7	-11.48	1.38	0.96
8	-7.51	1.44	0.95
9	-26.45	1.99	0.91
10	-2.05	1.59	0.94
11	-14.27	2.00	0.91

12	-3.86	1.81	0.92
----	-------	------	------

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Santa Laura 1”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 5.

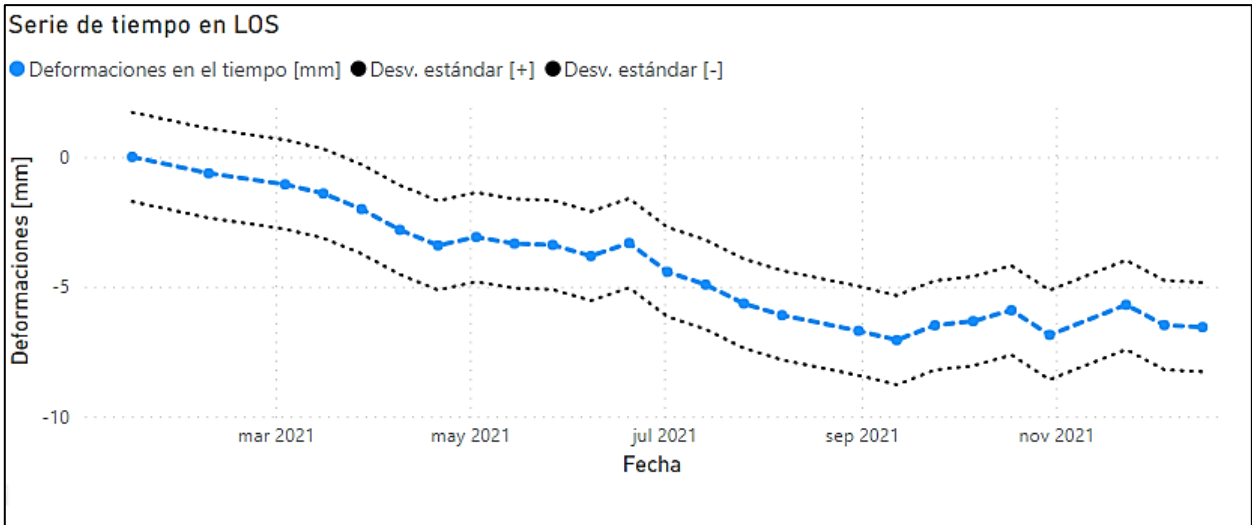


Figura 5-22: Depósito “Santa Laura 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.72 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.8. Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS en órbita descendente

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Santa Laura 1” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-23. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS descendentes en el coronamiento.

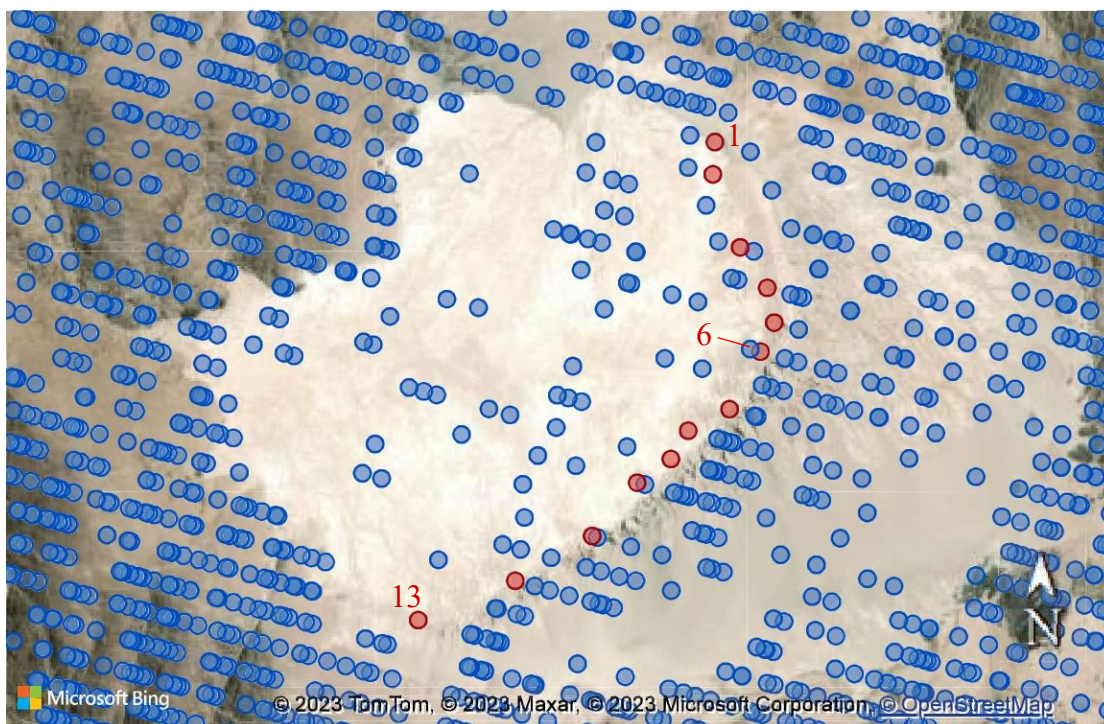


Figura 5-23: Depósito “Santa Laura 1”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-23 (señalados en rojo). En la Figura 5-24 se muestra la variación de deformación en LOS de los puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

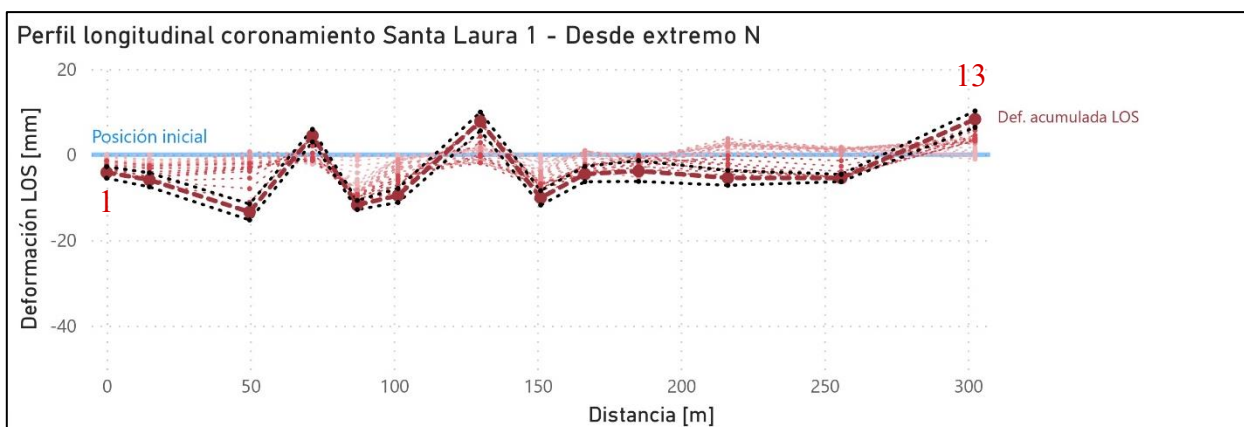


Figura 5-24: Depósito “Santa Laura 1”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-11 se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-11: Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-4.15	1.35	0.96
2	-5.89	1.64	0.94
3	-13.40	1.87	0.92
4	4.45	1.47	0.95
5	-11.77	1.07	0.97
6	-9.53	1.64	0.94
7	7.77	2.18	0.89
8	-10.09	1.69	0.93
9	-4.54	1.78	0.92
10	-3.81	2.44	0.88
11	-5.43	1.73	0.93
12	-5.45	0.85	0.98
13	8.30	1.92	0.92

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Santa Laura 1”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 6.

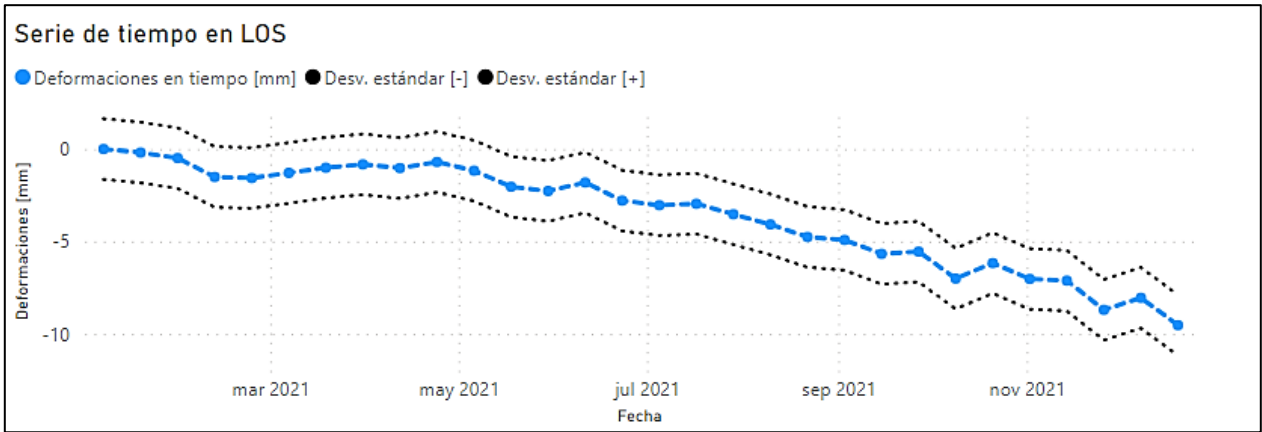


Figura 5-25: Depósito “Santa Laura 1”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 6), en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.64 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.9. Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones verticales

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación verticales para el depósito “Santa Laura 1” se muestran en azul y rojo. Los rojos son los utilizados para medir deformaciones verticales en el coronamiento.

Como se explica en el Capítulo 3, se miden deformaciones verticales mediante la combinación de deformaciones en LOS ascendentes con descendentes en el software SARPROZ.

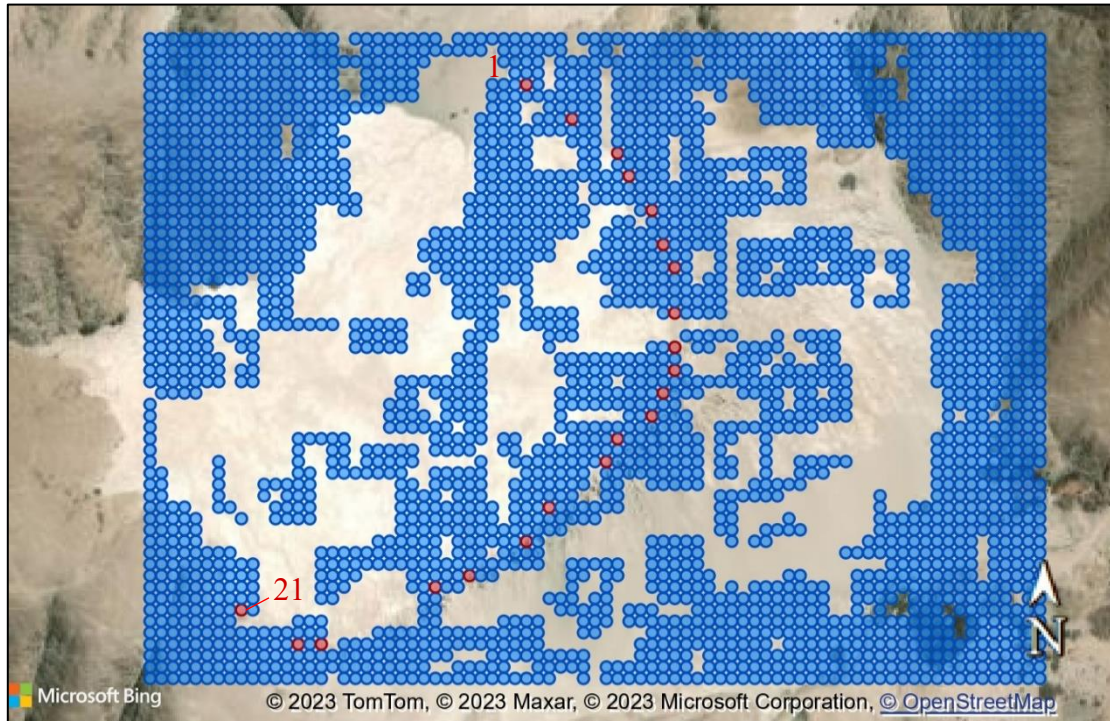


Figura 5-26: Depósito “Santa Laura 1”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones verticales de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-26 (señalados en rojo).

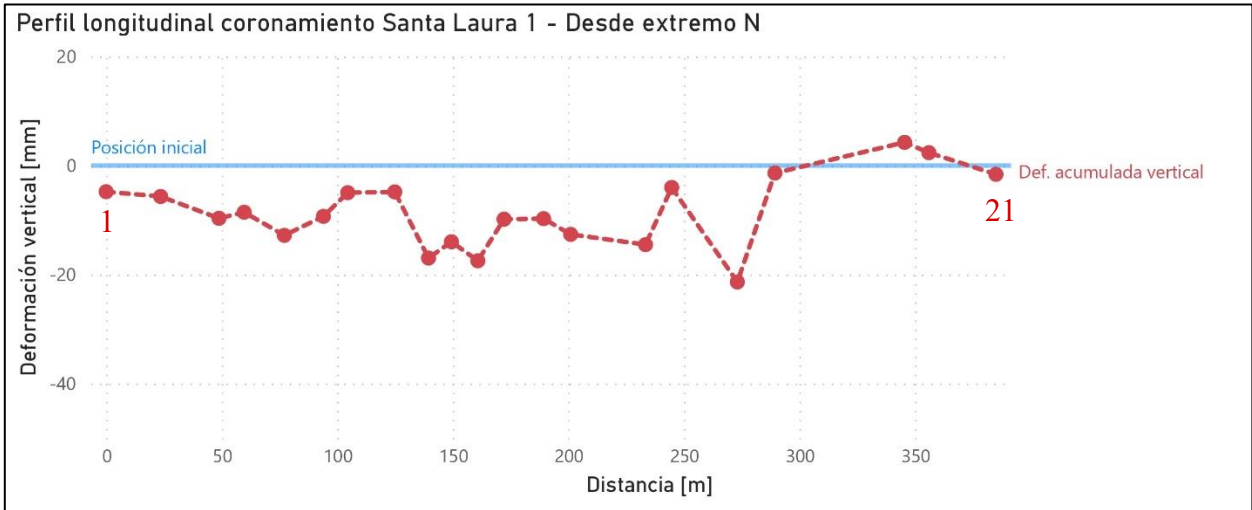


Figura 5-27: Depósito “Santa Laura 1”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Figura 5-27, se muestra deformación acumulada de los puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm) hasta diciembre de 2021.

Tabla 5-12: Depósito “Santa Laura 1”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021, en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Vertical Acumulada [mm]	Coherencia temporal
1	-4.79	0.99
2	-5.67	0.89
3	-9.68	0.93
4	-8.56	0.86
5	-12.80	0.93
6	-9.31	0.93
7	-4.97	0.92
8	-4.83	0.95
9	-16.96	0.95

ID	Def. Vertical Acumulada [mm]	Coherencia temporal
10	-13.98	0.91
11	-17.47	0.92
12	-9.83	0.89
13	-9.74	0.91
14	-12.62	0.88
15	-14.51	0.87
16	-4.01	0.86
17	-21.36	0.88
18	-1.37	0.96
19	4.26	0.90
20	2.37	0.91
21	-1.60	0.95

5.2.2.10. Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Santa Laura 2” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-28. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS ascendentes en el coronamiento.

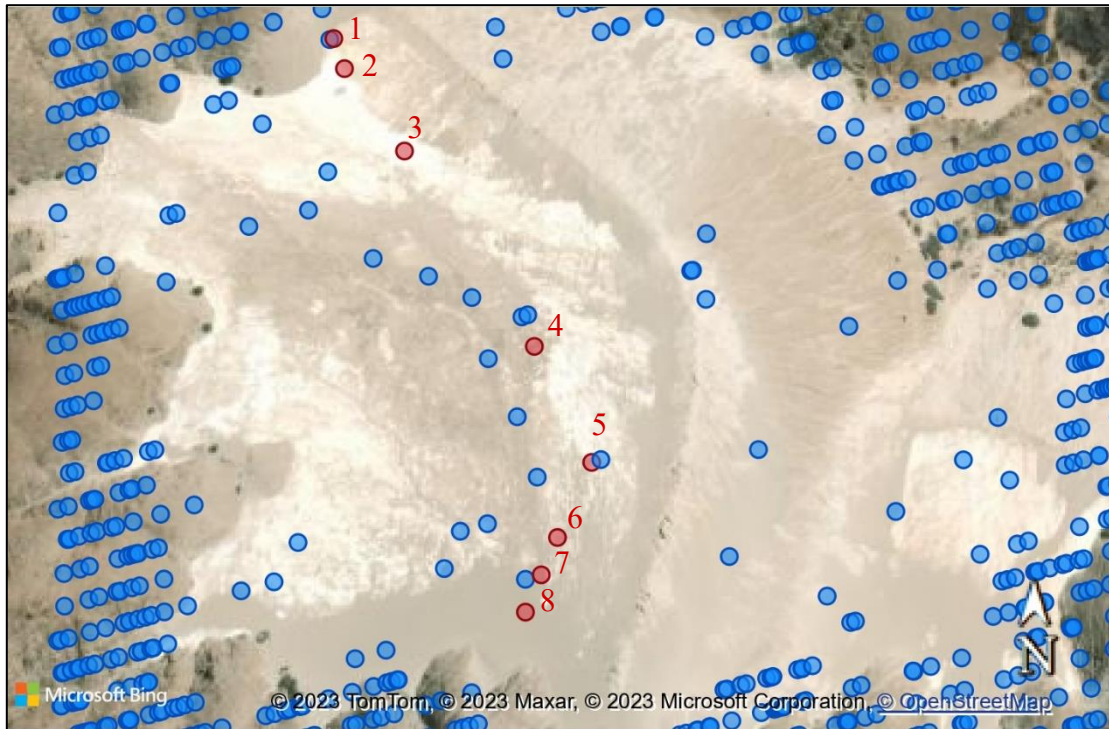


Figura 5-28: Depósito “Santa Laura 2”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-28 (señalados en rojo). En la Figura 5-29, se muestra la variación de deformación en LOS de los 8 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

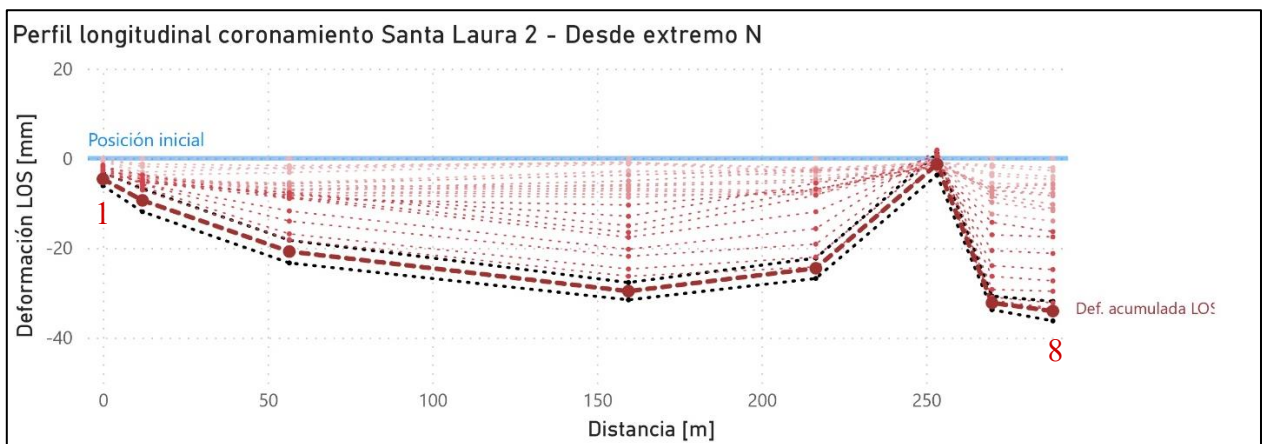


Figura 5-29: Depósito “Santa Laura 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-13 se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-13: Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-4.61	1.49	0.95
2	-9.38	2.53	0.86
3	-20.79	2.54	0.86
4	-29.64	1.93	0.91
5	-24.53	2.27	0.88
6	-1.33	2.41	0.86
7	-32.25	1.51	0.95
8	-34.08	2.18	0.89

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Santa Laura 2”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 4.

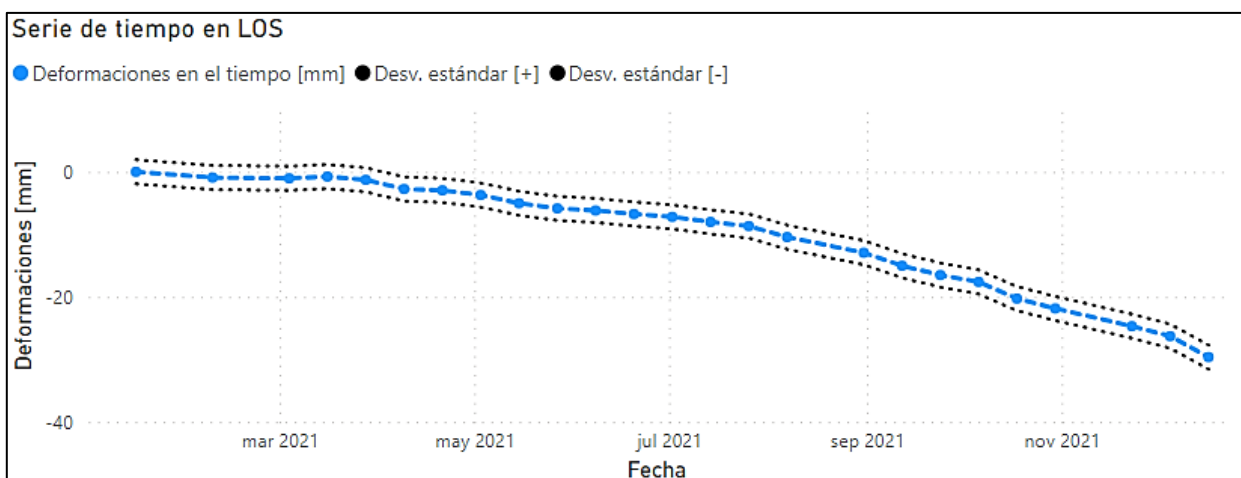


Figura 5-30: Depósito “Santa Laura 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 4), en órbita ascendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.93 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.11. Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS en órbita descendente

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Santa Laura 2” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-31. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS descendentes en el coronamiento.

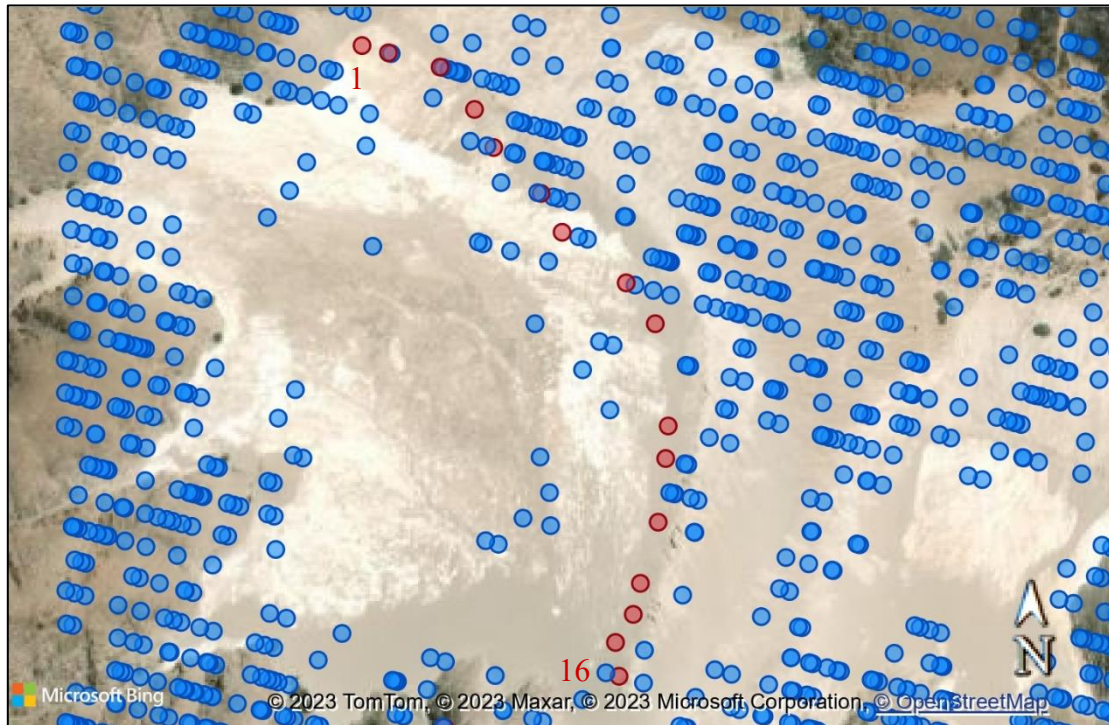


Figura 5-31: Depósito “Santa Laura 2”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-31 (señalados en rojo). En la Figura 5-32, se muestra la variación de deformación en LOS de los 16 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

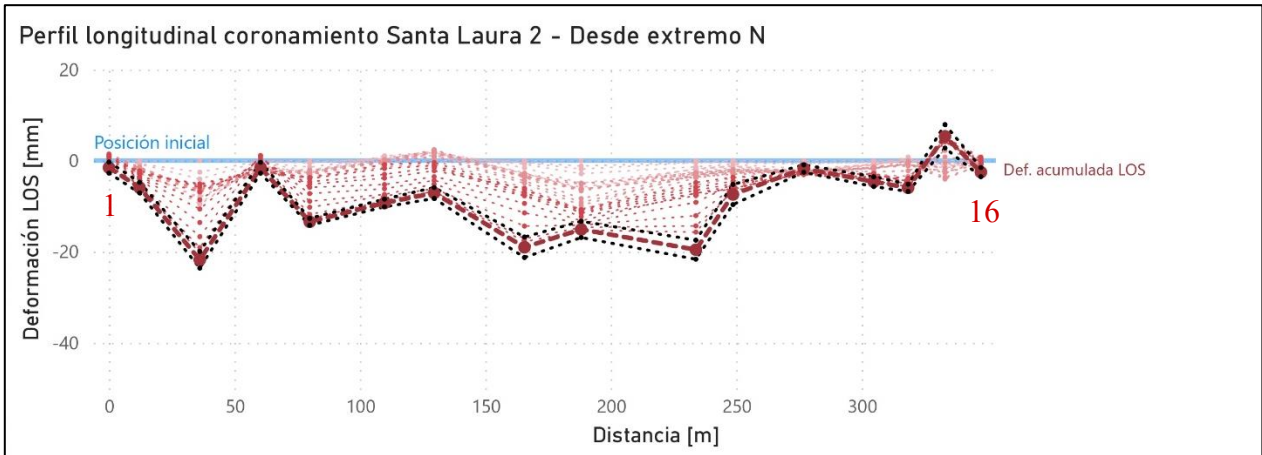


Figura 5-32: Depósito “Santa Laura 2”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-14 se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-14: Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-1.53	1.22	0.96
2	-5.93	1.17	0.97
3	-21.77	1.83	0.92
4	-1.57	1.20	0.96
5	-13.43	0.76	0.99
6	-9.31	0.85	0.98
7	-7.11	1.21	0.96
8	-19.02	2.25	0.89
9	-15.10	1.78	0.92
10	-19.56	2.09	0.91
11	-7.44	2.21	0.91

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
12	-1.74	0.82	0.98
13	-4.63	1.07	0.97
14	-5.97	0.80	0.98
15	5.33	2.57	0.87
16	-2.53	1.01	0.98

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Santa Laura 2”. Por la geometría del depósito, se estima que este punto está ubicado al centro del coronamiento, por lo que se utiliza el punto 9.

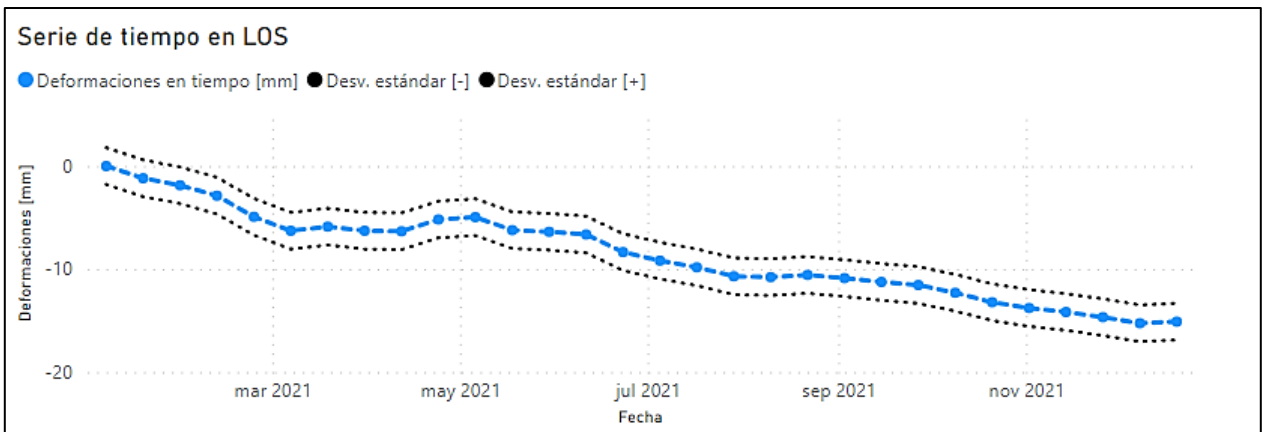


Figura 5-33: Depósito “Santa Laura 2”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 9), en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desv. Estándar es de 1.78 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.12. Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones verticales

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación verticales para el depósito “Santa Laura 2” se muestran en azul y rojo. Los rojos son los utilizados para medir deformaciones verticales en el coronamiento.

Como se explica en el Capítulo 3, se miden deformaciones verticales mediante la combinación de deformaciones en LOS ascendentes con descendentes en el software SARPROZ.



Figura 5-34: Depósito “Santa Laura 2”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones verticales de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-34 (señalados en rojo).

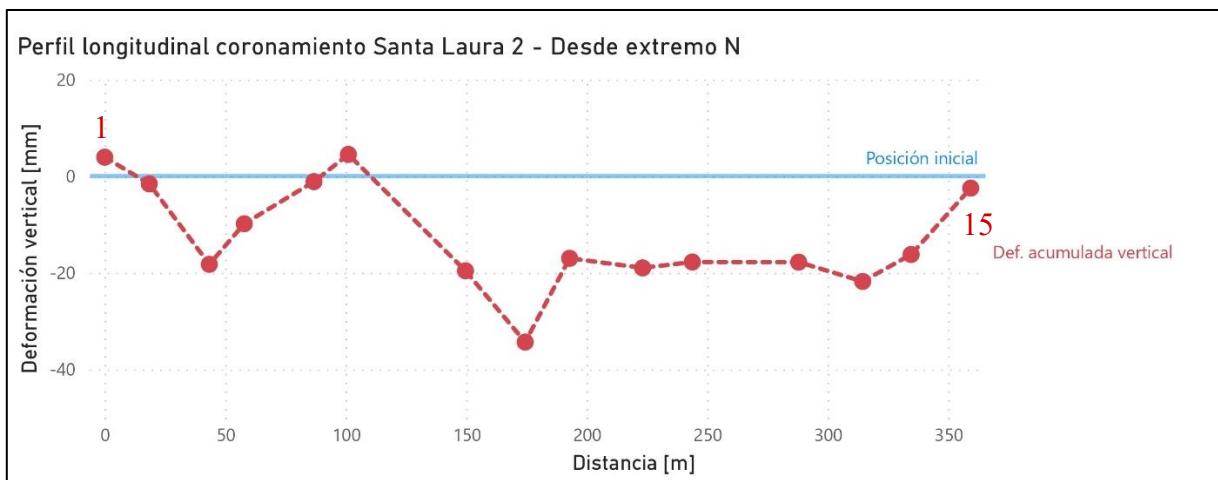


Figura 5-35: Depósito “Santa Laura 2”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Figura 5-35, se muestra la deformación acumulada de los puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm) hasta diciembre de 2021.

Tabla 5-15: Depósito “Santa Laura 2”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Vertical Acumulada [mm]	Coherencia temporal
1	3.93	0.95
2	-1.59	0.97
3	-18.24	0.85
4	-9.84	0.91
5	-1.13	0.90
6	4.50	0.94
7	-19.58	0.95
8	-34.33	0.89
9	-15.99	0.92
10	-18.99	0.88
11	-17.76	0.88
12	-17.79	0.90
13	-21.79	0.94
14	-16.21	0.93
15	-2.47	0.89

5.2.2.13. Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Desconocido” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-36. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS ascendentes en el coronamiento.



Figura 5-36: Depósito “Desconocido”: Puntos de medición en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-36 (señalados en rojo). En la Figura 5-37, se muestra la variación de deformación en LOS de los 6 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

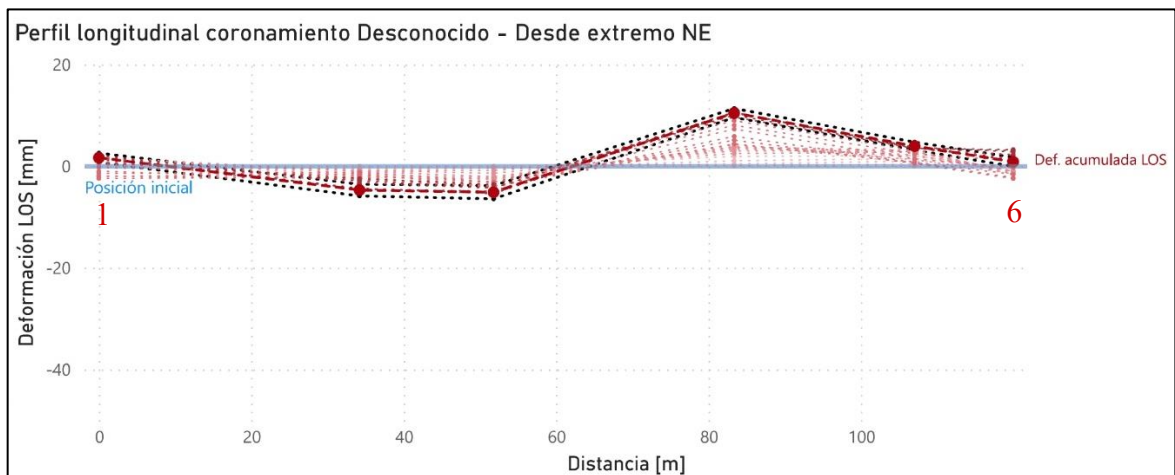


Figura 5-37: Depósito “Desconocido”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita ascendente. En líneas negras

punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-16 se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-16: Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita ascendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	1.66	0.92	0.98
2	-4.70	1.15	0.97
3	-5.13	1.30	0.96
4	10.47	0.89	0.98
5	3.95	0.78	0.99

Se mide la serie de tiempo LOS del punto que posee mayor altura del depósito “Desconocido”. Por la geometría del depósito es difícil saber la altura mayor. Se mide la altura en Google Earth, y se obtiene que los puntos ubicados al Sur tienen mayor elevación, así que se escoge el punto 5 para medir la serie de tiempo en LOS.

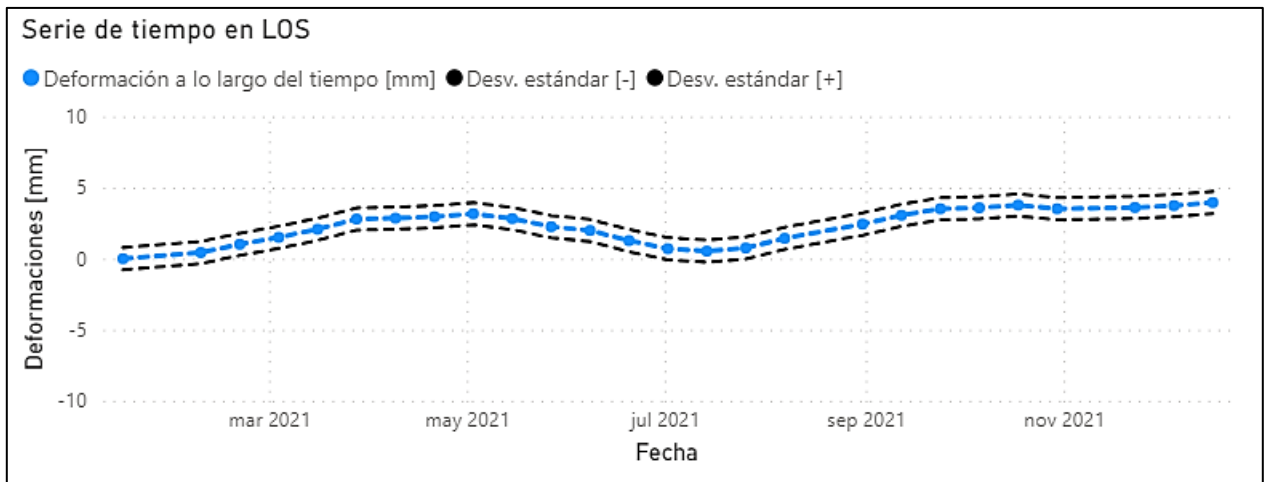


Figura 5-38: Depósito “Desconocido”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5), en órbita ascendente. En líneas negras segmentadas la desv. Estándar es de 0.78 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.14. Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS en órbita descendente

Los pixeles donde se obtienen medidas de deformación para el depósito “Desconocido” se muestran en azul y rojo en la Figura 5-39. Donde los rojos son los utilizados para medir deformaciones en LOS ascendentes en el coronamiento.

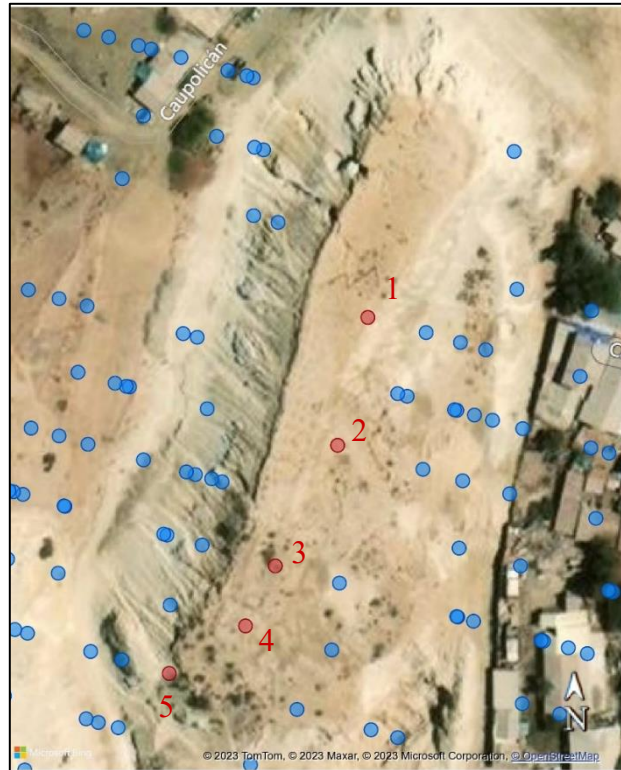


Figura 5-39: Depósito “Desconocido”: Puntos de medición en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones en LOS de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-39 (señalados en rojo). En la Figura 5-40, se muestra la variación de deformación en LOS de los 5 puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm). Cada línea segmentada de color rojo denota una fecha diferente, siendo la línea roja más oscura la deformación acumulada en diciembre de 2021. Las líneas en negro punteadas representan la desviación estándar de las mediciones.

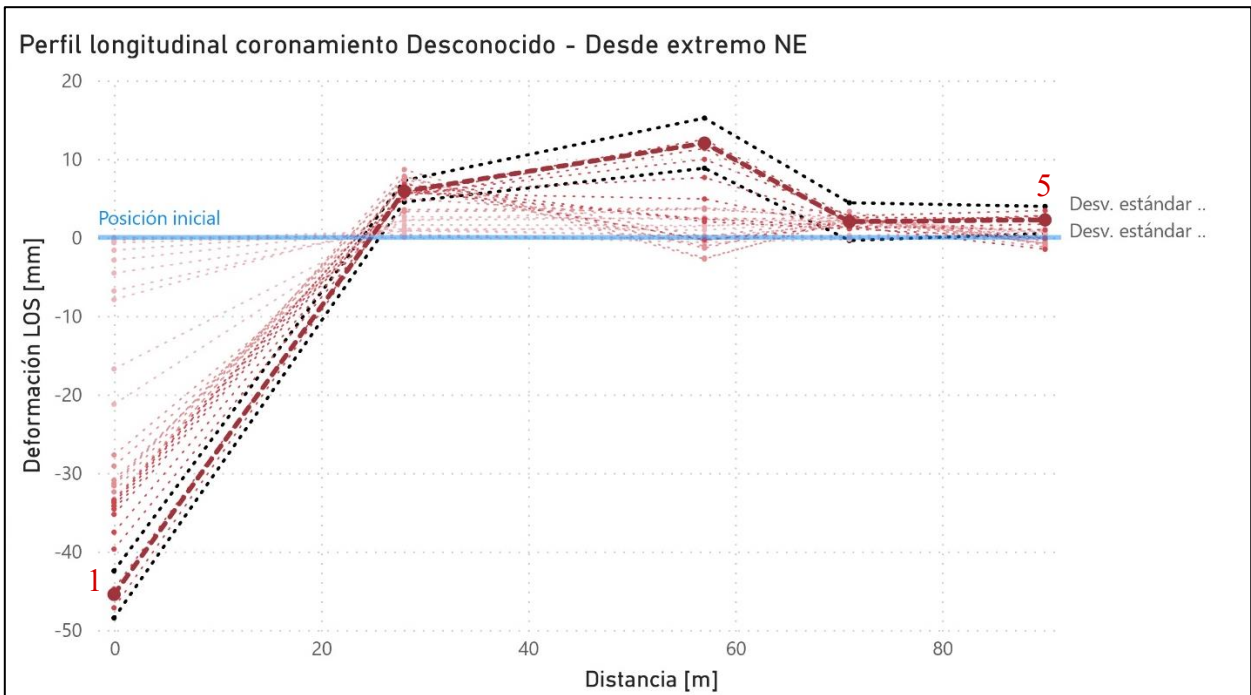


Figura 5-40: Depósito “Desconocido”: Deformación en LOS en perfil longitudinal del coronamiento desde enero 2021 hasta diciembre 2021, en órbita descendente. En líneas negras punteadas la desviación estándar de la deformación acumulada. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Tabla 5-17, se muestran los resultados de las deformaciones acumuladas en diciembre 2021.

Tabla 5-17: Depósito “Desconocido”: Deformaciones en LOS acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento, en órbita descendente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Acumulada [mm]	Desviación estándar [mm]	Coherencia temporal
1	-45.47	3.00	0.83
2	5.89	1.37	0.95
3	12.02	3.19	0.80
4	2.02	2.40	0.87
5	2.24	1.72	0.93

Se utiliza el punto 5 para la medición de la serie de tiempo en LOS, ya que su elevación es mayor.

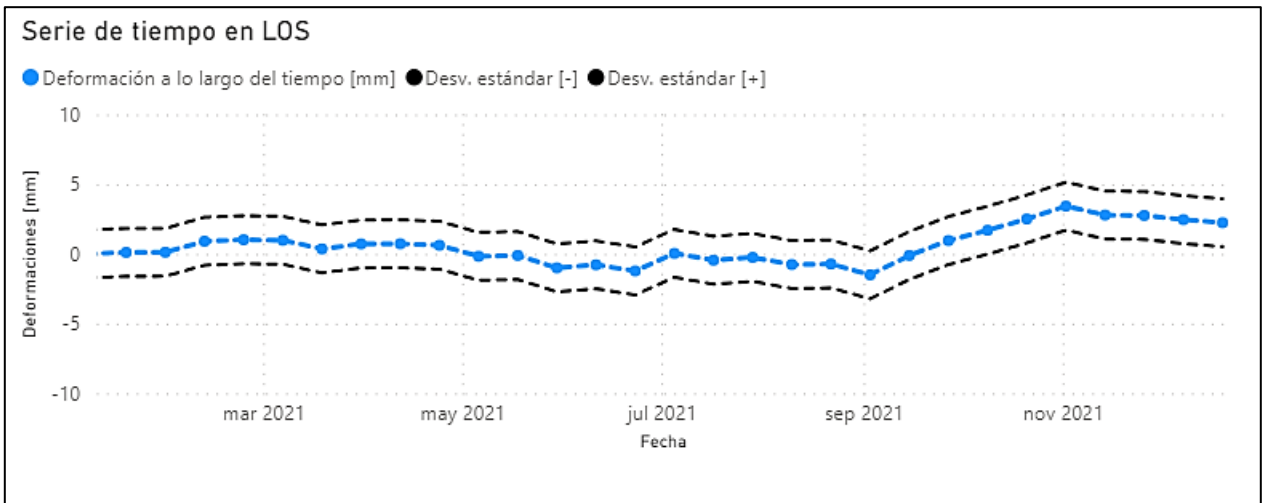


Figura 5-41: Depósito “Desconocido”: Serie de tiempo en LOS para el punto de máxima altura (Punto 5), en órbita descendente. En líneas negras segmentadas la desv. Estándar es de 1.72 mm.

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

5.2.2.15. Depósito “Desconocido”: Deformaciones verticales

Los píxeles donde se obtienen medidas de deformación verticales para el depósito “Desconocido” se muestran en azul y rojo. Los rojos son los utilizados para medir deformaciones verticales en el coronamiento.

Como se explica en el Capítulo 3, se miden deformaciones verticales mediante la combinación de deformaciones en LOS ascendentes con descendentes en el software SARPROZ.

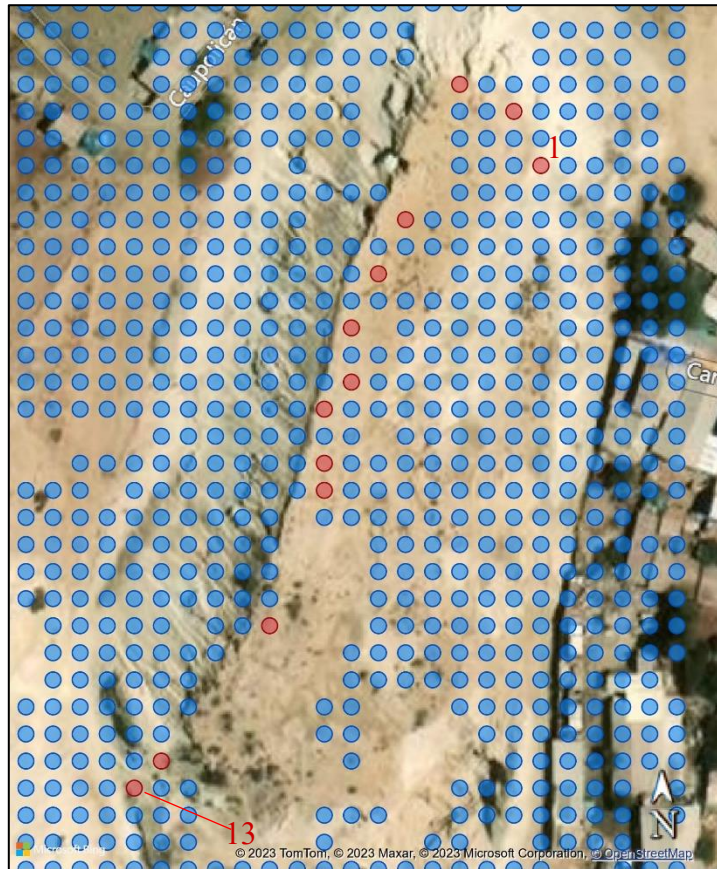


Figura 5-42: Depósito “Desconocido”: Puntos de medición al realizar combinación de órbita ascendente con órbita descendente. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Se grafican las deformaciones verticales de los puntos en el coronamiento de la Figura 5-42 (señalados en rojo).

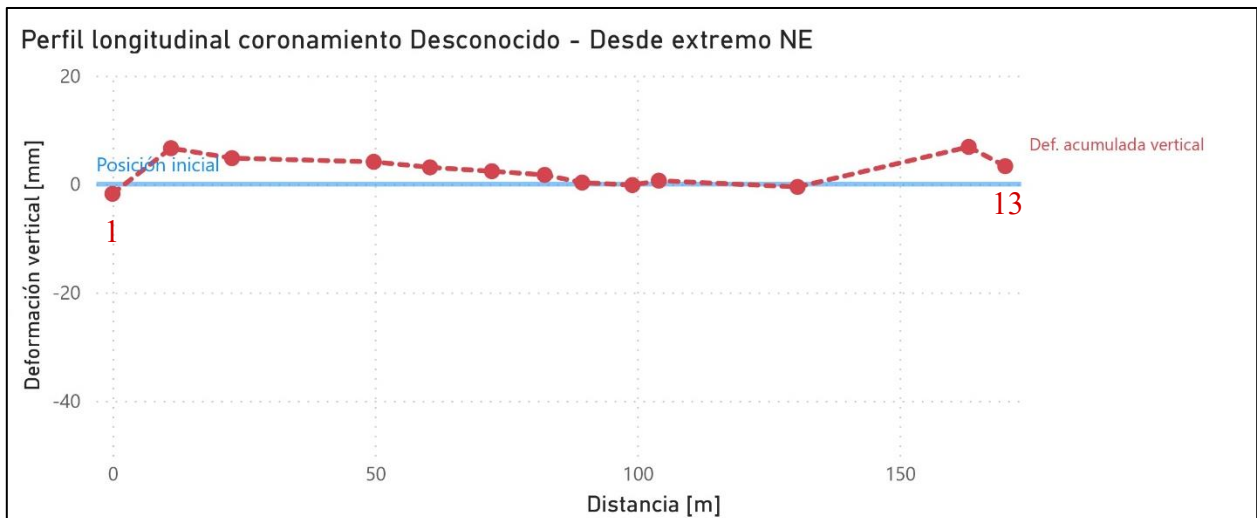


Figura 5-43: Depósito “Desconocido”: Deformación vertical acumulada en perfil longitudinal del coronamiento en diciembre de 2021. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

En la Figura 5-43 se muestra la deformación acumulada de los puntos en el coronamiento desde su posición inicial (línea en celeste en 0 mm) hasta diciembre de 2021.

Tabla 5-18: Depósito “Desconocido”: Deformaciones verticales acumuladas en diciembre 2021 en perfil longitudinal del coronamiento. Fuente: Elaboración propia.

ID	Def. Vertical Acumulada [mm]	Coherencia temporal
1	-1.79	0.86
2	6.63	0.85
3	4.79	0.92
4	4.11	0.84
5	3.09	0.85
6	2.38	0.88
7	1.70	0.92
8	0.28	0.95
9	-0.18	0.91
10	0.63	0.87
11	-0.52	0.86
12	6.86	0.86
13	3.31	0.93

5.3. Estimación de deformaciones en depósitos mediante método analítico

Como se menciona en el Capítulo 3 de esta tesis, se realizan estimaciones de deformación por compresión secundaria o creep de la sección más alta de muro de los cinco depósitos de relaves inactivos y abandonados justo después de su año de cierre. Los depósitos son: “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “Desconocido”.

5.3.1. Selección de parámetros de depósitos para el método analítico

Como se menciona en la Sección 3.6, se debe considerar la composición de los muros de los depósitos de relaves estudiados. Según las descripciones de cada uno en el Capítulo 4, cuatro de ellos son tranques de relaves y el restante es un embalse de relaves. De esta manera se adoptan valores del coeficiente de deformación secundaria C_{α} y de índice de vacíos e_0 para arenas y ripios

según ensayos edométricos o triaxiales, como los realizados en la Figura 3-13, Figura 3-14 y Figura 3-15.

Se utilizan los parámetros de suelo de la Tabla 5-19 para los tranques de relaves “Ojancos 2”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “Desconocido”.

Tabla 5-19: Coeficiente de deformación secundaria e índice de vacíos a utilizar para tranques de relaves. Fuente: Elaboración propia.

C_{α} [-]	e_0 [-]
0.001	0.48

Se utilizan los parámetros de suelo de la Tabla 5-20 para el embalse de relaves “Ojancos 1”.

Tabla 5-20: Coeficiente de deformación secundaria e índice de vacíos a utilizar para embalses de relaves. Fuente: Elaboración propia

C_{α} [-]	e_0 [-]
0.001	0.27

El tiempo t_p corresponde al tiempo en que el depósito estuvo operando hasta su cierre. El cierre coincide con el fin de las deformaciones por consolidación primaria y el comienzo de las deformaciones por compresión secundaria. Este valor se calcula como la diferencia entre la fecha de inicio de sus operaciones y su cierre. Estas fechas fueron obtenidas en Sernageomin (1989, 1990a, 1990b) y en el Plan de Cierre de Ojancos (CMC Sali Hochschild, 2009), a excepción del depósito “Desconocido”, del cual no se tiene registro.

Para el depósito “Desconocido”, se toma por supuesto que su periodo de operación fue menor en comparación con los otros depósitos debido a que es de una escala menor y se estimó que este operó antes de los 2000 por las imágenes observadas en Google Earth.

La altura de muro H_0 corresponde a la altura máxima medida cuando deja de operar el depósito. Para “Ojancos 1” y “Ojancos 2” es posible obtener esta magnitud del documento de Plan de Cierre de Ojancos (CMC Sali Hochschild, 2009), mientras que para los depósitos “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “Desconocido”, no se cuenta con tal información. Como alternativa se utilizan las medidas establecidas en el Catastro de depósitos, siendo estas las más recientes.

Las características de los depósitos junto con los valores de tiempo y altura por establecer para la medición de deformaciones por compresión secundaria se detallan en la Tabla 5-21.

Tabla 5-21: Tiempo hasta el cierre, altura inicial y periodos de operación de los depósitos de estudio. Fuente: Elaboración propia

Depósito	Ojancos 1	Ojancos 2	Santa Laura 1	Santa Laura 2	Desconocido
Tipo de depósito	Embalse de relaves	Tranque de relaves	Tranque de relaves	Tranque de relaves	Tranque de relaves
Período de operación	1936 – 1970	1970 – 1982	1984 – 2003	1984 – 2005	1972 – 1980 (*)
Tiempo en operación t_p [años]	34	12	19	21	8
Altura máxima H_0 [m]	31	30.6	76	70	4

*El período de operación del depósito “Desconocido” es un supuesto.

Se aplica la Ecuación (1) para la obtención de asentamientos por compresión secundaria considerando la información antes mencionada para un tiempo “t” que permita llegar al año 2021. Este es el año en el cual se miden las deformaciones superficiales con interferometría satelital.

5.3.2. Resultados de deformaciones por compresión secundaria en muros de depósitos de estudio para el método analítico

Según la metodología mencionada en el Capítulo 3, se obtienen las estimaciones de las deformaciones por compresión secundaria en el punto más alto del muro de cada depósito, justo después de su cierre.

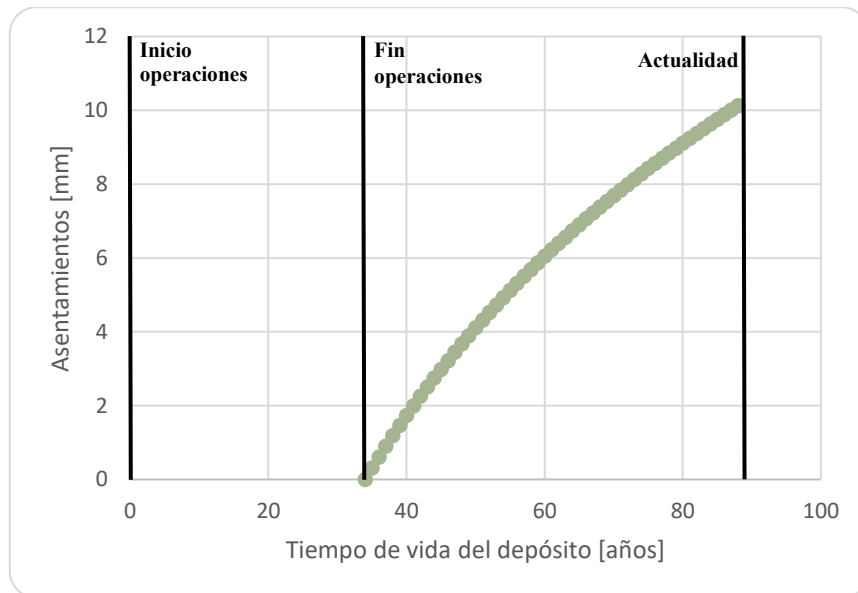


Figura 5-44: Depósito “Ojancos 1”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta de muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en la Figura 5-44, para el depósito “Ojancos 1”, al proyectar el avance de la deformación por compresión secundaria hasta el año 2023 se estima un asentamiento de 10 mm aproximadamente desde el fin de las operaciones.

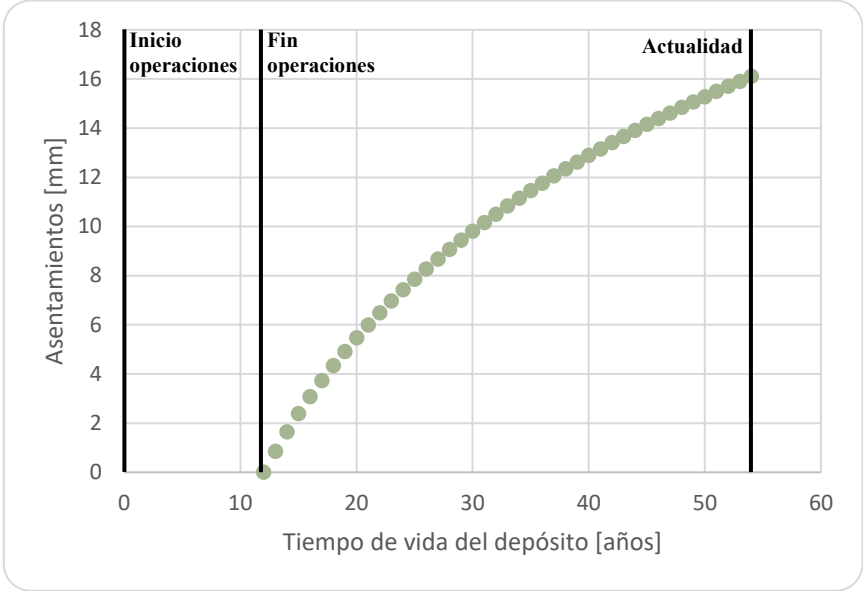


Figura 5-45: Depósito “Ojancos 2”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta de muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en la Figura 5-45, para el depósito “Ojancos 2”, al proyectar el avance de la deformación por compresión secundaria hasta el año 2023 se estima un asentamiento de 16 mm aproximadamente desde el fin de las operaciones.

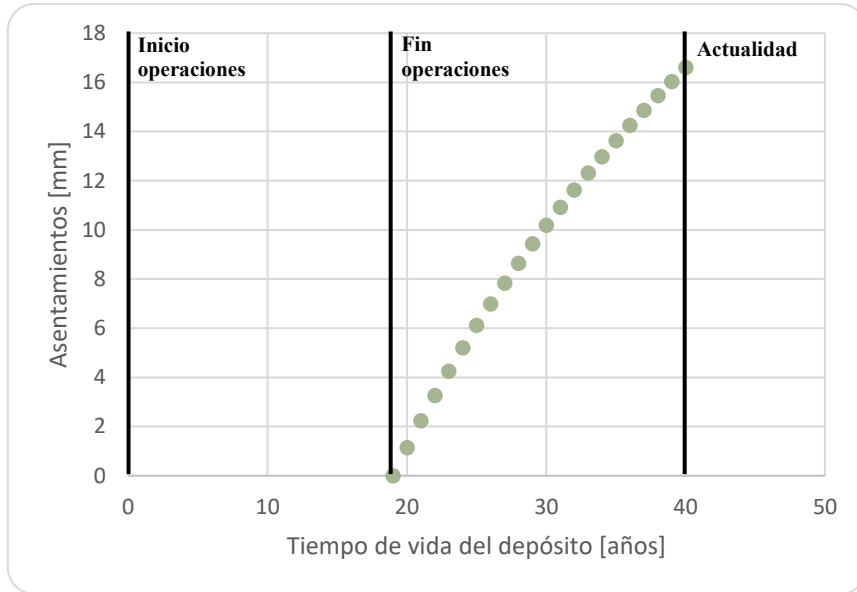


Figura 5-46: Depósito “Santa Laura 1”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta del muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en la Figura 5-46, para el depósito “Santa Laura 1”, al proyectar el avance de la deformación por compresión secundaria hasta el año 2023 se estima un asentamiento de 17 mm aproximadamente desde el fin de las operaciones.

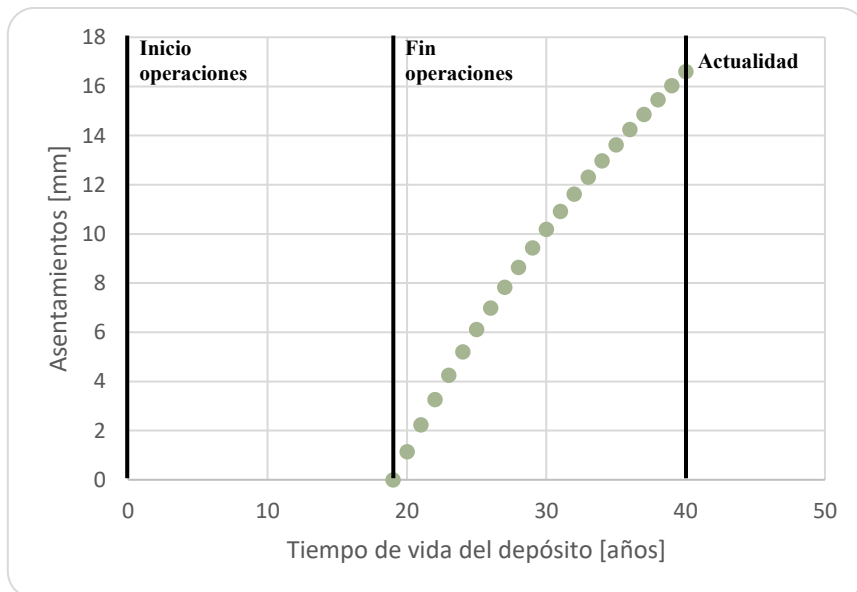


Figura 5-47: Depósito “Santa Laura 2”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria de sección más alta del muro desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en la Figura 5-47, para el depósito “Santa Laura 2”, al proyectar el avance de la deformación por compresión secundaria hasta el año 2023 se estima un asentamiento de 16.5 mm aproximadamente desde el fin de las operaciones.

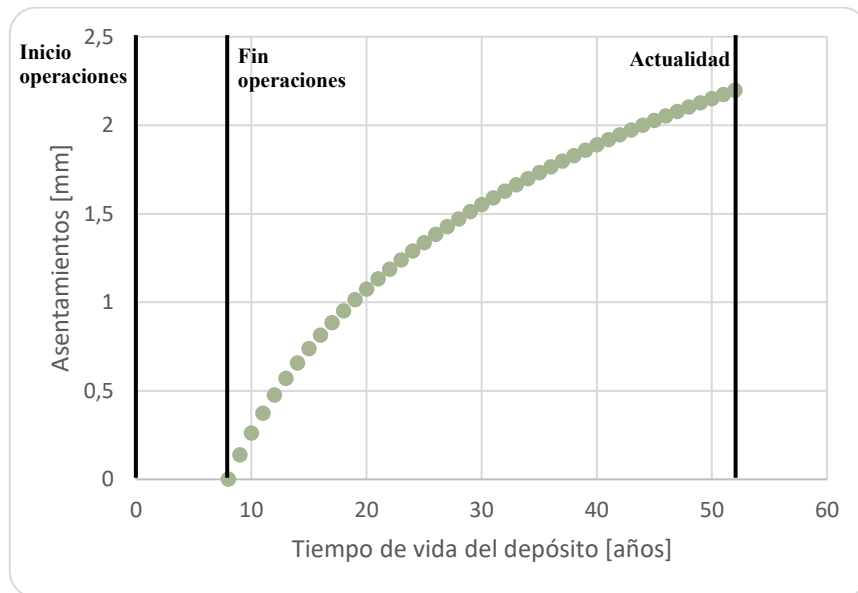


Figura 5-48: Depósito “Desconocido”: Estimación de asentamientos por compresión secundaria desde el cierre del depósito hasta la actualidad. Fuente: Elaboración propia

Bajo la suposición de que el depósito “Desconocido” operó por 8 años y finalizó sus operaciones en los años 80, se estima un asentamiento de 2.3 mm aproximadamente (Figura 5-48) desde el fin de las operaciones.

5.3.3. Resultados de deformaciones por compresión secundaria en muros de depósitos en el año 2021

Gracias a la obtención de las deformaciones por compresión secundaria en la sección anterior con la Ecuación (1), se obtiene el aumento de las deformaciones de la sección más alta de muro por cada año. De este modo, es posible estimar el asentamiento ocurrido en el año 2021 para las secciones más altas de muro de cada depósito, obteniendo la diferencia entre el asentamiento total estimado del año 2022 con el asentamiento total estimado del año 2021.

Tabla 5-22: Asentamiento por compresión secundaria estimada en el año 2021. Fuente: Elaboración propia

Depósito	Ojancos 1	Ojancos 2	Santa Laura 1	Santa Laura 2	Desconocido
Asentamiento [mm]	0.12	0.21	0.59	0.55	0.02

6 Análisis de resultados

6.1. Análisis del procedimiento de interferometría satelital

La revisión bibliográfica realizada permitió definir y comprender la interferometría satelital y sus derivados. Este conocimiento permitió la aplicación del método de medición de deformaciones superficiales en los coronamientos de los muros de los depósitos de estudio mediante la técnica PSI.

Según lo observado en la Tabla 5-4 hasta la Tabla 5-18, las medidas de deformaciones en LOS y verticales medidas mediante la técnica PSI de interferometría satelital son del orden de milímetros, lo cual concuerda con lo señalado en el Capítulo 2 acerca de que las técnicas de interferometría multitemporal, como lo son DInSAR y PSI, permiten obtener deformaciones superficiales milimétricas sobre la superficie terrestre.

Asimismo, se debe tener en cuenta los diferentes procedimientos realizados para la obtención de deformaciones. En el caso de los procedimientos realizados para la de obtención de deformaciones ascendentes y descendentes en los depósitos “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2”, “Ojancos 1” y “Ojancos 2”, se optó por utilizar la primera adquisición como imagen SAR principal, como se muestra en el Anexo C. Si bien se obtuvieron deformaciones con coherencias temporales elevadas, para mejorar los resultados en este caso donde se utiliza una combinación “STAR” de imágenes, se debe seleccionar como imagen SAR principal una que minimice la línea base normal y temporal (normal baseline y temporal baseline). En otras palabras, se debe seleccionar una imagen principal que se encuentre ubicada a la mitad del período de medición y acortando la línea base normal y temporal entre imágenes.

Para la obtención de resultados en el depósito “Desconocido”, se escogió como imagen principal una que permite obtener menores líneas base normales y temporales entre imágenes, según se observa en el Anexo C. De este modo, se evidencia que la coherencia entre imágenes para este depósito es más elevada en comparación a la coherencia obtenida para los depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”.

Por otro lado, se utilizó un punto GCP (requerido para el procedimiento PSI) con alta reflectividad e índice de estabilidad de amplitud, requisitos necesarios para asegurar un buen procedimiento. Sin embargo, hubo dificultades a la hora de escoger alguno que se encontrara sobre una estructura y que, a su vez, se mantuviera fijo en el tiempo, lo cual también es necesario asegurar en este método.

En depósitos de relaves activos el GCP debe ser además un punto que se encuentre lejos del depósito debido a que el agua en la cubeta produce puntos con menor coherencia, pero en depósitos inactivos y abandonados donde no hay laguna, el GCP escogido puede encontrarse cerca del depósito en estudio.

Para eliminar la fase topográfica se utilizó el DEM “SRTM90” que está por defecto en el software y que posee una resolución de 90 metros. Pudiera haberse utilizado un DEM de mayor precisión como lo es el DEM “SRTM30” de precisión de 30 metros.

Los píxeles o puntos sobre los cuales se mide deformación tienen un tamaño de 2.7 x 22 m hasta 3.5 x 22 m y permiten la medición de deformaciones en orden de magnitud milimétrica en estas zonas. Aunque este método es altamente sensible a cambios milimétricos en la superficie, los resultados podrían carecer de representatividad debido a que se considera la suma de contribuciones de deformación de todo los dispersores en un área significativa, como es el caso de un píxel. Sin embargo, para los depósitos de estudio esto no representa un problema ya que se miden las deformaciones en áreas donde solo hay superficie de suelo y no hay objetos que interfieran.

La precisión se mide a través de la coherencia temporal, la cual depende de la cantidad de interferogramas generados, la fase interferométrica (geometría del área, desplazamientos, perturbaciones atmosféricas y el ruido), de los baselines temporal y normal entre las imágenes SAR utilizadas y los parámetros de la señal utilizada.

Los puntos de deformación medidos mediante interferometría satelital en el coronamiento del muro de los depósitos de relaves de estudio presentan coherencias temporales mayores o iguales a 0.8. Donde una coherencia cercana a 1 corresponde a una mejor precisión y 0 a la peor precisión. De este modo, las deformaciones obtenidas en este estudio presentan una muy alta precisión.

6.2. Análisis de deformaciones por interferometría satelital

El software SARPROZ tiene la capacidad de medir deformaciones en la Línea de Observación del Satélite (LOS) a través del tiempo, gracias a esto es posible realizar series de tiempo en diferentes áreas u observar como el perfil longitudinal de un muro de depósito se deforman acercándose al satélite o alejándose de él.

Las deformaciones en LOS se componen de dos deformaciones en diferentes direcciones: deformación horizontal Este-Oeste y deformación vertical. Estas pueden ser calculadas de distintas formas, en esta tesis se nombran dos: mediante la Ecuación (12) y Ecuación (13) o mediante un software que pueda calcularlas automáticamente mediante el método de doble geometría. El software SARPROZ es capaz de medir ambas deformaciones, pero de forma acumulada a la última fecha (diciembre 2021) y no a través del tiempo.

Mediante la interpretación de los resultados de deformaciones en LOS de cada uno de los depósitos, es posible observar que las variaciones de deformaciones superficiales a lo largo del tiempo para cada uno de los depósitos se mantuvieron generalmente constantes, sin saltos significativos, a excepción de un punto específico del depósito “Desconocido” donde hubo un aumento en las variaciones en la primera mitad del año 2021. De este modo, los muros de los depósitos “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” parecieran mantenerse estables a lo largo del año 2021. En cambio, si bien la mayoría de los puntos del coronamiento del depósito “Desconocido” se observan estables, el punto del coronamiento ubicado más al Norte indicó inestabilidad el primer semestre del 2021, sin embargo, estas variaciones disminuyeron los últimos meses del año, por lo cual, el depósito se mantuvo estable el segundo semestre del 2021.

Las deformaciones en LOS de los puntos de coronamiento de “Ojancos 1” indican que estos puntos se hundieron y/o pudieron haberse movido hacia el Este u Oeste. Las deformaciones verticales

medidas confirman que hubo un hundimiento, sin embargo, las magnitudes de las deformaciones en algunos casos coinciden con las magnitudes de las desviaciones estándar por lo que no es muy claro que estos puntos se hayan movido. En caso de que si hubiera deformación es de 1 a 9 mm desde enero a diciembre de 2021.

Las deformaciones en LOS de los puntos de coronamiento de “Ojancos 2” indican que estos puntos, se hundieron y/o pudieron haberse movido hacia el Este u Oeste, las deformaciones verticales medidas confirman que hubo un hundimiento, sin embargo, las deformaciones en algunos casos coincidían con las desviaciones estándar de las medidas. De esta forma, los coronamientos en estos depósitos puede que no sufrieran deformaciones. En caso de que si hubiera deformación es de 1 a 11 mm desde enero a diciembre de 2021.

Las deformaciones en LOS de los puntos de coronamiento de “Santa Laura 1” indican que estos puntos, se hundieron y/o pudieron haberse movido hacia el Este u Oeste. Las deformaciones verticales medidas confirman que hubo un hundimiento, de esta forma, los coronamientos en estos depósitos se deformaron entre 1 a casi 30 mm desde enero a diciembre de 2021.

Las deformaciones en LOS de los puntos de coronamiento de “Santa Laura 2” indican que estos puntos, se hundieron y/o pudieron haberse movido hacia el Este u Oeste. Las deformaciones verticales medidas confirman que hubo un hundimiento, de esta forma, los coronamientos en estos depósitos se deformaron entre 1 a casi 40 mm desde enero a diciembre de 2021.

Las deformaciones en LOS de los puntos de coronamiento de “Desconocido” indican que estos puntos, se alzaron y/o pudieron haberse movido hacia el Este u Oeste. Las deformaciones verticales medidas confirman que hubo un alzamiento, de esta forma, los coronamientos en estos depósitos se deformaron entre 1 a 10 mm desde enero a diciembre de 2021, a excepción de un punto que se deformó 40 mm.

El hundimiento de los muros en los depósitos “Ojancos 1” y “Ojancos 2” no es del todo claro debido al error del método, pero en caso de presentarse alcanza valores de 11 mm de hundimiento con respecto a su posición inicial. Para “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2” el hundimiento es notorio. En “Santa Laura 1” se observan hundimientos de hasta 22 mm, en cambio para el depósito “Santa Laura 2” se observa un hundimiento de 35 mm. Ambos poseen excepciones en algunos puntos donde se miden alzamientos entre 2 y 5 mm. Para el depósito “Desconocido” se miden alzamientos en el muro de hasta 7 mm y puntos que no se hundieron ni se alzaron. De este modo, el coronamiento de este depósito pudo haberse alzado o mantenido en su posición inicial sin presentar deformación.

En resumen, mediante la medición de deformaciones en los cinco depósitos de relaves con interferometría satelital se observa que los depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2” poseen subsidencias dos o tres veces más grandes que las observadas en “Ojancos 1” y “Ojancos 2”, lo cual concuerda al ser estructuras de mayor dimensión. Para el depósito “Desconocido” se encontraron por el contrario alzamientos. De todas maneras, es necesario obtener las desviaciones estándar de estos valores para observar que tanto pueden variar estos valores.

Las posibles causas de las deformaciones en donde se presenta un hundimiento del perfil longitudinal del muro incluyen asentamientos en el depósito por compresión secundaria u otros fenómenos externos como el viento que produce las erosiones eólicas, el agua en el entorno que pueda filtrarse o precipitaciones que produzcan erosiones hídricas o a la actividad humana. En tanto que los alzamientos del perfil longitudinal del muro se deben a deformaciones causadas por fenómenos externos como acumulaciones de arena sobre el depósito debido al viento de la zona o a la intervención humana que pudiera provocar un ascenso del coronamiento.

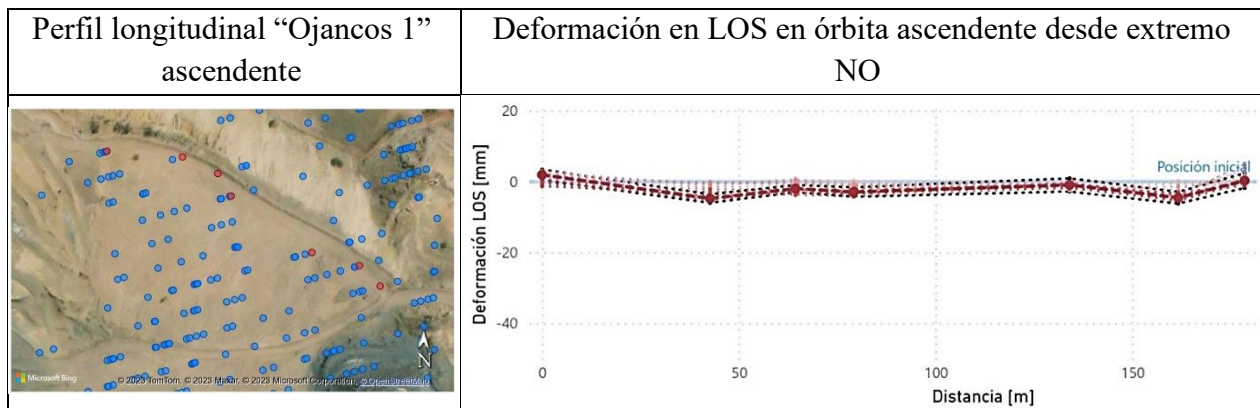
No es posible esclarecer los fenómenos que producen las deformaciones, para ello, es necesario obtener información de estaciones meteorológicas cercanas para obtener información de viento y precipitaciones. Además, se requieren de métodos de monitoreo in situ que permitan corroborar los datos obtenidos. Por otro lado, para observar si las deformaciones se producen a raíz de actividad humana es necesario obtener deformaciones de un conjunto de puntos que se concentren en el muro, y no solo del perfil longitudinal.

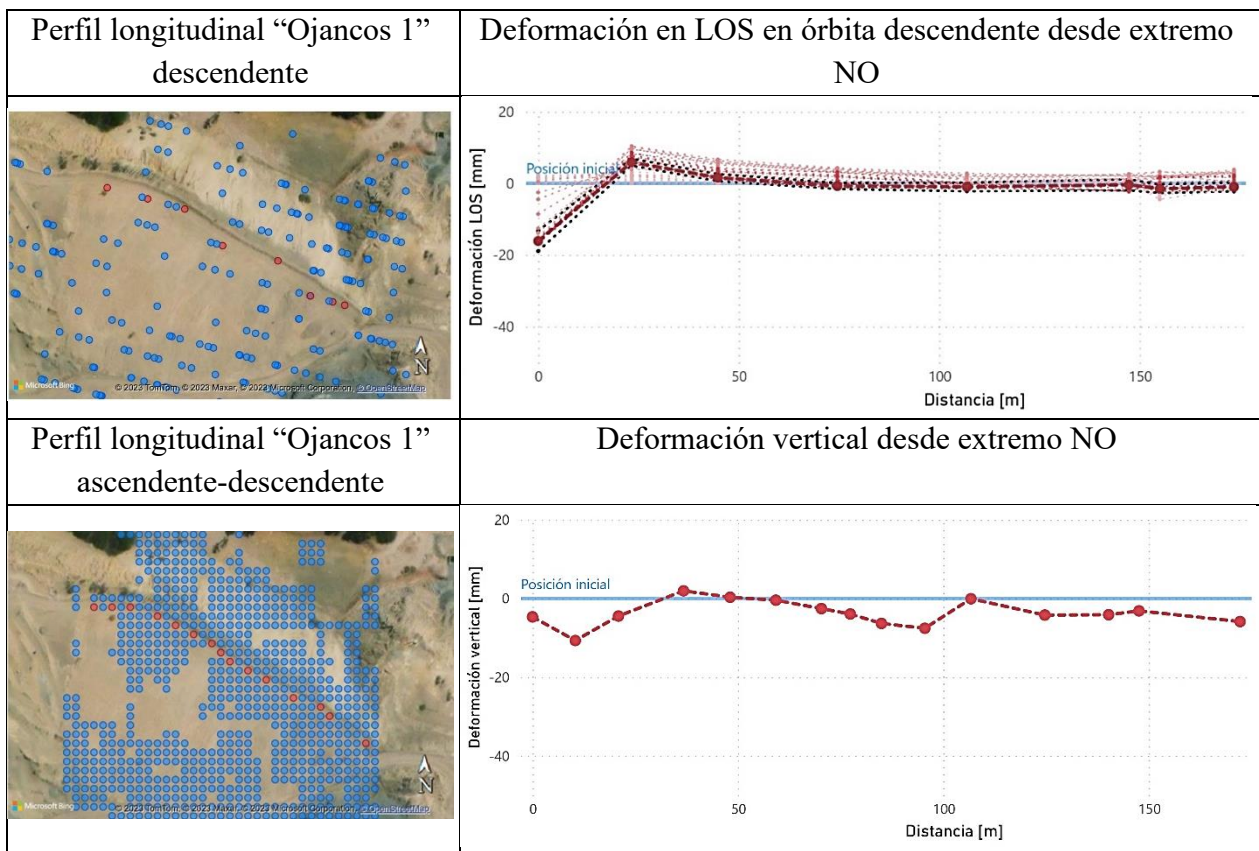
Las deformaciones medidas a su vez no superan el límite teórico establecido por la técnica. Si se consideran 30 imágenes utilizadas y una longitud de onda de 5.4 cm quiere decir que la máxima deformación medida es de 40 cm. De este modo, no se tienen deformaciones que superen los 40 cm.

6.2.1. Análisis de deformaciones en coronamiento de depósito “Ojancos 1”

Se presenta un resumen de los resultados de deformaciones para el perfil longitudinal del coronamiento del muro del depósito “Ojancos 1” para su discusión y análisis.

Tabla 6-1: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Ojancos 1”. Fuente: Elaboración propia





6.2.1.1. Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Según el resumen de la Tabla 6-1 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-4, se observa que la desviación estándar en algunos puntos es de la misma magnitud que los resultados de deformaciones acumuladas. Esto sugiere que a diciembre de 2021 los puntos se alejaron entre 2 mm y 5 mm del satélite (puntos 2, 4 y 6) y los puntos restantes no sufren deformación o podrían haberse acercado o alejado al satélite entre 1 mm y 3 mm (puntos 1, 3, 5 y 7).

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar saltos significativos, y se observó un distanciamiento de los puntos con el satélite desde enero a diciembre de 2021.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-6, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Ojancos 1” en órbita ascendente (punto 4), se observa que, desde enero de 2021 hasta octubre de 2021, el punto se aleja progresivamente del satélite. Sin embargo, desde octubre de 2021 hasta diciembre de 2021, se acerca al satélite, pero sin alcanzar a llegar a su posición inicial. Según se observa en la Tabla 5-4, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 2.92 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 1.32 mm y una coherencia temporal de 0.96. La alta coherencia temporal indica una considerable precisión en las mediciones de este punto.

6.2.1.2. Deformaciones en LOS en órbita descendente

Según el resumen de la Tabla 6-1 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-5, se observa que la desviación estándar en algunos puntos es de la misma magnitud que los resultados de deformaciones acumuladas. Esto sugiere que a diciembre de 2021 el punto 1 se alejó del satélite entre 13 mm y 18 mm, mientras el punto 2 se acercó al satélite entre 5 mm y 7 mm. Por otro lado, existen puntos (3, 4, 5, 6, 7 y 8) que no sufren deformación o podrían haberse aproximado o distanciado del satélite entre 1 mm y 2 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar cambios bruscos o significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil se acercan al satélite y, posteriormente, se alejan de él.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-9, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Ojancos 1” en órbita descendente (punto 4), se observa que, desde enero de 2021 hasta abril de 2021, el punto se mantiene prácticamente en su posición. Desde abril de 2021 hasta agosto de 2021, se acerca gradualmente al satélite, y desde agosto de 2021 hasta diciembre de 2021, se aleja del satélite hasta llegar a su posición inicial. Según se observa en la Tabla 5-5, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 0.74 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 0.83 mm y una coherencia temporal de 0.98. La alta coherencia temporal indica una considerable precisión en las mediciones de este punto.

6.2.1.3. Deformaciones verticales

En relación con las deformaciones verticales, el software SARPROZ no entrega desviaciones estándar, sin embargo, si se logran observar las coherencias temporales que indican la precisión de los resultados. Tampoco se entregan las deformaciones progresivamente a medida que pasa el tiempo, sino que se entregan las deformaciones verticales acumuladas en diciembre de 2021.

Según el resumen de la Tabla 6-1 y los valores detallados de deformaciones acumuladas en diciembre de 2021 en la Tabla 5-6, el punto 2 se hunde 11 mm. La mayoría de los puntos en el perfil se hunden entre 2 mm y 8 mm del satélite (puntos 1, 3, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15). Los puntos restantes se mantienen estables, se hunden o se alzan entre 1 mm y 2 mm (puntos 4, 5, 6 y 11). La precisión de los puntos es alta pues poseen coherencias temporales superiores a 0.8.

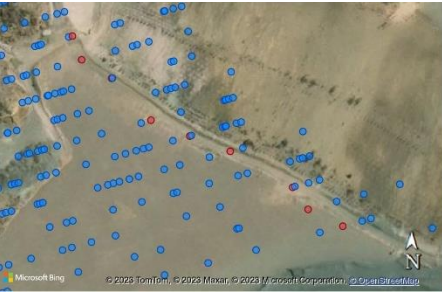
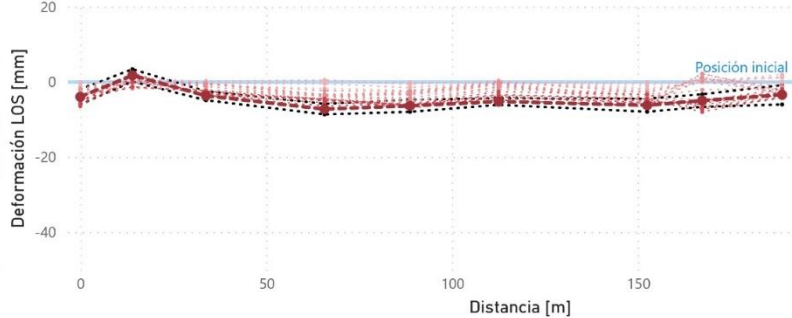

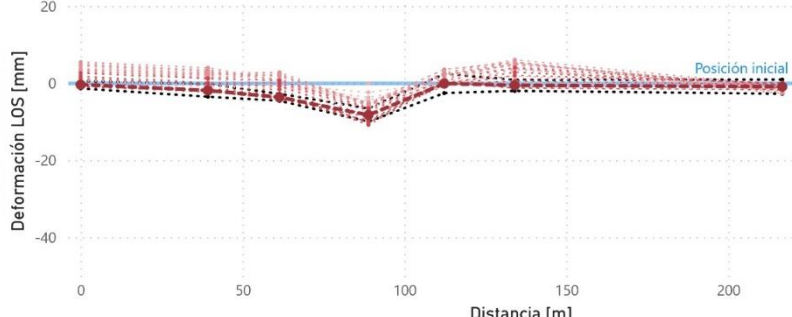

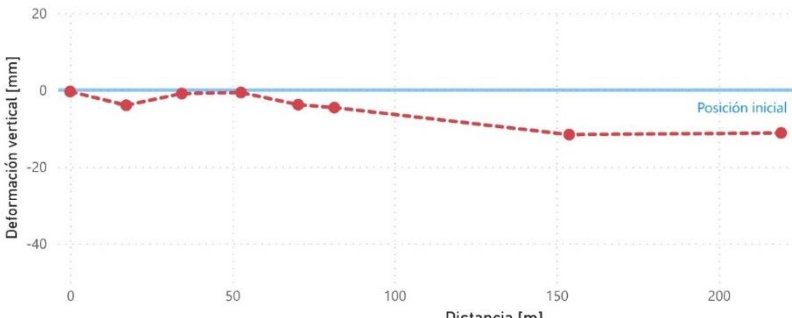
Las posibles causas de estas deformaciones en donde se presenta un hundimiento del perfil longitudinal del muro incluyen asentamientos en el depósito u otros fenómenos externos como las erosiones debido al viento, o al agua proveniente de precipitaciones o filtraciones, o a la actividad humana.

En la Tabla 5-6, el punto de mayor altura de muro en coronamiento (punto 9 o punto 10) muestra una deformación vertical negativa acumulada o hundimiento en diciembre de 2021 de 6.36 mm y 7.58 mm, con coherencias temporales significativas.

6.2.2. Análisis de deformaciones en depósito “Ojancos 2”

Se presenta un resumen de los resultados de deformaciones en el perfil longitudinal del coronamiento del muro del depósito “Ojancos 2” para su discusión y análisis.

Tabla 6-2: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia.

<p>Perfil longitudinal “Ojancos 2” ascendente</p>	<p>Deformación en LOS en órbita ascendente desde extremo NO</p>
	
<p>Perfil longitudinal “Ojancos 2” descendente</p>	<p>Deformación en LOS en órbita descendente desde extremo NO</p>
	
<p>Perfil longitudinal “Ojancos 2” ascendente-descendente</p>	<p>Deformación vertical desde extremo NO</p>
	

6.2.2.1. Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Según el resumen de la Tabla 6-2 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-7, se observa que la desviación estándar en algunos puntos es de la misma magnitud que los resultados

de deformaciones acumuladas. Esto sugiere que a diciembre de 2021 los puntos se alejaron entre 1 mm y 9 mm del satélite a excepción del punto 2 que no sufre deformación o podrían haberse acercado al satélite 4 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar saltos significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil se acercan al satélite y, posteriormente, se alejan de él.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-14, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Ojancos 2” en órbita ascendente (punto 6), se observa que, desde enero de 2021 hasta diciembre de 2021, el punto se aleja progresivamente del satélite. Según se observa en la Tabla 5-7, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 5.23 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 0.87 mm y una coherencia temporal de 0.98. La alta coherencia temporal indica una considerable precisión en las mediciones de este punto.

6.2.2.2. Deformaciones en LOS en órbita descendente

Según el resumen de la Tabla 6-2 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-8, se observa que la desviación estándar en algunos puntos es de la misma magnitud que los resultados de deformaciones acumuladas. Esto sugiere que a diciembre de 2021 el punto 3 se alejó del satélite entre 2 mm y 5 mm, mientras el punto 4 se alejó al satélite entre 5 mm y 10 mm. Por otro lado, existen puntos (1, 2, 5, 6 y 7) que no sufren deformación o podrían haberse aproximado o distanciado del satélite entre 1 mm y 3 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar cambios bruscos o significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil se acercan al satélite y, posteriormente, se alejan de él.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-17, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Ojancos 2” en órbita descendente (punto 5), se observa que, desde enero de 2021 hasta abril de 2021, el punto se mantiene prácticamente en su posición. Desde abril de 2021 hasta junio de 2021, se acerca gradualmente al satélite, y desde junio de 2021 hasta octubre de 2021, se aleja del satélite hasta llegar prácticamente a su posición inicial la cual se mantuvo hasta diciembre de 2021. Según se observa en la Tabla 5-8, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 0.06 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 0.86 mm y una coherencia temporal de 0.86. La alta coherencia temporal si bien es confiable indica que este punto pudo haberse mantenido en su posición o haberse alejado o acercado al satélite por 3 mm.

6.2.2.3. Deformaciones verticales

Según el resumen de la Tabla 6-2 y los valores detallados de deformaciones acumuladas en diciembre de 2021 en la Tabla 5-9, los puntos 2, 5 y 6 muestra un hundimiento de aproximadamente 4 mm, los puntos 7 y 8 se hunden 11 mm aproximadamente. Mientras que otros puntos se mantienen estables, se hunden o se alzan entre 1 mm y 2 mm (puntos 1, 3 y 4). La precisión de los puntos es alta pues poseen coherencias temporales superiores a 0.8. Cabe destacar que la coherencia temporal para los puntos 7 y 8 es fiable, sin embargo, es más baja que las de los demás puntos, lo que indica una alta variabilidad en los resultados.

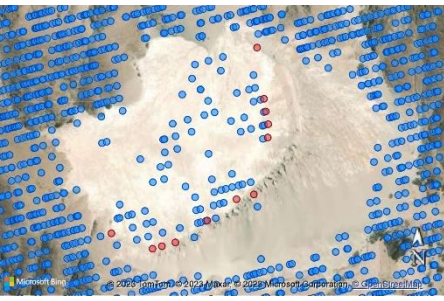
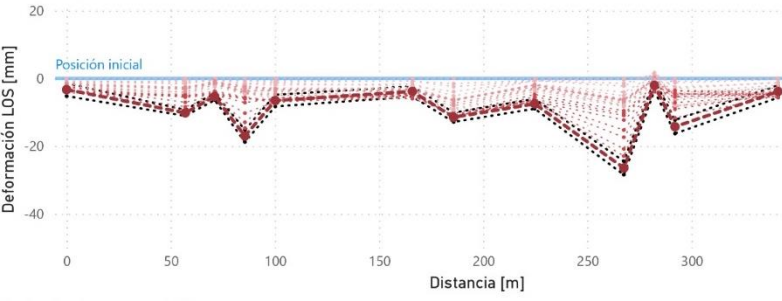
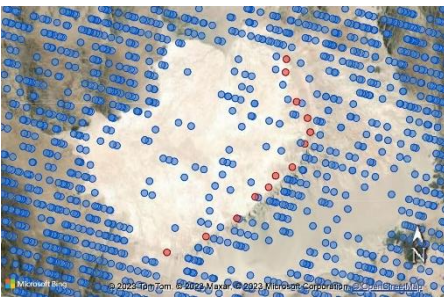
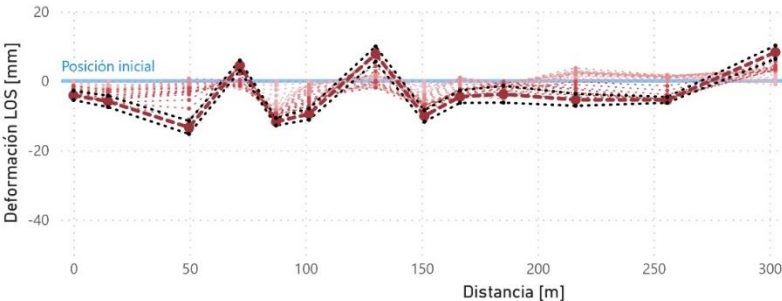

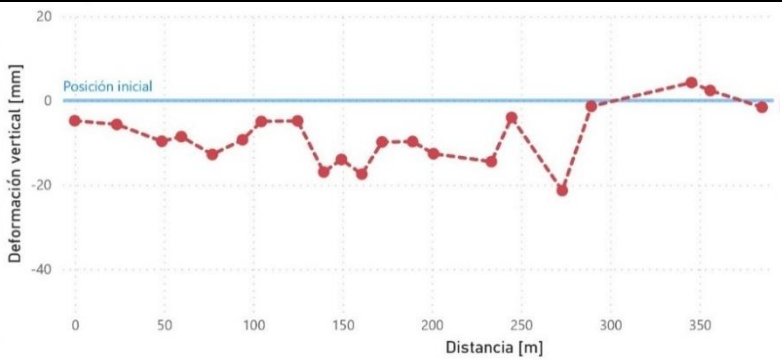
En la Tabla 5-9, el punto de mayor altura de muro en coronamiento (punto 5) muestra un hundimiento acumulado en diciembre de 2021 de 3.81 mm, con coherencia temporal de 0.88.

Las posibles causas de estas deformaciones en donde se presenta un hundimiento del perfil longitudinal del muro incluyen asentamientos en el depósito u otros fenómenos externos como las erosiones debido al viento, o al agua de precipitaciones o filtraciones, o actividad humana.

6.2.3. Análisis de deformaciones en depósito “Santa Laura 1”

Se presenta un resumen de los resultados de deformaciones en un perfil longitudinal del coronamiento del muro del depósito “Santa Laura 1” para su discusión y análisis.

Tabla 6-3: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Santa Laura 1”. Fuente: Elaboración propia.

<p>Perfil longitudinal “Santa Laura 1” ascendente</p>	<p>Deformación en LOS en órbita ascendente desde extremo N</p>
	
<p>Perfil longitudinal “Santa Laura 1” descendente</p>	<p>Deformación en LOS en órbita descendente desde extremo N</p>
	
<p>Perfil longitudinal “Santa Laura 1” ascendente-descendente</p>	<p>Deformación vertical desde extremo N</p>
	

6.2.3.1. Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Según el resumen de la Tabla 6-3 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-10, a diciembre de 2021, se observa que la mayoría de los puntos experimenta un distanciamiento con respecto al satélite. Los puntos 1, 6 y 12 mostraron un alejamiento de entre 1 mm y 6 mm, mientras que los puntos 2, 3, 5 y 8 registraron distancias mayores entre 4 mm y 11 mm. Además, los puntos 4 y 11 evidenciaron deformaciones más pronunciadas entre 12 mm y 19 mm y el punto 9 se alejó notoriamente, alcanzando entre 24 y 28 mm. Cabe destacar que, a pesar de que el punto 2 indica un distanciamiento de 2.05 del satélite, su desviación estándar de igual magnitud sugiere la posibilidad de que este punto haya permanecido inmóvil.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar saltos significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil principalmente se alejan del satélite.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-22, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Santa Laura 1” en órbita ascendente (punto 5), se observa que, desde enero de 2021 hasta diciembre de 2021, el punto se aleja progresivamente del satélite. Según se observa en la Tabla 5-10, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 16.99 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 1.79 mm y una coherencia temporal de 0.93. La alta coherencia temporal indica una alta precisión en las mediciones de este punto.

6.2.3.2. Deformaciones en LOS en órbita descendente

Según el resumen de la Tabla 6-3 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-11 hasta diciembre de 2021, se observa que la mayoría de los puntos presenta un distanciamiento con respecto al satélite. Los puntos 1, 2, 9, 10, 11 y 12 mostraron un alejamiento del satélite entre 1 mm y 8 mm, mientras que los puntos 3, 5, 6, 8 y 13 registraron distancias más pronunciadas entre 5 mm y 16 mm. Por otro lado, el punto 4 se acerca al satélite entre 2 mm a 6 mm, y el punto 7 también se acercó al satélite con distancias entre 5 mm a 10 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar cambios bruscos o significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil se alejan del satélite, a excepción de los dos puntos que se acercan al satélite.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-25, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Santa Laura 1” en órbita descendente (punto 6), se observa que desde enero de 2021 hasta diciembre de 2021 se aleja gradualmente del satélite. Según se observa en la Tabla 5-11, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 9.53 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 1.64 mm y una coherencia temporal de 0.94. La alta coherencia temporal indica una alta precisión en las mediciones de este punto.

6.2.3.3. Deformaciones verticales

Según el resumen de la Tabla 6-3 y los valores detallados de deformaciones acumuladas en diciembre de 2021 en la Tabla 5-12, se observan principalmente hundimientos en el perfil, pero en diferentes magnitudes. Los puntos que presentan hundimientos: Los puntos 18 y 21 se deforman entre 1 mm y 2 mm, los puntos 1, 2, 7, 8, 16 se deforman entre 4 mm y 6 mm, los puntos 3, 4, 6,

12 y 13 se deforman entre 12 mm y 15 mm, los puntos 5, 10, 14 y 15 se deforman entre 12 mm y 15 mm y los puntos 9, 11 y 17 muestran deformaciones más significativas entre 16 mm y 22 mm. Los puntos que presentan alzamientos: los puntos 19 y 20 se deforman entre 2 mm y 4 mm. Es relevante destacar que la alta precisión de los puntos se refleja en sus coherencias temporales superiores a 0.86.

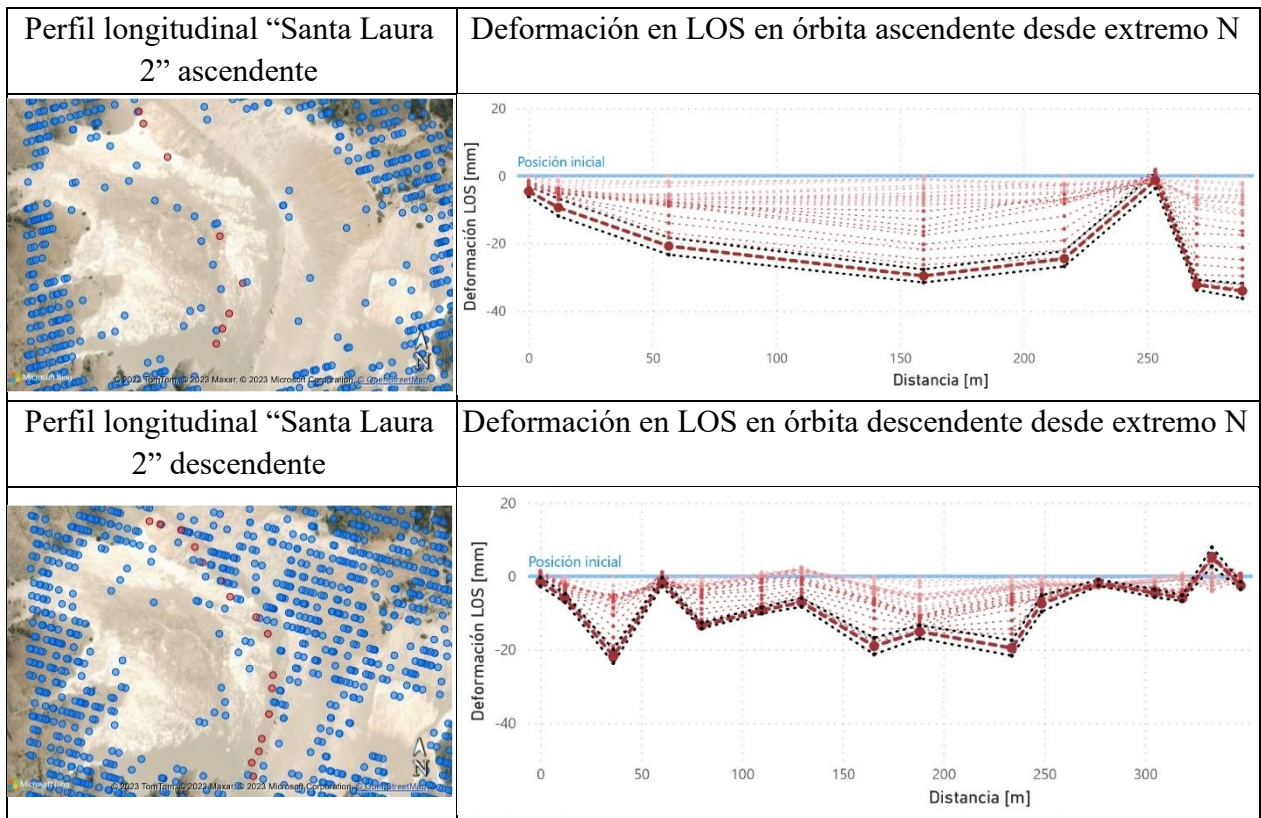
En la Tabla 5-12, el punto de mayor altura de muro en coronamiento (punto 9) muestra una deformación vertical negativa o hundimiento en diciembre de 2021 de 16.96 mm, con coherencia temporal de 0.95.

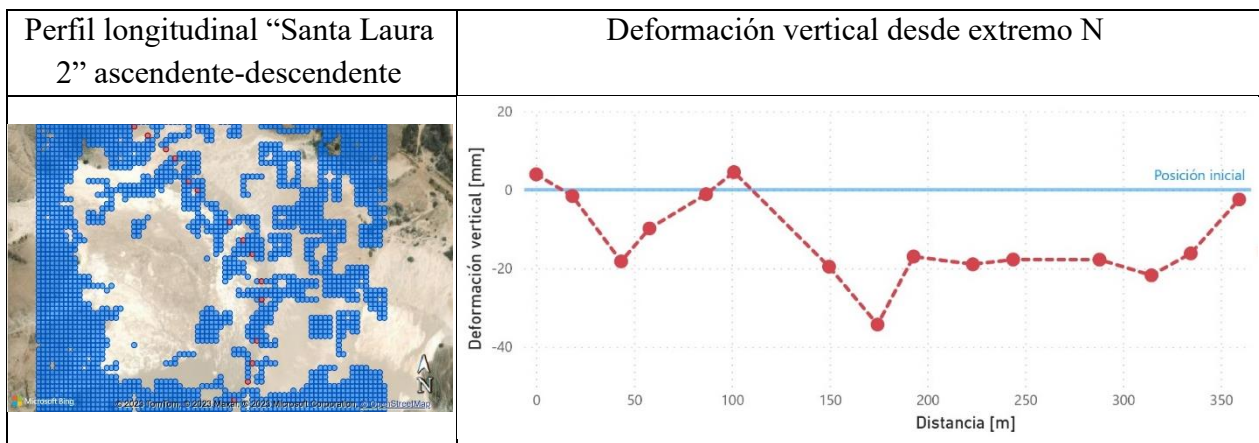
Las posibles causas de estas deformaciones en donde se presenta un hundimiento del perfil longitudinal del muro incluyen asentamientos en el depósito u otros fenómenos externos como las erosiones debido al viento, o al agua proveniente de precipitaciones o filtraciones, o a la actividad humana.

6.2.4. Análisis de deformaciones en depósito “Santa Laura 2”

Se presenta un resumen de los resultados de deformaciones en un perfil longitudinal del coronamiento del muro del depósito “Santa Laura 2” para su discusión y análisis.

Tabla 6-4: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia.





6.2.4.1. Deformaciones en LOS en órbita ascendente

Según el resumen de la Tabla 6-4 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-13, a diciembre de 2021, se observa que la mayoría de los puntos experimenta un distanciamiento con respecto al satélite. El punto 1 muestra un distanciamiento entre 3 mm y 6 mm, el punto 2 muestra un distanciamiento entre 7 mm y 11 mm, el punto 6 podría alejarse una distancia de 4 mm, acercarse al satélite en 1 mm o permanecer en su posición, mientras que los demás puntos se alejaron en magnitudes entre 18 mm y 36 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar saltos significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil principalmente se alejan del satélite.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-30, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Santa Laura 2” en órbita ascendente (punto 4), se observa que, desde enero de 2021 hasta diciembre de 2021, el punto se aleja progresivamente del satélite. Según se observa en la Tabla 5-13, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 29.64 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 1.93 mm y una coherencia temporal de 0.91. La alta coherencia temporal indica una alta precisión en las mediciones de este punto.

6.2.4.2. Deformaciones en LOS en órbita descendente

Según el resumen de la Tabla 6-4 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-14 hasta diciembre de 2021, se observa que la mayoría de los puntos presenta un distanciamiento con respecto al satélite. Los puntos 1, 4, 9, 12 y 16 se mantuvieron en su posición o mostraron un alejamiento del satélite de hasta 3 mm, mientras que los puntos 2, 7, 11, 13 y 14 registraron distancias más pronunciadas entre 2 mm y 8 mm. Los puntos 3, 5, 6, 8, 9, 10 presentaron deformaciones más pronunciadas entre 8 y 24 mm. Por otro lado, el punto 15 muestra una deformación de acercamiento al satélite entre 2 mm y 8 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar cambios bruscos o significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que los puntos del perfil se alejan del satélite, a excepción del punto 15 el cual primero se aleja del satélite y luego se acerca.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-33, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Santa Laura 1” en órbita descendente (punto 9), se observa que desde enero de 2021 hasta diciembre de 2021 se aleja gradualmente del satélite. Según se observa en la Tabla 5-14, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 15.10 mm alejándose del satélite, con una desviación estándar de 1.78 mm y una coherencia temporal de 0.92. La alta coherencia temporal indica una alta precisión en las mediciones de este punto.

6.2.4.3. Deformaciones verticales

Según el resumen de la Tabla 6-4 y los valores detallados de deformaciones acumuladas en diciembre de 2021 en la Tabla 5-15 se observan principalmente deformaciones negativas o hundimientos en el perfil, pero en diferentes magnitudes. Los puntos que presentan hundimientos: Los puntos 2, 5 y 15 se deforman entre 1 mm y 3 mm, el punto 4 se deforma entre 9 y 10 mm, los puntos 3, 7, 9, 10, 11, 12, 13 y 14 se deforman entre 15 mm y 22 mm y el punto 8 se deforma 35 mm aproximadamente. Los puntos que presentan alzamientos: los puntos 1 y 6 se deforman entre 3 mm y 5 mm. Es relevante destacar que la alta precisión de los puntos se refleja en sus coherencias temporales superiores a 0.85.

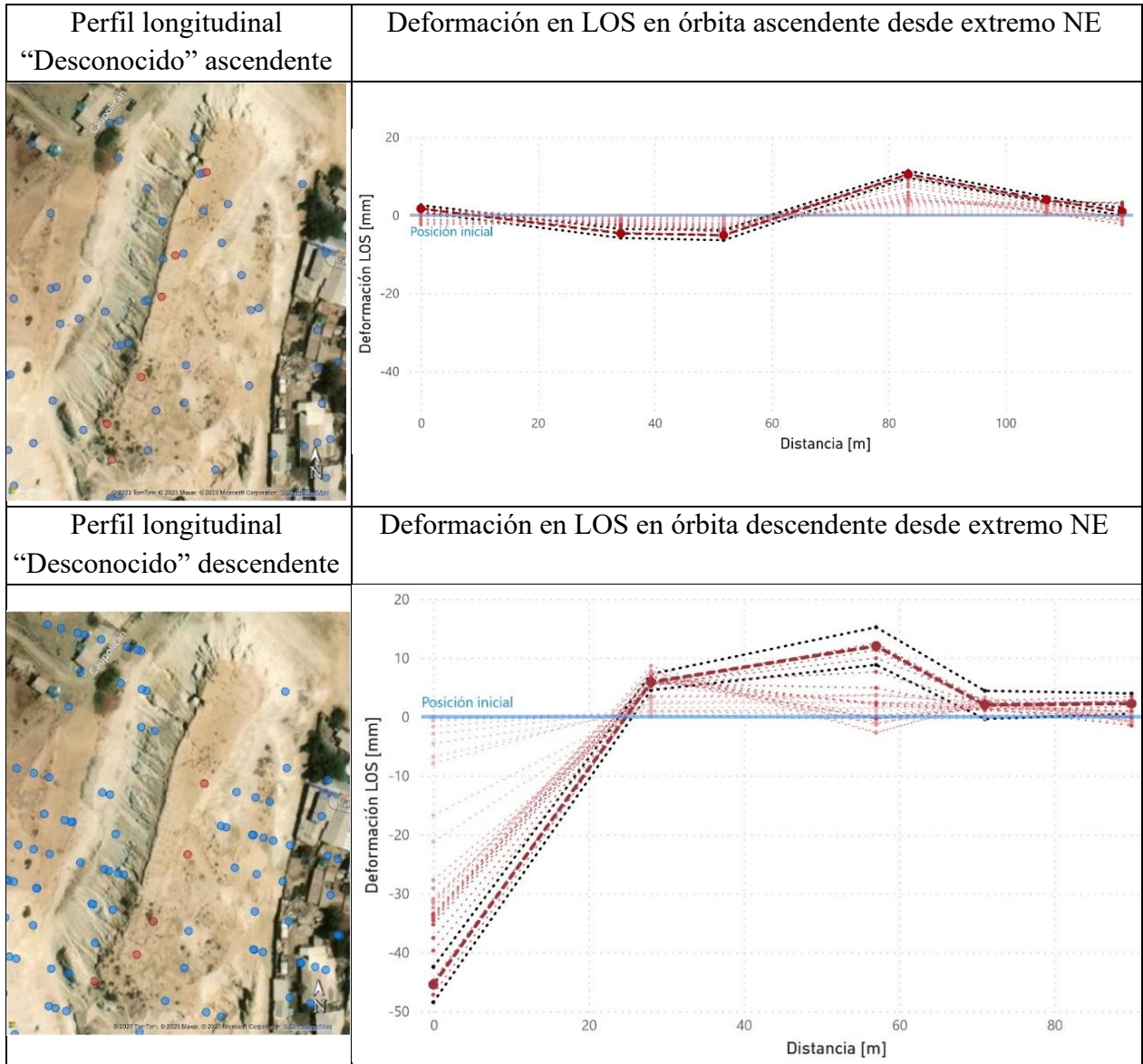
En la Tabla 5-15, la mayor altura de muro en el coronamiento se encuentra entre los puntos 8 y 9, los cuales muestran hundimientos en diciembre de 2021 de 34.33 y 15.99 mm, con coherencia temporal de 0.89 y 0.92, respectivamente.

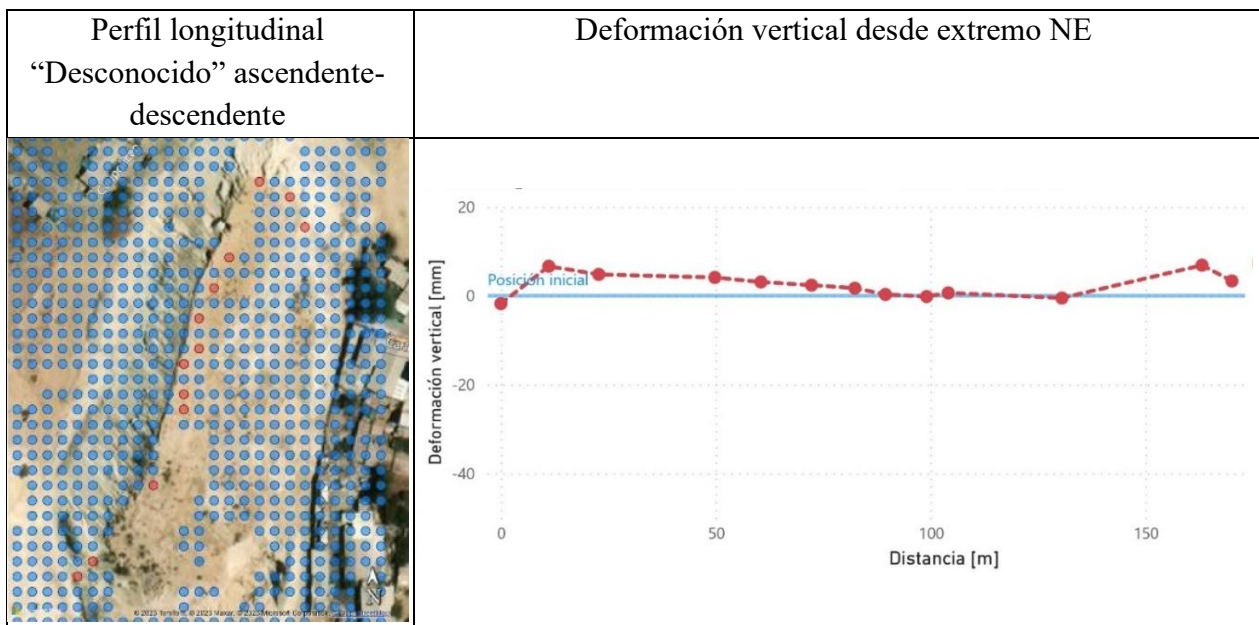
Las posibles causas de estas deformaciones en donde se presenta un hundimiento del perfil longitudinal del muro incluyen asentamientos en el depósito u otros fenómenos externos como las erosiones debido al viento, o al agua proveniente de precipitaciones o filtraciones, o a la actividad humana.

6.2.5. Análisis de deformaciones en depósito “Desconocido”

Se presenta un resumen de los resultados de deformaciones en un perfil longitudinal del coronamiento del muro del depósito “Desconocido” para su discusión y análisis.

Tabla 6-5: Resumen de resultados de deformación en perfil longitudinal de coronamiento de “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia.





6.2.5.1. Deformaciones LOS en órbita ascendente

Según el resumen de la Tabla 6-5 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-16, a diciembre de 2021, se observa que el punto 1 se acerca al satélite entre 1 mm y 3 mm aproximadamente, los puntos 2 y 3 se alejan del satélite entre 3 mm y 7 mm, el punto 4 se acerca la satélite entre 9 mm y 12 mm, el punto 5 se acerca entre 3 mm y 5 mm y el punto 6 se mantiene en su posición inicial. Las coherencias temporales alcanzan los valores de 0.96, teniendo los resultados una gran precisión.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo, sin mostrar saltos significativos. Durante el período de enero a diciembre de 2021, se observa que el punto 1 del perfil se aleja y luego se acerca al satélite, los puntos 2 y 3 se alejan del satélite, los puntos 4 y 5 se acercan al satélite y el punto 6 primero se aleja, luego se acerca al satélite y luego vuelve a alejarse para mantenerse en el punto inicial.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-38, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Desconocido” en órbita ascendente (punto 5), se observa que, desde enero de 2021 hasta julio de 2021, el punto se acerca al satélite y luego se aleja para llegar a su posición inicial, de julio de 2021 a diciembre de 2021, el punto vuelve a acercarse al satélite. Según se observa en la Tabla 5-16, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 3.95 mm acercándose al satélite, con una desviación estándar de 0.78 mm y una coherencia temporal de 0.99. La alta coherencia temporal indica una alta precisión en las mediciones de este punto.

6.2.5.2. Deformaciones LOS en órbita descendente

Según el resumen de la Tabla 6-5 y los valores detallados de deformaciones en la Tabla 5-17 hasta diciembre de 2021, se observa que la mayoría de los puntos presenta un acercamiento al satélite. Los puntos 2 y 3 registraron acercamientos entre 4 mm y 15 mm, los puntos 4 y 5, se mantuvieron

en su posición inicial o se acercaron al satélite hasta 3 mm y el punto 1 presenta un distanciamiento con respecto al satélite entre 42 mm y 48 mm.

Las variaciones de deformación se mantuvieron constantes a lo largo del tiempo a excepción del punto 1 ubicado más al Norte, el cual mostró un aumento en las variaciones de deformación el primer semestre del año 2021 alejándose del satélite, lo cual podría evidenciar una inestabilidad en este período. El punto 2 se acerca al satélite a intervalos constantes, y los puntos 3, 4 y 5 primero se alejan y luego se acercan al satélite.

En relación con la serie de tiempo en LOS de la Figura 5-41, para el punto de mayor altura de muro en el coronamiento del depósito “Desconocido” en órbita descendente (punto 5), se observa que desde enero de 2021 hasta septiembre de 2021 este se mantiene en su posición original para luego acercarse al satélite de septiembre 2021 a diciembre de 2021. Según se observa en la Tabla 5-17, la deformación acumulada hasta diciembre de 2021 es de 2.24 mm acercándose al satélite, con una desviación estándar de 1.72 mm y una coherencia temporal de 0.93. La alta coherencia temporal indica una alta precisión en las mediciones de este punto.

6.2.5.3. Deformaciones verticales

Según el resumen de la Tabla 6-5 y los valores detallados de deformaciones acumuladas en diciembre de 2021 en la Tabla 5-18, se observan principalmente puntos en su posición inicial y alzamientos en los extremos. Los alzamientos alcanzan los 7 mm. Es relevante destacar que la alta precisión de los puntos se refleja en sus coherencias temporales superiores a 0.85, por lo cual, los resultados son fiables.

En la Tabla 5-18, se observa que la máxima altura de muro en el coronamiento se encuentra en el punto 12 el cual muestra un alzamiento de 6.86 mm en diciembre de 2021, con coherencia temporal de 0.94.

Los alzamientos de los puntos del perfil longitudinal pueden deberse a deformaciones causadas por fenómenos externos como acumulaciones de arena sobre el depósito debido al viento de la zona o a la intervención humana que pudiera provocar un ascenso del coronamiento.

6.3. Análisis de deformaciones por método analítico

Los muros de depósitos de relaves arenosos y de ripios como los de “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1”, “Santa Laura 2” y “Desconocido” no experimentan consolidación primaria, como podrían presentar muros conformados por materiales arcillosos. Si se considera además que están inactivos y abandonados, la única deformación a la que se encuentran sujeta es a la compresión secundaria.

De este modo, para la realización del método analítico, se emplea la Ecuación (1) de estimación de deformaciones por compresión secundaria. Aunque se logra estimar deformaciones es importante mencionar que los parámetros de suelo utilizados en este método se obtienen de diferentes estudios de suelos arenosos y ripios chilenos, realizados por Carmi (2013), Ossess (2019) y Wachtendorff (2015). Esto se realiza debido a que no se han realizado ensayos triaxiales y ensayos edométricos específicos para muestras de muro en los depósitos de estudio.

Es importante señalar que, debido a la falta de definición de coeficientes de deformación secundaria en ripios chilenos, debido a la escasez global de máquinas triaxiales gigantes, se utiliza la constante de deformación secundaria empleada en arenas, sin embargo, se debe tener en cuenta que el coeficiente para ripios es inferior al observado en arenas y suelos finos.

La falta de información real de los depósitos de estudio acerca de índices de vacíos y coeficientes de deformación secundaria, junto con la realización de supuestos respecto a los períodos de operación del depósito “Desconocido” debido a la escasez de datos precisos sobre el mismo, contribuye a la imprecisión de las estimaciones realizadas.

En cuanto a los resultados de este método analítico, es posible estimar asentamientos por compresión secundaria de los cinco depósitos de relaves, abarcando el período desde su término de operaciones hasta el presente año. Hay especial interés en la deformación estimada en el año 2021, debido a que se busca realizar una comparación con los resultados de deformaciones obtenidos mediante el método de interferometría satelital para ese año. Se estima para el año 2021 que el depósito “Desconocido” presentó el menor asentamiento por compresión secundaria, registrando un valor de 0.02 mm, mientras que el depósito “Santa Laura 1” presentó el mayor asentamiento, alcanzando los 0.59 mm.

El término de operaciones del depósito “Ojancos 1” ocurre antes que los otros cinco depósitos de estudio, por lo que comienza a deformarse antes que los demás. Como resultado, la deformación ocurrida en el año 2021 para este depósito es menor que en los depósitos “Ojancos 2”, “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”. Las deformaciones estimadas para el depósito “Ojancos 1” en comparación con aquellas estimadas para el depósito “Ojancos 2”, son diferentes pese a que ambos tienen la misma altura de muro, ya que sus períodos de operación son distintos.

Otro factor que influye en la magnitud de la deformación estimada es el tamaño del muro. Por ejemplo, el depósito de relaves “Desconocido”, con una altura de muro de 4 m, diez veces menor que el promedio entre los depósitos de estudio, presenta una deformación durante el año 2021

prácticamente nula, tomando como supuesto que el fin de sus operaciones es entre los años 1970 y 1980.

Los depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2” poseen la mayor variación anual de deformación al año 2021, esto concuerda ya que poseen las alturas de muro más considerables y, además, sus fechas de cierre o término de operaciones fueron en los años 2000. Es decir, son más recientes en comparación a los otros depósitos.

Se verifica que el depósito “Desconocido”, con la menor altura de muro de 4 m, exhibe la menor deformación en comparación con los demás depósitos. Del mismo modo, se observa que el depósito con mayor altura de muro, en este caso, Santa Laura 1 con una altura de 76 m, presenta estimaciones de deformación mayores.

De las curvas de compresión secundaria (Figura 5-44, Figura 5-45, Figura 5-46, Figura 5-47 y Figura 5-48) se observa que los depósitos de relaves están en etapas tempranas de deformación, pues las curvas aún no llegan a estabilizarse. Se espera que las variaciones de deformaciones entre un año y el siguiente disminuyan a medida que avanza el tiempo.

6.4. Comparación entre resultados obtenidos mediante interferometría satelital y mediante método analítico

El objetivo de esta sección es comparar las deformaciones medidas en los puntos de mayor altura de muro y ver si estas deformaciones coinciden.

La diferencia entre las estimaciones de deformaciones mediante el método analítico y el método interferométrico pueden atribuirse a la precisión de ambos métodos y, por otro lado, a fenómenos externos que generen deformaciones detectadas por el método interferométrico.

Como se mencionó al principio de este capítulo, faltaron parámetros de suelo reales de cada depósito para el método analítico. En cuanto al método interferométrico, a pesar de las altas coherencias temporales de los resultados, estas pueden mejorarse utilizando imágenes SAR principales que acorten las líneas base normal y temporal para el caso de los depósitos “Ojancos 1”, “Ojancos 2”, “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”. No obstante, es importante señalar que la precisión de este método aún puede ser afectada por la presencia de ruido.

Considerando que las deformaciones por compresión secundaria se encuentran generalmente en el orden de magnitud de milímetros, el método PSI al medir también en milímetros puede medir estos cambios. Sin embargo, dado que esta técnica también tiene una precisión milimétrica, el error podría ser alto en comparación con las deformaciones estimadas por compresión secundaria. En otras palabras, el error del método interferométrico no es lo suficientemente pequeño para deformaciones en rango milimétrico como lo son las deformaciones por compresión secundaria en estos casos.

A continuación, se realiza una comparación entre la deformación vertical medida mediante el método analítico con la medida mediante el método interferométrico del punto de mayor altura sobre el coronamiento.

Deformaciones en depósito “Ojancos 1”

El punto de mayor altura de muro en el coronamiento muestra un hundimiento acumulado en diciembre de 2021 de 7 mm aproximadamente medido con interferometría satelital, con coherencia temporal significativa. Este punto registra la mayor deformación en el perfil longitudinal, lo cual coincide con lo esperado ya que, a mayor altura de suelo, mayor debe ser la deformación en ese punto por peso propio de la estructura, en este caso, un muro de depósito de relaves. Sin embargo, este punto presenta una deformación considerablemente mayor que la estimada mediante el método analítico. En este último método se estimó que el punto de mayor altura se asienta 0.12 mm (Tabla 5-22) por compresión secundaria.

La diferencia de magnitudes entre ambas deformaciones podría deberse a la falta de parámetros de suelo reales para el método analítico, al ruido que puede afectar la precisión del método interferométrico o a fenómenos externos que causen otro tipo de deformaciones. Estas pueden ser erosiones eólicas o hídricas producto del viento o precipitaciones, o a la actividad humana.

Deformaciones en depósito “Ojancos 1”

El punto de mayor altura de muro en el coronamiento muestra un hundimiento acumulado en diciembre de 2021 de 3.81 mm, medido con interferometría satelital, con coherencia temporal de 0.88. Este punto no representa ser uno con la mayor deformación en el perfil longitudinal como debiera serlo debido a que posee la mayor altura de suelo, debido al efecto del peso propio de la estructura. Por otro lado, este punto presenta una deformación considerablemente mayor que la estimada mediante método analítico. En este último método se estimó que el punto de mayor altura se asienta 0.21 mm (Tabla 5-22) por compresión secundaria.

La diferencia de magnitudes entre ambas deformaciones podría deberse a la falta de parámetros de suelo reales para el método analítico, al ruido que puede afectar la precisión del método interferométrico o a fenómenos externos que causen otro tipo de deformaciones. Estas pueden ser erosiones eólicas o hídricas producto del viento o precipitaciones, o a la actividad humana.

Deformaciones en depósito “Santa Laura 1”

El punto de mayor altura de muro en el coronamiento muestra un hundimiento en diciembre de 2021 de 16.96 mm, medido con interferometría satelital, con coherencia temporal de 0.95. Este punto registra una de las mayores deformaciones en el perfil longitudinal, lo cual coincide con lo esperado ya que, a mayor altura de suelo, mayor debe ser la deformación en ese punto por peso propio de la estructura. Sin embargo, este punto presenta una deformación considerablemente mayor que la estimada mediante método analítico. En este último método se estimó que el punto de mayor altura se asienta 0.59 mm (Tabla 5-22) por compresión secundaria.

La diferencia de magnitudes entre ambas deformaciones podría deberse a la falta de parámetros de suelo reales para el método analítico, al ruido que puede afectar la precisión del método interferométrico o a fenómenos externos que causen otro tipo de deformaciones. Estas pueden ser erosiones eólicas o hídricas producto del viento o precipitaciones, o a la actividad humana.

Deformaciones en depósito “Santa Laura 2”

El punto mayor altura de muro en el coronamiento muestra un hundimiento en diciembre de 2021 de 20 mm aproximadamente, medido con interferometría satelital, con coherencia temporal entre 0.89 y 0.92, respectivamente. Este punto registra una las mayores deformaciones en el perfil longitudinal, lo cual coincide con lo esperado ya que, a mayor altura de suelo, mayor debe ser la deformación en ese punto por peso propio de la estructura. Sin embargo, este punto presenta una deformación considerablemente mayor que la estimada mediante método analítico. En este último método se estimó que el punto de mayor altura se asienta 0.55 mm (Tabla 5-22) por compresión secundaria.

La diferencia de magnitudes entre ambas deformaciones podría deberse a la falta de parámetros de suelo reales para el método analítico, al ruido que puede afectar la precisión del método interferométrico o a fenómenos externos que causen otro tipo de deformaciones. Estas pueden ser erosiones eólicas o hídricas producto del viento o precipitaciones, o a la actividad humana.

Deformaciones en depósito “Desconocido”

El punto de mayor altura de muro en el coronamiento muestra un alzamiento de 6.86 mm en diciembre de 2021, medido con interferometría satelital, con coherencia temporal de 0.94. Es importante destacar que dado que las deformaciones que pueden presentar los depósitos de relaves arenosos son asentamientos por compresión secundaria (sin incluir fenómenos externos) y la pequeña altura de muro que este depósito presenta, todos los puntos debieran haber experimentado hundimientos de baja magnitud.

La elevación del punto de mayor altura del muro difiere a lo estimado mediante método analítico donde se estima que el punto de mayor altura se asienta 0.02 mm (Tabla 5-22) por compresión secundaria. Esto puede deberse a la falta de información de parámetros de suelo reales para realizar el método analítico, al ruido que puede afectar la precisión del método interferométrico, o debido a fenómenos externos que causen otro tipo de deformación.

Es posible que dada la pequeña magnitud de deformación que este depósito puede presentar en el año 2021, el método PSI haya captado que los puntos del coronamiento se mantienen en su misma posición. Por otro lado, las elevaciones de los puntos del perfil longitudinal pueden deberse a deformaciones causadas por fenómenos externos como acumulaciones de arena sobre el depósito debido al viento de la zona o que haya habido una movilización de tierra producto de la intervención humana que provoque un ascenso del coronamiento.

Es importante destacar además que, si bien el método analítico no es del todo preciso por la falta de información de parámetros de suelos del depósito en estudio, el depósito “Desconocido” es el que presenta menor altura de muro y en el año 2000 se encontraba inactivo. Por lo cual, es posible inferir que este depósito es el que presenta los asentamientos más pequeños en comparación con los demás.

7 Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Conclusiones

Dado que mediante el método analítico se estimaron deformaciones milimétricas en las secciones más altas de los muros de los cinco depósitos de estudio, y posteriormente, a través de la información proporcionada por el satélite Sentinel-1B se midieron deformaciones milimétricas en sus coronamientos con el método PSI de interferometría satelital utilizando el software SARPROZ, se concluye que ambos métodos son comparables. Por ende, se sugiere que el método de interferometría satelital PSI resulta útil para medir deformaciones superficiales milimétricas a lo largo del tiempo en muros de depósitos de relaves inactivos y abandonados.

La amplia disponibilidad de información satelital desde el año 2015 hasta el presente año 2023, proporcionada por Sentinel 1, permite realizar un seguimiento detallado de los depósitos de relaves inactivos y abandonados. La observación de deformaciones superficiales desde enero hasta diciembre de 2021 ha permitido no solo comprender la evolución temporal de las deformaciones, sino que también resalta la utilidad de los satélites Sentinel 1 para el monitoreo continuo de estas variaciones en el tiempo.

Las variaciones de deformaciones desde el inicio de las mediciones hasta el término de las mediciones se presentan como indicadores de estabilidad para los muros de depósitos de relaves inactivos y abandonados, permitiendo señalar posibles cambios en la estabilidad o fallas. Las diferencias en las variaciones de deformación indican alteraciones en la estabilidad o fallas en el muro, mientras que la estabilidad se refleja cuando la variación de la deformación no evidencia cambios significativos o se mantiene constante a lo largo del tiempo. Por lo tanto, este método se presenta como una herramienta capaz de evaluar la estabilidad de los depósitos.

Asimismo, las deformaciones verticales acumuladas aportan información valiosa a estos indicadores sobre la condición de estabilidad física de los muros. La observación de alzamientos o hundimientos significativos, indica si el depósito experimentó deformaciones sustanciales o permaneció sin cambios.

No obstante, es importante señalar que para este método la resolución espacial puede ser limitada. En caso de que se quisiera medir deformaciones en singularidades más pequeñas que el tamaño del píxel (aproximadamente de 3 m x 22 m en este caso), el método de interferometría no es adecuado ya que las deformaciones obtenidas para cada píxel son un promedio de los objetos que se encuentran dentro de este, por lo que podría no ser posible la distinción de detalles finos, como grietas o puntos específicos de la estructura, por lo tanto, esta técnica podría resultar mejor para la medición de deformaciones de estructuras que involucren la mayor cantidad de píxeles.

Dado que la mínima precisión obtenida por el método interferométrico es en milímetros, y las deformaciones estimadas por compresión secundaria para el caso de depósitos de relaves inactivos y abandonados son también de esta magnitud, el método de interferometría satelital posee mayor

utilidad para medir deformaciones provocadas por sismos, deslizamientos de tierra, movimiento de glaciares, socavones, entre otros.

Es posible medir deformaciones superficiales en depósitos de relaves inactivos y abandonados, sin embargo, no es posible asegurar si estos se originan debido a la compresión secundaria del material de muro, erosiones eólica e hídrica o influencia humana sin la utilización de datos de estaciones meteorológicas, monitoreo in situ, visitas a terreno, o utilización de instrumentos topográficos de respaldo.

La aplicación de interferometría satelital en depósitos activos presenta un desafío debido a las modificaciones en el área de medición provocada por la implementación de nuevas capas en cortos períodos de tiempo, lo que conlleva a distorsiones temporales que pueden afectar la fase obtenida. Los depósitos de relaves inactivos y abandonados no están sujetos a tal influencia, lo que confirma la confiabilidad de este método en este tipo de casos al asegurar que las deformaciones medidas se originan en los puntos monitoreados desde el inicio del estudio, además del hecho de que estos no presentan vegetación u otros elementos dispersores que pudieran influir en los resultados de deformaciones.

Una limitación adicional del método interferométrico, es la dependencia de las condiciones atmosféricas. En particular, técnicas como la interferometría satelital pueden verse afectadas por condiciones atmosféricas adversas, como la presencia de nubes. Sin embargo, vale la pena señalar que esta técnica es capaz de realizar observaciones incluso en condiciones atmosféricas desafiantes, lo que la distingue positivamente.

La interferometría satelital combinada con los métodos de monitoreo in situ tradicionales, emergen como una opción eficaz para la supervisión de deformaciones superficiales en depósitos de relaves inactivos y abandonados. La interferometría satelital proporciona fuente directa y continua de información procesable, permitiendo un acceso rápido y sencillo a los datos. Los métodos in situ posibilitan la validación de las deformaciones medidas satelitalmente, logrando conseguir una mayor fiabilidad de los resultados.

7.2. Recomendaciones

Se necesita realizar ensayos de laboratorio sobre los materiales de los muros de los depósitos de relaves para obtener resultados más certeros. Por sobre todo los ensayos triaxiales y edométricos, a carga constante y carga variable para las gravas y ripios y ensayos edométricos a carga constante para las arenas.

Se recomienda buscar más antecedentes e información acerca de las dimensiones de los depósitos y períodos de operación, y con ello, volver a realizar estas estimaciones mediante el método analítico para tener mejores resultados.

La precisión de los resultados de deformaciones superficiales obtenidas mediante la técnica de interferometría satelital PSI depende de la ejecución de cada uno de los pasos involucrados en la obtención de resultados. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo cada uno de estos pasos según las

indicaciones del método y conforme a las características de la estructura específica que se desee monitorear.

Como se indicó anteriormente, se pudo establecer un indicador que evidencia inestabilidad a través de las diferencias en las variaciones de deformación, más no establece la condición de estabilidad en su totalidad. Se recomienda para ello, establecer una línea base de tendencia de deformación o tasa de deformación varios años o en un año como se realizó en este estudio, y medir deformaciones actuales para posteriormente compararlas con esta tasa de deformación.

Se recomienda utilizar la interferometría satelital para medir deformaciones de mayores escalas, las cuales sean provocadas por sismos, deslizamientos de tierra, movimiento de glaciares, socavones, entre otros y para estructuras que involucren la mayor cantidad de píxeles posibles, siendo 2 hectáreas una medida suficiente para poder realizar mediciones fiables.

Si bien se pueden medir deformaciones en superficies planas, en taludes, o en lugares con mucha vegetación, se debe tener en cuenta las decorrelaciones que puede provocar la geometría del área de medición, junto con el hecho de que se puede perder mucha información debido a la retrodispersión de la señal.

Si bien se obtienen miden deformaciones con una muy alta precisión, hay ciertos aspectos que se pudieron haber mejorado para obtener datos más precisos. Se recomienda encontrar una mejor combinación de adquisiciones con tal de disminuir lo máximo posible la distancia baseline temporal y normal entre las imágenes y también seleccionar un GCP más adecuado. En algunos casos era difícil buscar un punto que se mantuviera en la misma posición por un largo período de tiempo, sobre alguna estructura conocida y que tuviera una alta reflectividad e índice de estabilidad de amplitud. Además, se recomienda utilizar un mejor DEM para eliminar la fase topográfica como el SRTM30 que tiene una resolución de 30 metros.

Además, se recomienda utilizar las ecuaciones de doble geometría para obtener las deformaciones verticales, ya que, estas pueden ser utilizadas en las deformaciones en LOS ascendentes y descendentes a lo largo del tiempo, y obtener deformaciones verticales y deformaciones horizontales E-O a lo largo del tiempo y no solo acumuladas como se obtuvieron en este estudio.

Dado que no es claro si las deformaciones superficiales interferométricas son consecuencia de un asentamiento o de una erosión se recomienda que se compruebe en campo a través de un método complementario, como, por ejemplo, con levantamientos topográficos o GNSS. Además, se recomienda revisar la información histórica de precipitaciones y vientos en estaciones meteorológicas aledañas, registros sísmicos y fotografías, de manera de saber a qué fenómenos está expuesto el depósito que puedan provocar deformaciones.

Junto con esta información, se recomienda revisar registros sísmicos del Centro Sismológico Nacional en el período de análisis de deformaciones y zona a analizar. De todas maneras, se recomienda tener un catastro con todos los antecedentes, información y fotos de cada depósito de relaves que haya hasta la fecha, esto permite identificar potenciales riesgos.

La utilización de múltiples fuentes de información permite tener mediciones de deformaciones precisas. Un método de monitoreo adicional permite corroborar y validar los desplazamientos medidos mediante el método de interferometría satelital PSI. En este contexto, además del método GNSS se pueden utilizar reflectores de esquina según lo implementado en el estudio de Qin (2013).

Para llevar a cabo una comparación rigurosa de deformaciones se debiera realizar un análisis estadístico de regresión lineal sobre la desviación de los desplazamientos verticales medidos por el monitoreo alternativo y los desplazamientos verticales detectados por las imágenes SAR.

Se recomienda utilizar las técnicas de medición remota para el seguimiento de depósitos de relaves inactivos y abandonados, ya que presentan ventajas significativas en comparación con el monitoreo in situ. Proveen de información detallada y continua lo largo del tiempo sobre áreas extensas, facilitando la detección a nivel regional, dependiendo del satélite y sus períodos de operación. Además, no requieren instalación directa en la estructura, lo que puede resultar beneficioso en términos de costos y en complejidad asociada a gestión y coordinación de las visitas a terreno.

Para realizar las técnicas de interferometría satelital se recomienda utilizar un equipo con gran almacenamiento, esto debido a que cada imagen SAR descargada tiene un tamaño de 4 GB. En este estudio se logró utilizar un máximo 30 imágenes por cada proceso de obtención de deformaciones. Esto fue lo máximo permitido por el equipo utilizado.

Bibliografía

Agencia Espacial Europea. (febrero, 2014). Eduspace Global. Recuperado de https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMVKXF64RH_0.html

Agencia Espacial Europea. (s.f.-a). Acquisition Modes. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-b). Applications. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-c). Geophysical Measurement. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-d). Interferometry. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-e). La Agencia Espacial Europea. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-f). Naming Conventions. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-g). Overview. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-h). Polarimetry. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-i). Product Types and Processing Levels. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-j). Resolution. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-k). Revisit and Coverage. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-l). Definitions. Sentinel Online.

Agencia Espacial Europea. (s.f.-m). Geophysical Measurement. Sentinel Online.

Alaska Satellite Facility. (s.f.-a). ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction. https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/

Alaska Satellite Facility. (s.f.-b). Introduction to SAR. HyP3 Documentation. https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/introduction_to_sar/

Alaska Satellite Facility. (s.f.-c). Create an Interferogram using ESA's Sentinel-1 Toolbox. Recuperado el 9 de junio de 2023, de <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-interferogram-using-esas-sentinel-1-toolbox/>

Alaska Satellite Facility. (s.f.-d). How to Phase Unwrap an Interferogram. [How to Phase Unwrap an Interferogram | Alaska Satellite Facility](#)

Bowker, L. y Chambers, D. (2015). The Risk Public Liability, & Economics of Tailings Storage Facility Failures. Report, July 21, pp. 1-56.

Breshears, D.D., Whicker, J.J., Johansen, M.P., Pinder, J.E. (2003). Wind and water erosion and transport in semi-arid shrubland, grassland and forest ecosystems: quantifying dominance of horizontal wind-driven transport. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 1189-1209.

Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations (3.a ed.)*. Wiley.

Bürgmann, R., Rosen, P. A., and Fielding, E. J. (2000). Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual review of earth and planetary sciences*, 28(1), 169-209.

Capacitación de percepción remota aplicada. (2017a). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética [Diapositivas 1-51]. NASA Applied Sciences. <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session1-SAR-Spanish.pdf>

Capacitación de percepción remota aplicada. (2017b). Introduction to SAR Interferometry [Diapositivas 1-31]. NASA Applied Sciences. <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session4-SAR-English.pdf>

Capacitación de percepción remota aplicada. (2020a). Fundamentos de la percepción remota [Diapositivas 1-52]. NASA Applied Sciences. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Fundamentals_Session1_Spanish.pdf

Capacitación de percepción remota aplicada. (2020b). Mapeo y Monitoreo de Bosques con Datos SAR: Análisis Multi-Temporal [Diapositivas 1-87]. NASA Applied Sciences. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/SAR_Part1_Spanish.pdf

Capacitación de percepción remota aplicada. (2022). Evaluación de Desastres Usando Radar de Apertura Sintética. NASA Applied Remote Sensing Training Program. <http://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/spanish/arset-evaluacion-de-desastres-usando-radar-de-apertura-sintetica>

Cesar, R., Arruda, F., Ramiro, V. et al. (2022). Deposition of gold mining tailings in tropical soils: metal pollution and toxicity to earthworms. *Journal of Soils and Sediments* 22(2), 547–558. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03105-8>

Cerda Salazar, V. (2022). *Propuesta de monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188813>

Clarkson, L. (2021). Comprehensive monitoring strategy for tailings dams. (Tesis de doctorado, School of Civil Engineering, The University of Queensland). <https://doi.org/10.14264/d8a5619>

Comisión Chilena del Cobre. (2022). Monitoreo del estado de los relaves mineros en Chile. Dirección de estudios y políticas públicas. Santiago, Chile.

Compañía Minera Comercial Sali Hochschild. (2009). Plan de Cierre de Planta Ojancos. Copiapó, Chile.

Crawford-Flett, K. A. (2014). *An improved hydromechanical understanding of seepage-induced instability phenomena in soil (T)*. University of British Columbia. Retrieved from <https://open.library.ubc.ca/collections/ubctheses/24/items/1.0167453>

Csavina, J., Field, J., Taylor, M.P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E.A., Sáez, A.E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of The Total Environment* 433, 58-73.

Perissin, D., Wang Z., & Lin, H. (2012). Shanghai Subway Tunnels and Highways Monitoring Through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73, 58–67. Recuperado de <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002>

Decreto Supremo N.º248. (11 de abril de 2007). *Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves*, *Diario Oficial*, 11 de abril de 2007.

Devanthery, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., & Crippa, B. (2018). Deformation monitoring using Sentinel-1 SAR data. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2(7), 344.

Diaz, O. (2021). Principios Básicos de las imágenes de Radar [Imagen adjunta]. LinkedIn <https://es.linkedin.com/pulse/principios-b%C3%A1sicos-de-las-im%C3%A1genes-radar-oscar-alberto-diaz-bocanegra>

Dobry, R. and Alvarez, L. (1967). Seismic Failures of Chilean Tailings Dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(6).

Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., Lu, D., Gu, X., Chen, C. (2021). The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review. *Journal of Cleaner Production* 302, 126946.

EOS Data Analytics. (2023). Tipos de Satélites: Sus órbitas y funciones. <https://eos.com/es/blog/tipos-de-satelites/#:~:text=Un%20sat%C3%A9lite%20artificial%20es%20cualquier,incluso%20observar%20el%20universo%20lejano>

Espinace, R., Palma, J., Valenzuela, P., Jaramillo, I., Miranda, A. (2006). Evaluación del efecto eólico en tranques de relave. CAMSIG, Argentina.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D, Bell, G & Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams* (2nd ed.). CRC Press/Balkema, The Netherlands.

Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). InSAR principles guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (Vol. 19). Recuperado de https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19

Figuroa, A., Solans, D., Gonzalez, C., & Campaña, J. (2017). Comportamiento sísmico de presas de relaves construidas aguas abajo y línea central. *Obras y proyectos*, (21), 30-37. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132017000100004>

Flores Barrenechea, A. (2019). *Propuesta metodológica de instrumentación y monitoreo para evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves abandonado en Chile* (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Garlanger, J. E. (1972). The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress. *Géotechnique* 22, 71–78.

Gesche, R. (2020). Introducción a la Instrumentación y Monitoreo Geotécnico. [Material de clase]. Proyecto de Geotecnia, Universidad de Chile. 18 de junio de 2020.

Grunfeld, N. (s.f.). Introducción a Interferometría SAR – Generación de DEM. NASA's Applied Remote Sensing Training Program. Recuperado de <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/SAR%20Desastres%20Parte%203.pdf>

Haeri, S. M., Motlagh, A. H., Gholami, R., & Soleimani, S. (2021). *Tailings Dam Failure Modes: Recognition, Prevention and Case Studies*.

Hanssen, R.F. (2001) *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Kluwer Academic, Dordrecht, Boston. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). *An introduction to geotechnical engineering* (Vol. 733). Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Ingeniería Matemática de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (19 de agosto de 2022). *Jorge Amaya y Jaime Ortega se adjudican proyectos IDeA I+D 2022*. <https://www.dim.uchile.cl/2022/08/jorge-amaya-y-jaime-ortega-se-adjudican-proyectos-idea-id-2022/>

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. (2019). ¿Qué es un SAR? INTA - Inicio. https://www.inta.es/INTA/es/blogs/ceit/BlogEntry_1554121012176

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. (2019). Los modos de adquisición en Sentinel-1. https://www.inta.es/INTA/en/blogs/copernicus/BlogEntry_1547802440975

Kasmaeeyazdi, S. (2022, 6 de septiembre). Using Copernicus data within the Raw Materials lifecycle. [Conferencia]. Datos satelitales de Copernicus en Chile y América Latina: Construyendo aplicaciones y redes de colaboración - Sesión 1: Recursos mineros, Santiago, Chile.

Lottermoser, B. (2007). *Mine Wastes Characterization, Treatment, Environmental Impacts* (Second Ed). Springer. Recuperado de: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-48630-5>

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.

MATLAB & Simulink. (s.f.). Spaceborne Synthetic Aperture Radar Performance Prediction. <https://www.mathworks.com/help/radar/ug/spaceborne-synthetic-aperture-radar-performance-prediction.html>

Microsoft. (2023). ¿Qué es Power BI? Obtenido de: <https://learn.microsoft.com/es-es/power-bi/fundamentals/power-bi-overview>

Milillo, P., Bürgmann, R., Lundgren, P., Salzer, J., Perissin, D., Fielding, E., Biondi, F., & Milillo, G. (2016). Space geodetic monitoring of engineered structures: The ongoing destabilization of the Mosul dam, Iraq. *Scientific Reports*, 6, 37408.

Minería en Consejo minero. (13 de enero de 2019). Minería en Chile. <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>.

Ministerio de Minería de Chile. (2019). Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible. Recuperado de https://www.minmineria.cl/media/2021/05/Plan_Nacional_de_Despositos_de_Relaves_para_una_Mineria_Sostenible_2021.pdf

Mitchell, G., Turner, J. y Engels J. (2018). Advances in tailings surveying using optical satellites. 5th International Seminar on Tailings Management.

Natural Resources Canada. (20 de noviembre de 2015). Radar image distortions. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/microwave-remote-sensing/radar-image-distortions/9325>

Nelson, S.A. (2013). EENS 3050: Slope Stability, Triggering Events, Mass Movement Hazards, Online Course Notes. Tulane University. Louisiana, United States.

Observatorio G-Data, Universidad de Chile. (s.f.). InSAR. Recuperado de <https://prs.dgf.uchile.cl/observatorio-g-data/insar/#:~:text=En%20esta%20t%C3%A9cnica%2C%20un%20sat%C3%A9lite,un%20nuevo%20pulso%20de%20energ%C3%ADa.>

Olguín, S., Araya, V., Suazo, G., & Villavicencio, Gabriel. (2022). Aplicación de herramientas de monitoreo DInSAR de deformaciones para el estudio de fallas en depósitos de relaves. *Obras y proyectos*, (31), 85-94. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132022000100085>

Ortega, J. (6 de septiembre de 2022). Remote Monitoring of Mine tailings. [Conferencia]. Datos satelitales de Copernicus en Chile y América Latina: Construyendo aplicaciones y redes de colaboración - Sesión 1: Recursos mineros, Santiago, Chile.

Osses, R., Ovalle, C., Pineda, J., and Barrios, P. (2019). Effect of partial saturation on the compressibility of crushable sands. *Obras y Proyectos*, 25, 15–21.

Pastén, C. (2022). Mecanismos de Falla en Depósitos de Relaves. [Material de clase]. Ingeniería Geotécnica de Depósitos de relaves.

Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. *Multitemporal Remote Sensing: Methods and Applications*, 145-176.

Perissin, D. (2018). Geometric Processing: Active Sensor Modeling and Calibration (SAR). En S. Liang (Ed.), *Comprehensive Remote Sensing, vol. 2*, pp. 61–76. Oxford: Elsevier.

Perissin, D., & Wang, T. (2011). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1), 271-280.

Perissin, D., (2011). SARPROZ manual. Acceso en <https://www.sarproz.com/software-manual/>

Perissin, D., Wang, T., (2012). Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50 (1), 271–280.

Pulgar Morales, M. (2020). *Metodología de evaluación de estabilidad física de depósitos de relaves abandonados en la zona Centro Norte de Chile* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Qin, Y. (2018). Demo: APS Estimation & Multi-temporal analysis with Sarproz. Sarproz processing tutorial series, Tutor. Exerc, 75. Recuperado de: <https://www.sarproz.com/2018-tutorials/>

Quiroz Rojo, P. (2021). Análisis de deformaciones estáticas en muros de depósitos de relaves tradicionales (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Remondo, J. L., Martín-Puertas, J. A., & González-Alonso, J. M. (2003). Interferometría satelital para la medición de deformaciones. *Revista de la Sociedad Española de Astronomía*, 27(1), 1-19.

Robertson, P., de Melo, L., Williams, D. and Wilson, W. (2019). Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I. Vale, Expert Panel.

Sánchez, C., Manso, A. y Verdugo, M. A. (2018). Application of Differential Interferometric Radar Satellite Methodology (DInSAR) to Detect Ground Motion on Codelco Chuquicamata's Talabre Tailings Dam. 5th International Seminar on Tailings Management.

SARPROZ. (s.f.). SARPROZ: Advanced Toolbox for SAR Data Processing and Analysis. Recuperado de <https://www.sarproz.com/>

Servicio de Evaluación Ambiental. (2020). Guía trámite PAS del artículo 135 del Reglamento del SEIA. Permiso para la construcción y operación de depósitos de relaves. Recuperado de https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2020/03/13/guia_pas_135.pdf

Servicio Nacional de Geología y Minería. (26 de diciembre de 2023). Catastro Depósitos de Relaves en Chile. Recuperado de: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2003). Construcción y operación de tranques de relaves, Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería. Recuperado de <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/21.construccion-operacion-tranques.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2007). Guía técnica de operación y control depósitos de relaves. DSM/07/31 Departamento de Seguridad Minera. Chile. Recuperado de: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (s.f.). *Preguntas frecuentes sobre Relaves*. Ministerio de Minería. [https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#:~:text=El%20relave%20es%20un%20s%C3%B3lido,algo%20menos%20de%201%25\).](https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/#:~:text=El%20relave%20es%20un%20s%C3%B3lido,algo%20menos%20de%201%25).)

Servicio Nacional de Geología y Minería; Ingeniería y geotecnia Ltda. (1989). Levantamiento catastral de los tranques de relaves en Chile. Etapa A, regiones V y XIII [informe inédito]. Santiago: BSNGM

Servicio Nacional de Geología y Minería; Ingeniería y geotecnia Ltda. (1990a). Levantamiento catastral de los tranques de relaves en Chile. Etapa B, regiones IV, VI y VII [informe inédito]. Santiago: BSNGM

Servicio Nacional de Geología y Minería; Ingeniería y geotecnia Ltda. (1990b). Levantamiento catastral de los tranques de relaves en Chile. Etapa c, regiones II y III [informe inédito]. Santiago: BSNGM

Sillerico, E., Marchamalo, M., Rejas, J. G. y Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. Informes de la Construcción. 62. 10.3989/ic.09.063.

STINGS Consortium. (2020). Supervision of tailings by an integrated novel approach to combine ground-based and space-borne sensor data. Derivable – Prototype 2.

Swaisgood, J. R. (2003, February). Embankment dam deformations caused by earthquakes. In *Pacific conference on earthquake engineering* (Vol. 14).

U.S. Army Corps of Engineers. (2003). ‘Slope Stability.’ Engineer Manuals.

U.S. Bureau of Reclamation. (2015). ‘Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations,’ in Best Practice and Risk Methodology, Security, Safety, and Law Enforcement Office – Dam Safety.

U.S. Bureau of Reclamation. (2015b). ‘Embankment Slope Instability’, in Best Practice and Risk Methodology, Security, Safety, and Law Enforcement Office – Dam Safety.

U.S. Bureau of Reclamation. (2019). Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations: Best Practices. U.S. Department of the Interior.

Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela, P. (2014). Failures of Sand Tailings Dams in a Highly Seismic Country. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 449–464. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0142>

Wachtendorff Salinas, W. (2015). Estudio experimental de la consolidación en equipo especial para ripios. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137104>

Woodward, J. (2005). *An Introduction to Geotechnical Processes*. CRC Press.

Qin, Y, Perissin, D., & Lei, L. (2013). An Evaluation of the Performance in Ground Settlement Monitoring in Hong Kong Using Satellite Radar Remote Sensing Technology. En *Proc. of ISRSE 2013, Beijing*. Recuperado de <https://www.sarproz.com/wp-content/papercite-data/pdf/qin-aeotpigsmihkusrrst2013.pdf>

Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of geophysical research: solid earth*, 102(B4), 7547-7563.

Zhang, L, Peng, M, Chang, D, & Xu, Y. (2016). *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment* (1st ed.). John Wiley & Sons, Singapore.

Anexos

Anexo A

Catastro de depósitos

Se muestra el catastro realizado mediante la plataforma Microsoft Power BI en el contexto del Proyecto FONDEF (2022) de Sistema de monitoreo de riesgo en torno a depósitos de relaves.

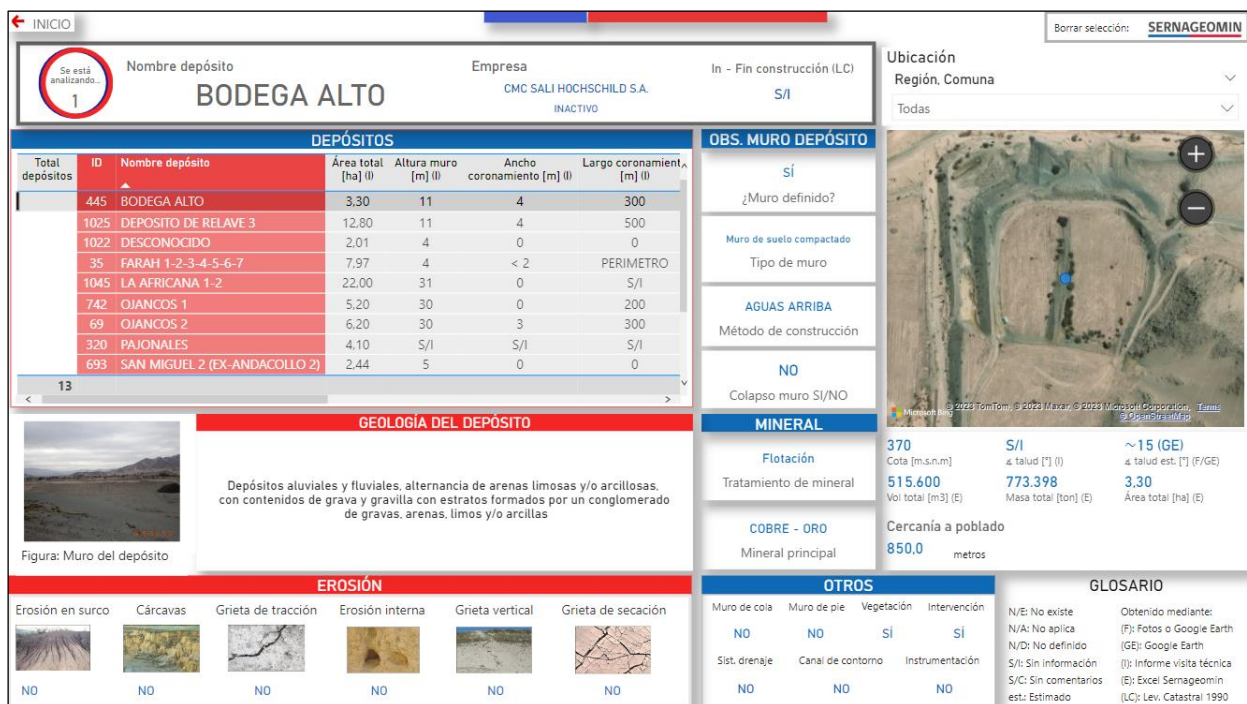


Figura 0-1: Características generales depósito de relaves “Bodega Alto”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

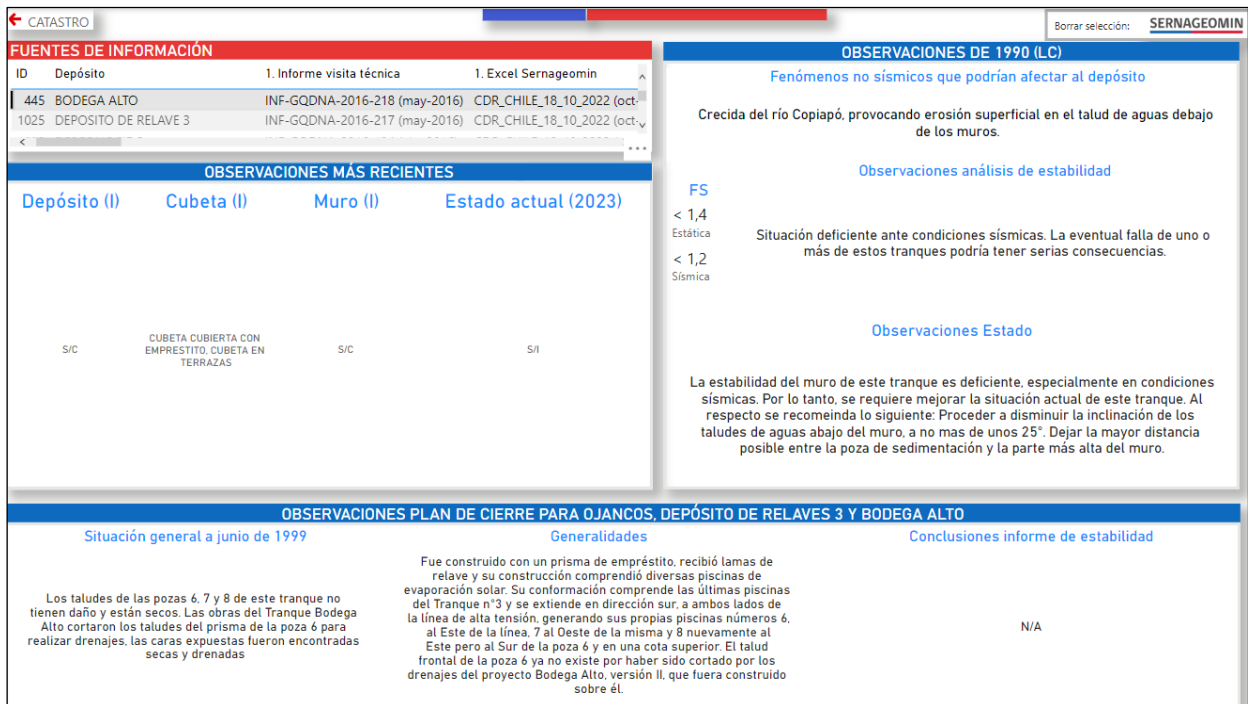


Figura 0-2: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Bodega Alto”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

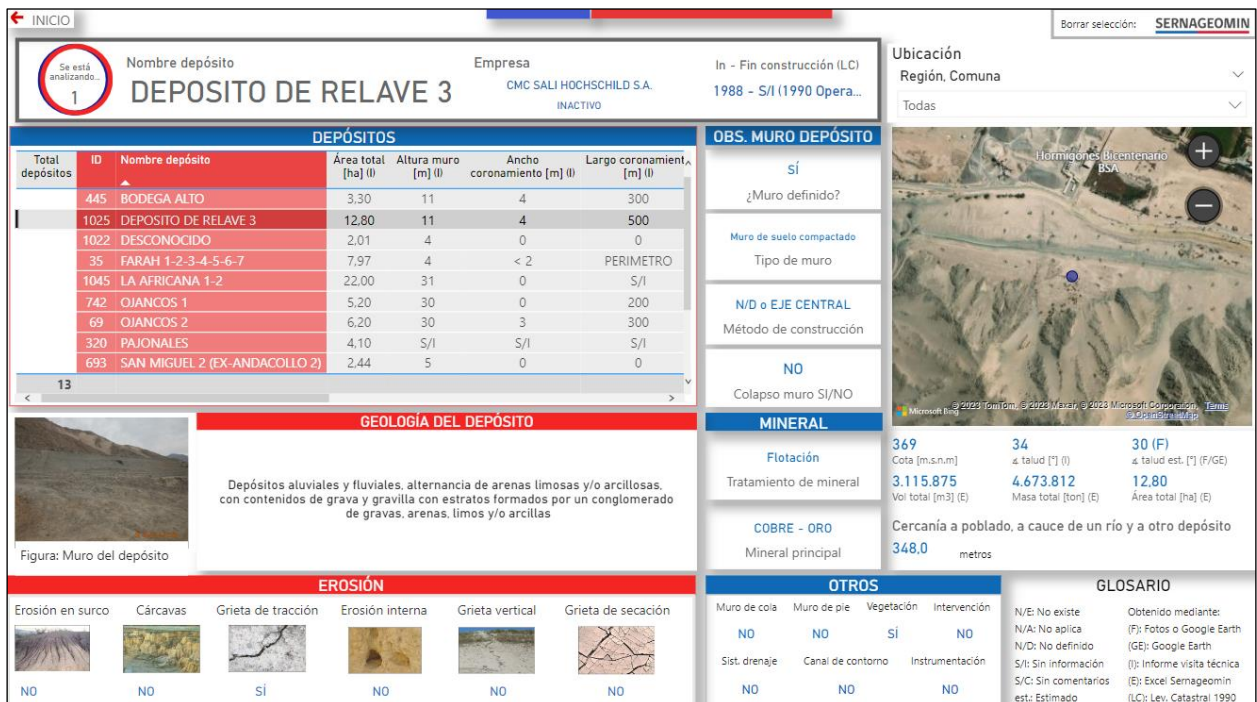


Figura 0-3: Características generales depósito de relaves “Depósito de relave 3”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

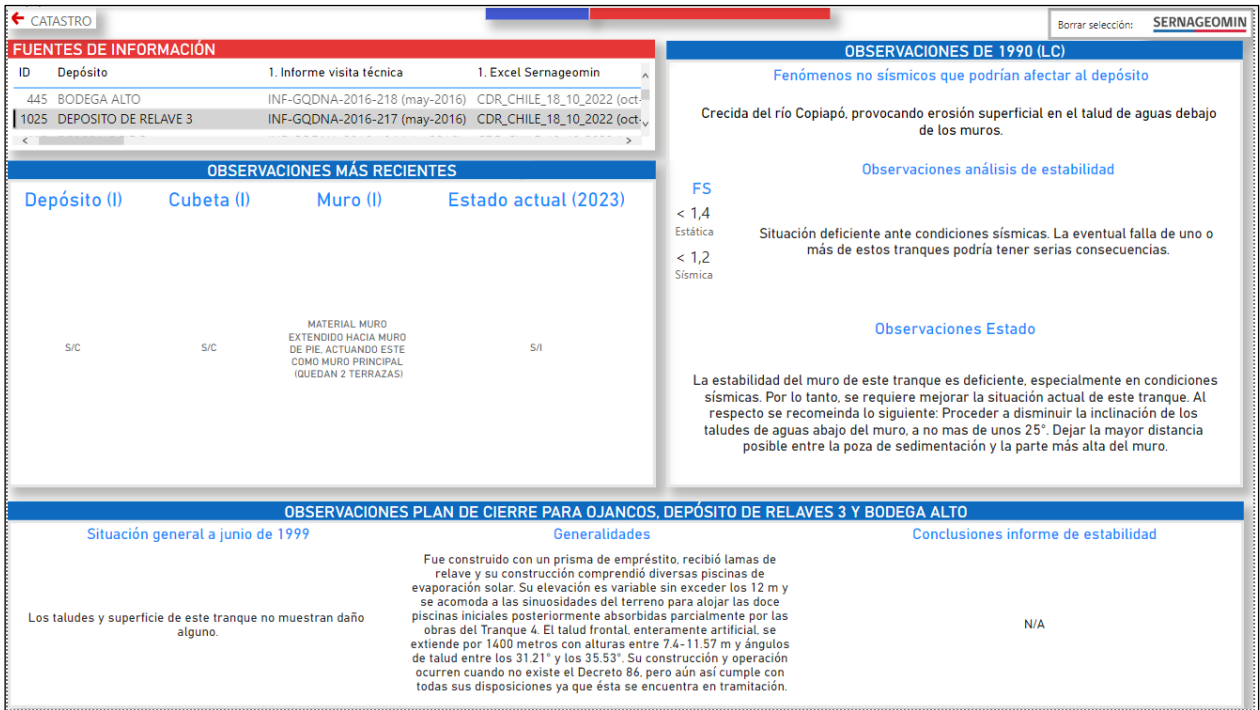


Figura 0-4: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Depósito de relave 3”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.



Figura 0-5: Características generales depósito de relaves “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

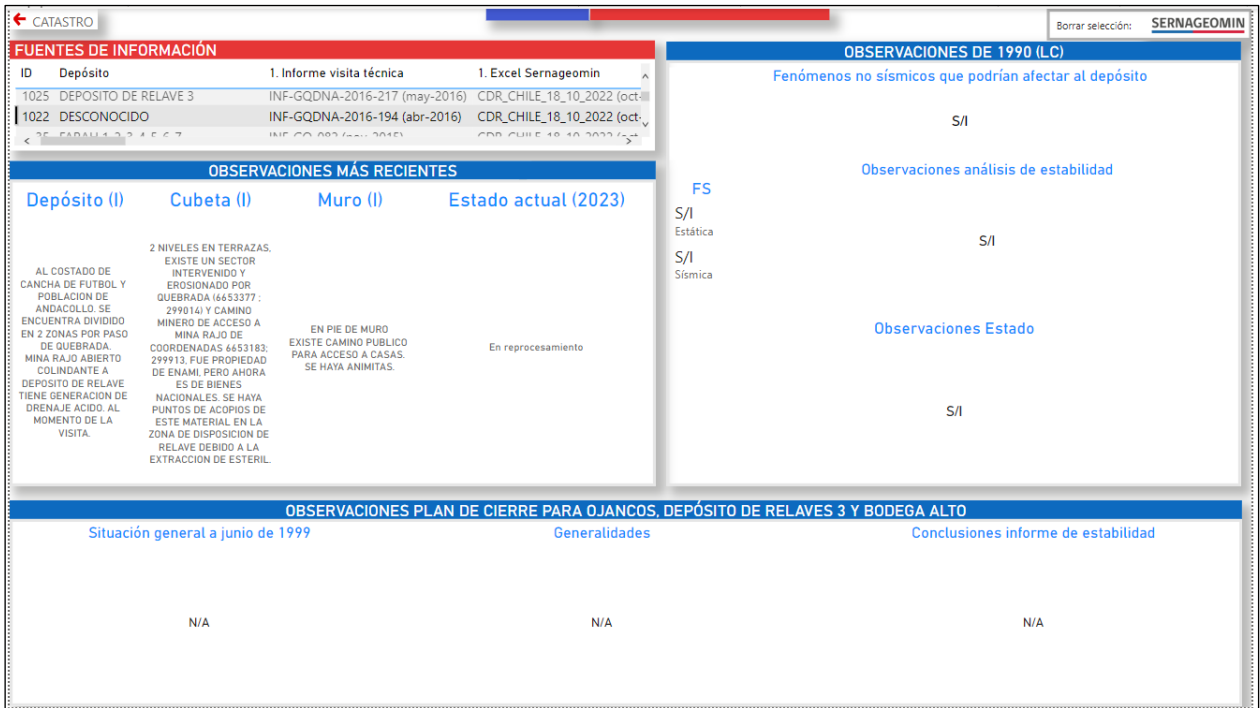


Figura 0-6: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

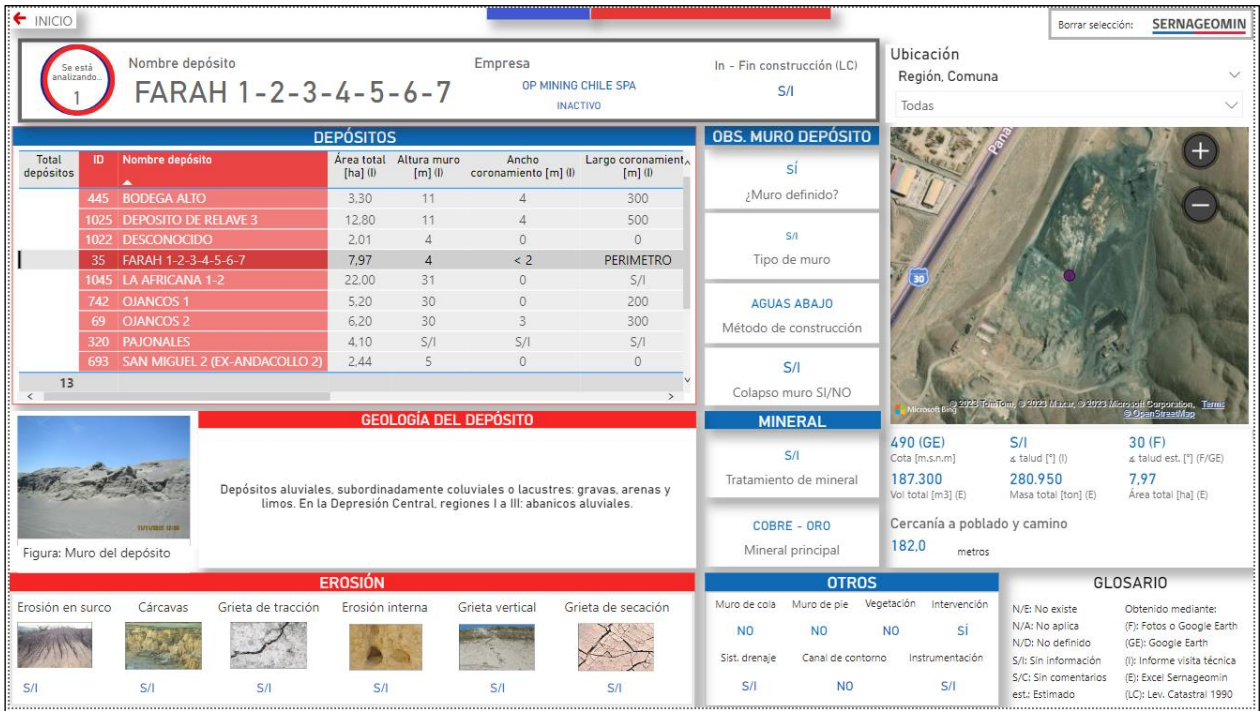


Figura 0-7: Características generales depósito de relaves “Farah 1-2-3-4-5-6-7”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

FUENTES DE INFORMACIÓN				OBSERVACIONES DE 1990 (LC)	
ID	Depósito	1. Informe visita técnica	1. Excel Sernageomin	Fenómenos no sísmicos que podrían afectar al depósito	
1022	DESCONOCIDO	INF-GQDNA-2016-194 (abr-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	S/I	
35	FARAH 1-2-3-4-5-6-7	INF-GQ-082 (nov-2015)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	Observaciones análisis de estabilidad	
1045	LA AFRICANA 1-2	INF-GODNA-2016-370 (ago-2016)	CDR CHILE 18 10 2022 (oct-2022)	Observaciones Estado	
OBSERVACIONES MÁS RECIENTES				FS	
Depósito (I)	Cubeta (I)	Muro (I)	Estado actual (2023)	< 1,4	
Relave generado va Embalse OP, ubicado aguas abajo del tranque de relaves.	S/C	Intervención muro, extracción de relave utilizado para construcción de Embalse OP	En fiscalizaciones, se observa ausencia de personal y detención de la planta, los equipos se encuentran desenergizados. El depósito está absolutamente seco y sin actividad. La planta continuará detenida hasta aprox fin de año. Se encuentra trabajando en la factibilidad del proyecto "Procesamiento de relaves con reutilización íntegra de sus rechazos". En 9/9/2016, la empresa avisa la suspensión temporal de las actividades productivas. Existen negociaciones de venta de los predios superficiales de las instalaciones y del depósito, posible cambio de titularidad de las Resoluciones que aprueban el funcionamiento de la planta en el corto plazo. Sobre la factibilidad del proyecto de "Procesamiento de relaves" no se pudo realizar, por temas económicos.	< 1,2	S/I
				Sísmica	
OBSERVACIONES PLAN DE CIERRE PARA OJANCOS, DEPÓSITO DE RELAVES 3 Y BODEGA ALTO					
Situación general a junio de 1999		Generalidades		Conclusiones informe de estabilidad	
N/A		N/A		N/A	

Figura 0-8: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Farah 1-2-3-4-5-6-7”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

INICIO						Borrar selección: SERNAGEOMIN					
Se está analizando		Nombre depósito		Empresa		In - Fin construcción (LC)					
1		LA AFRICANA 1-2		MINERA NUEVA PUDAHUEL		1950 - 1978					
				INACTIVO		Ubicación					
						Región, Comuna					
						Todas					
DEPÓSITOS						OBS. MURO DEPÓSITO					
Total depósitos	ID	Nombre depósito	Área total [ha] (I)	Altura muro [m] (I)	Ancho coronamiento [m] (I)	Largo coronamiento [m] (I)					
	445	BODEGA ALTO	3,30	11	4	300	SI				
	1025	DEPOSITO DE RELAVE 3	12,80	11	4	500	¿Muro definido?				
	1022	DESCONOCIDO	2,01	4	0	0	Muro de relaves depositados gravitacionalmente				
	35	FARAH 1-2-3-4-5-6-7	7,97	4	< 2	PERIMETRO	Tipo de muro				
	1045	LA AFRICANA 1-2	22,00	31	0	S/I	AGUAS ABAJO				
	742	OJANCOS 1	5,20	30	0	200	Método de construcción				
	69	OJANCOS 2	6,20	30	3	300	NO				
	320	PAJONALES	4,10	S/I	S/I	S/I	Colapso muro SI/NO				
	693	SAN MIGUEL 2 (EX-ANDACOLLO 2)	2,44	5	0	0					
GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO						MINERAL					
Se ubica en el costado poniente del valle del Río Mapocho sobre terrenos de pendiente suave (del orden del 2%) que corresponden a rellenos fluviales cuaternarios; principalmente gravas arenosas de buena calidad geotécnica y alta conductividad hidráulica, con espesores de unos 15 m y bajo los cuales aparecen rocas volcánicas; principalmente andesíticas y riolíticas, con intercalaciones de rosas sedimentarias continentales del Cretácico Superior al Terciario Inferior						Flotación					
Figura: Muro del depósito						Tratamiento de mineral					
						COBRE					
						Mineral principal					
						Cercanía a poblado					
						15,0 metros					
EROSIÓN						OTROS		GLOSARIO			
Erosión en surco	Cárcavas	Grieta de tracción	Erosión interna	Grieta vertical	Grieta de secación	Muro de cola	Muro de pie	Vegetación	Intervención	N/E: No existe	Obtenido mediante:
SÍ	SÍ	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SÍ	SÍ	N/A: No aplica	(F): Fotos o Google Earth
						Sist. drenaje	Canal de contorno	Instrumentación		N/D: No definido	(GE): Google Earth
						S/I	NO	NO		S/I: Sin información	(I): Informe visita técnica
										S/C: Sin comentarios est.: Estimado	(E): Excel Sernageomin
										(LC): Lev. Catastral 1990	

Figura 0-9: Características generales depósito de relaves “La Africana 1-2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

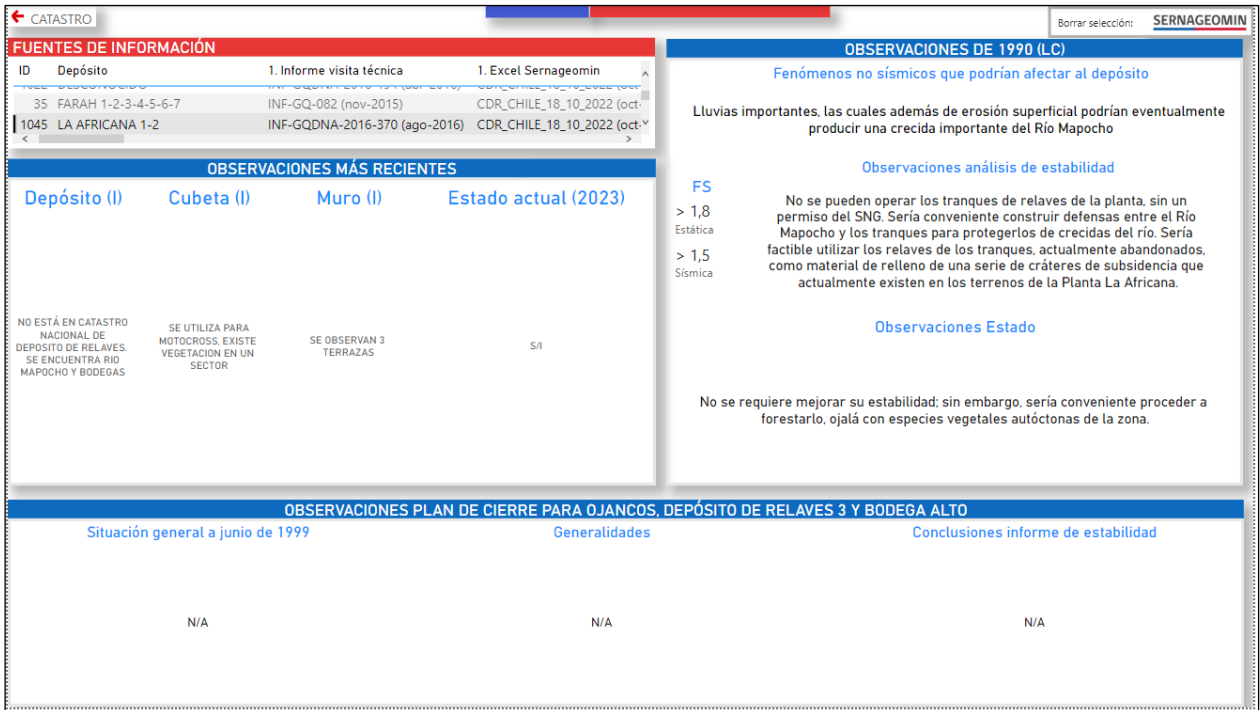


Figura 0-10: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “La Africana 1-2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

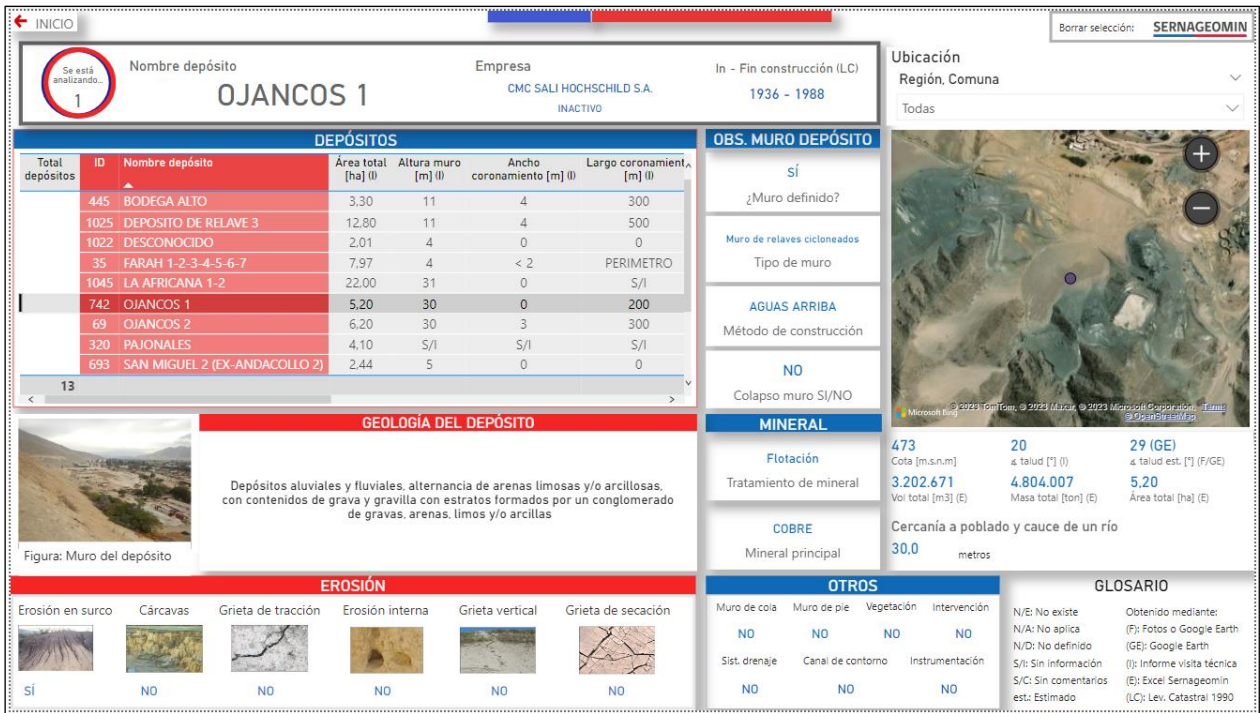


Figura 0-11: Características generales depósito de relaves “Ojancos 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

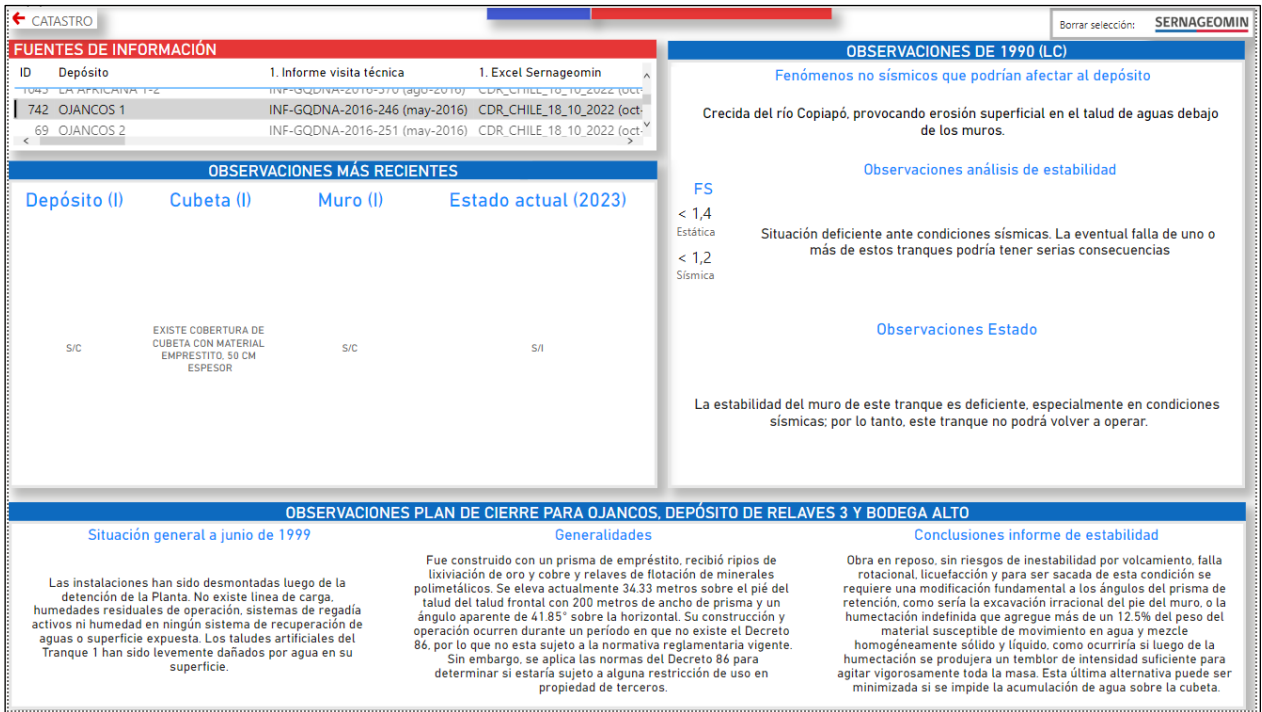


Figura 0-12: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Ojancos 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

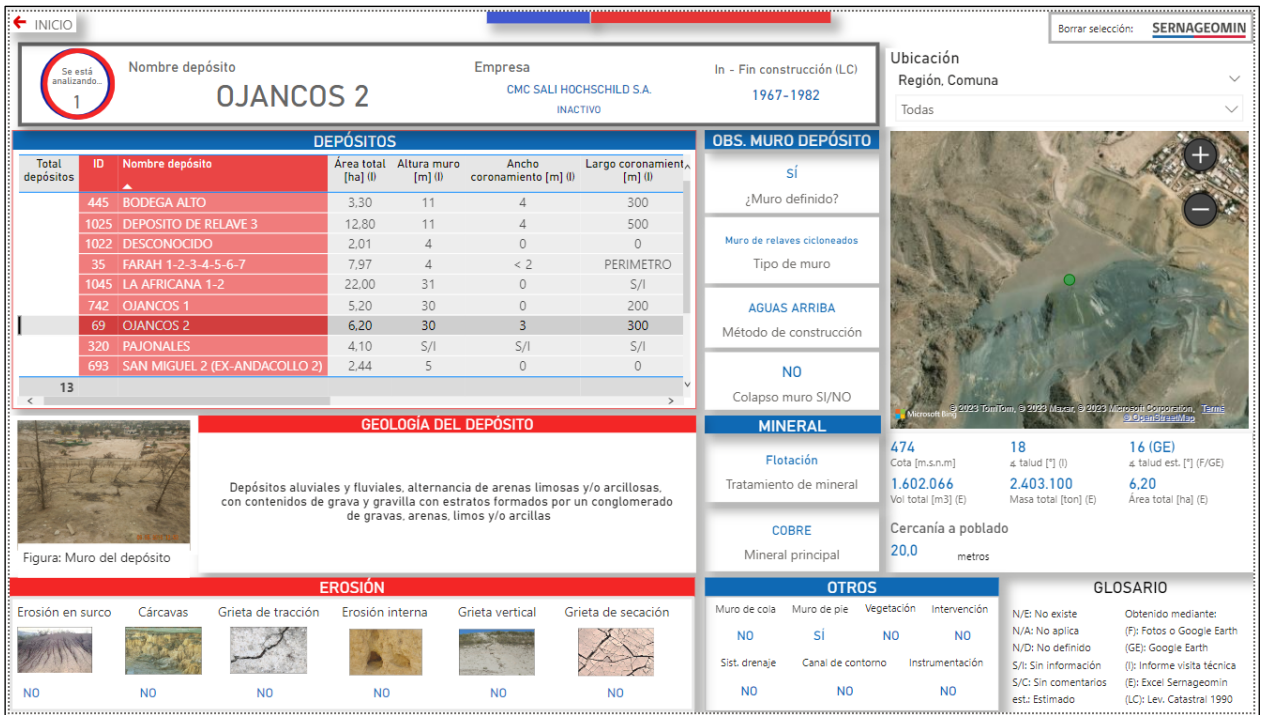


Figura 0-13: Características generales depósito de relaves “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

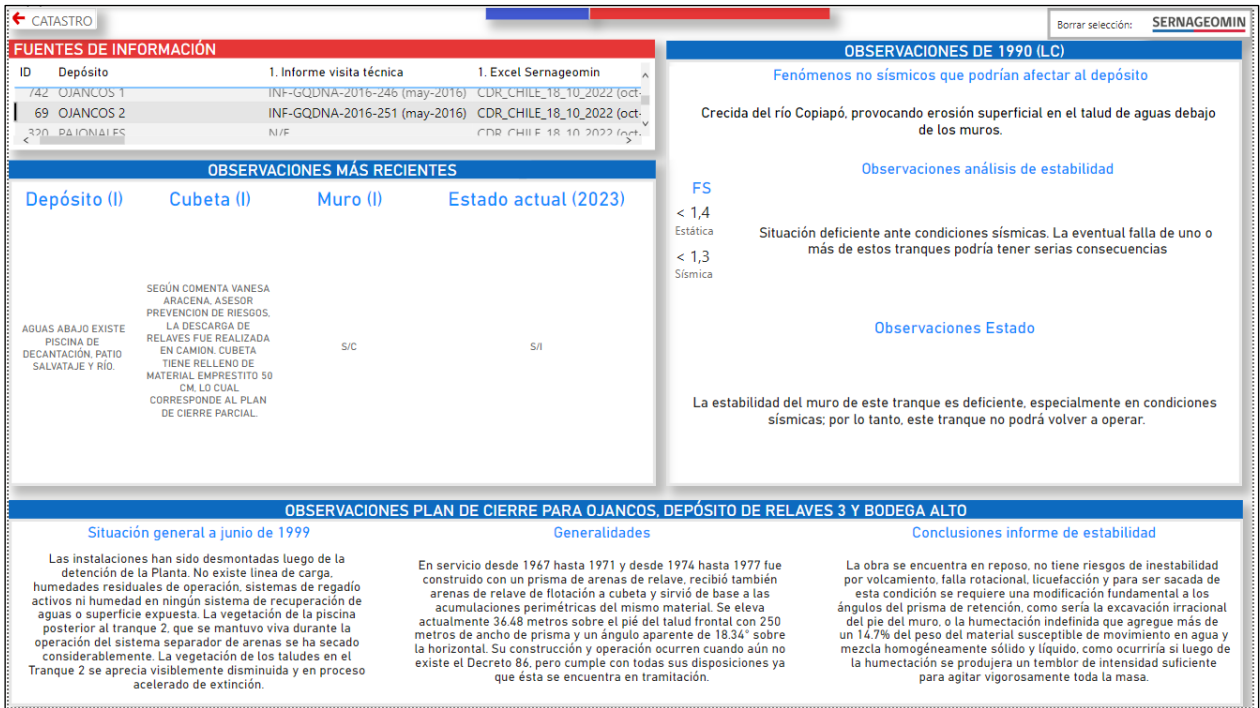


Figura 0-14: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Ojancos 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

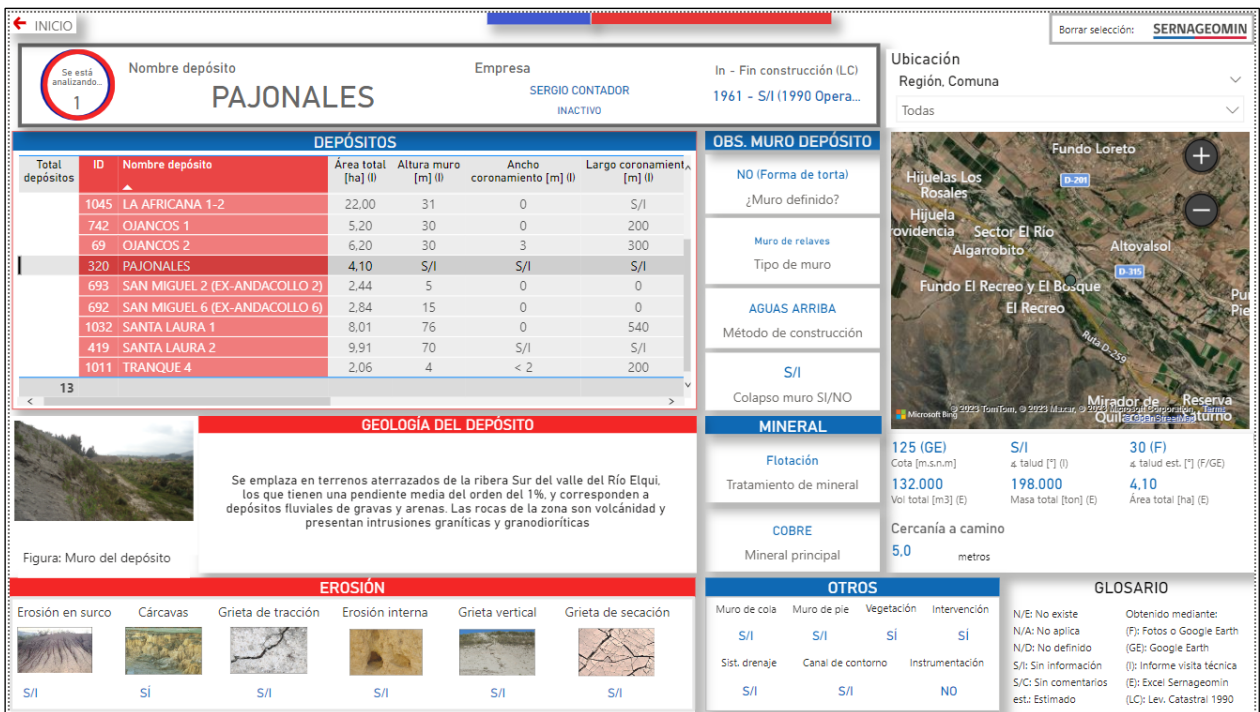


Figura 0-15: Características generales depósito de relaves “Pajonales”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

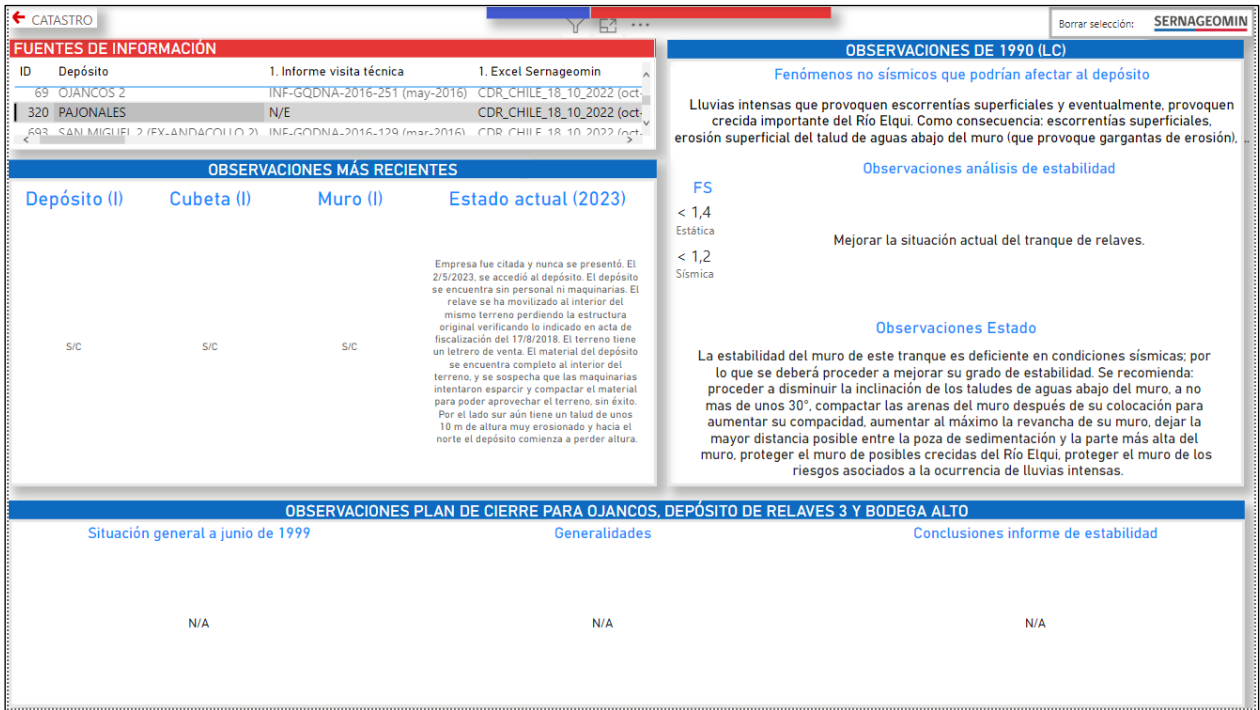


Figura 0-16: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Pajonales”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

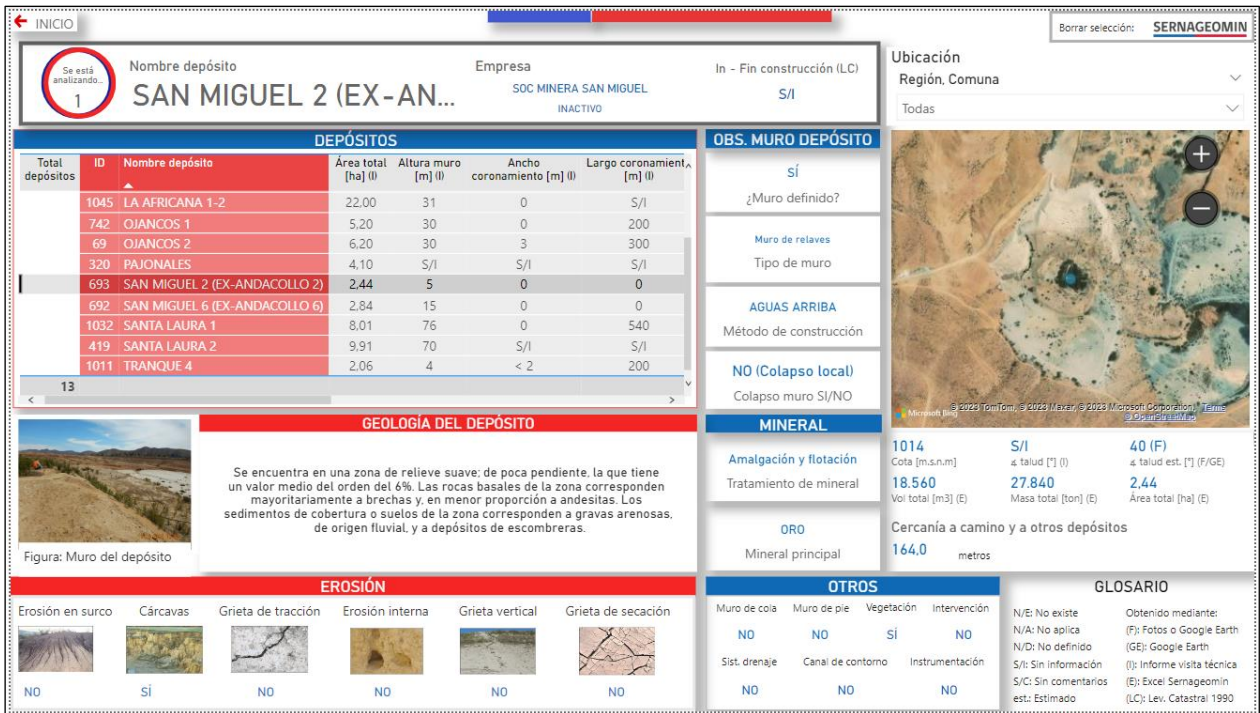


Figura 0-17: Características generales depósito de relaves “San Miguel 2 (Ex - Andacollo 2)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

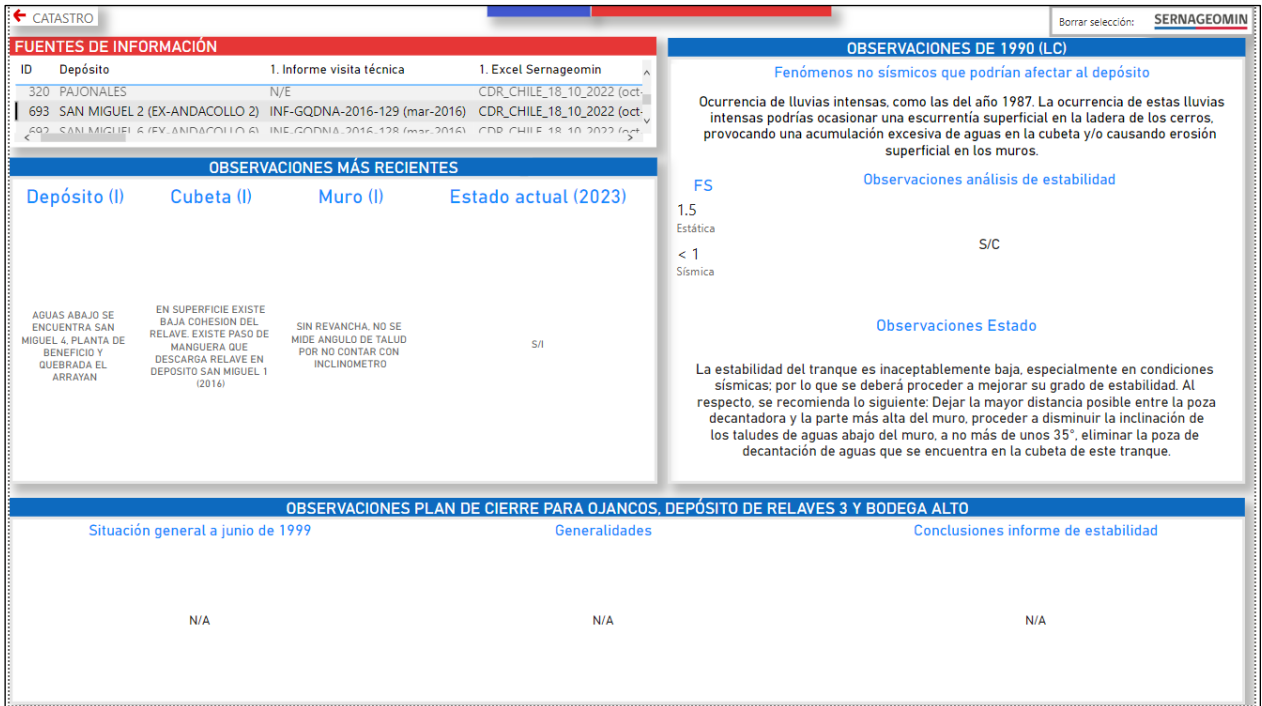


Figura 0-18: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “San Miguel 2 (Ex - Andacollo 2)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

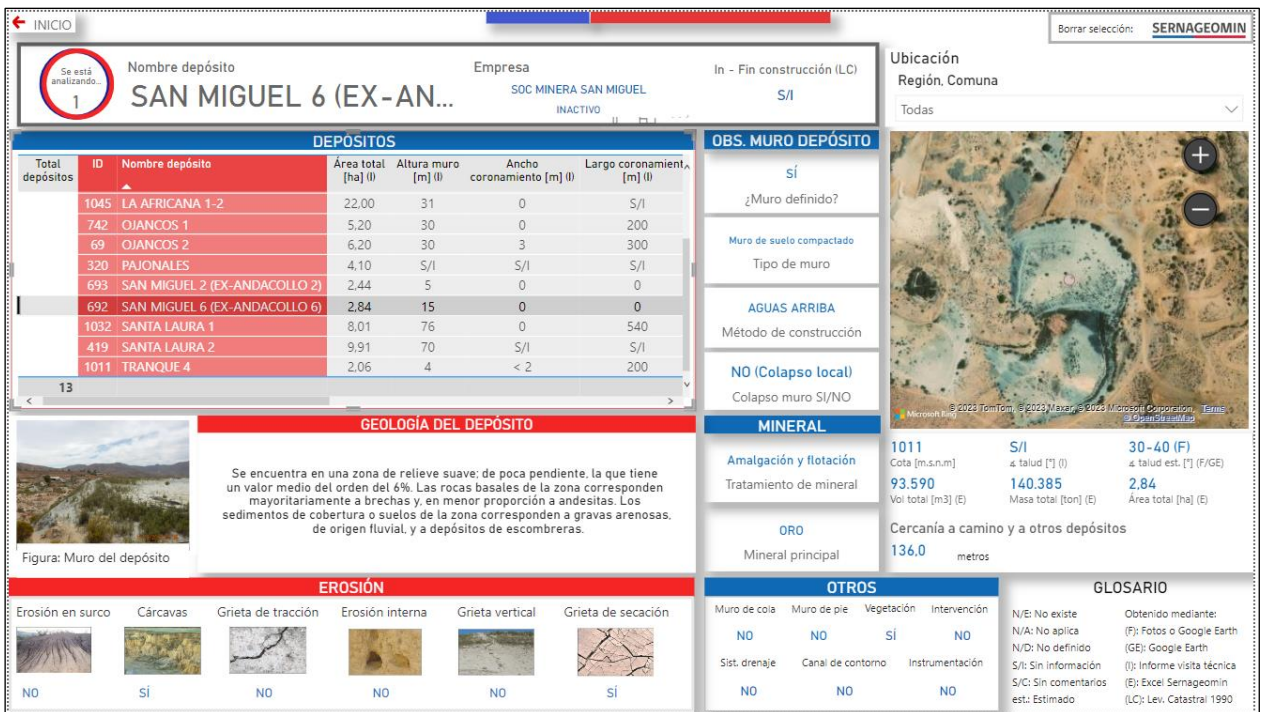


Figura 0-19: Características generales depósito de relaves “San Miguel 6 (Ex - Andacollo 6)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

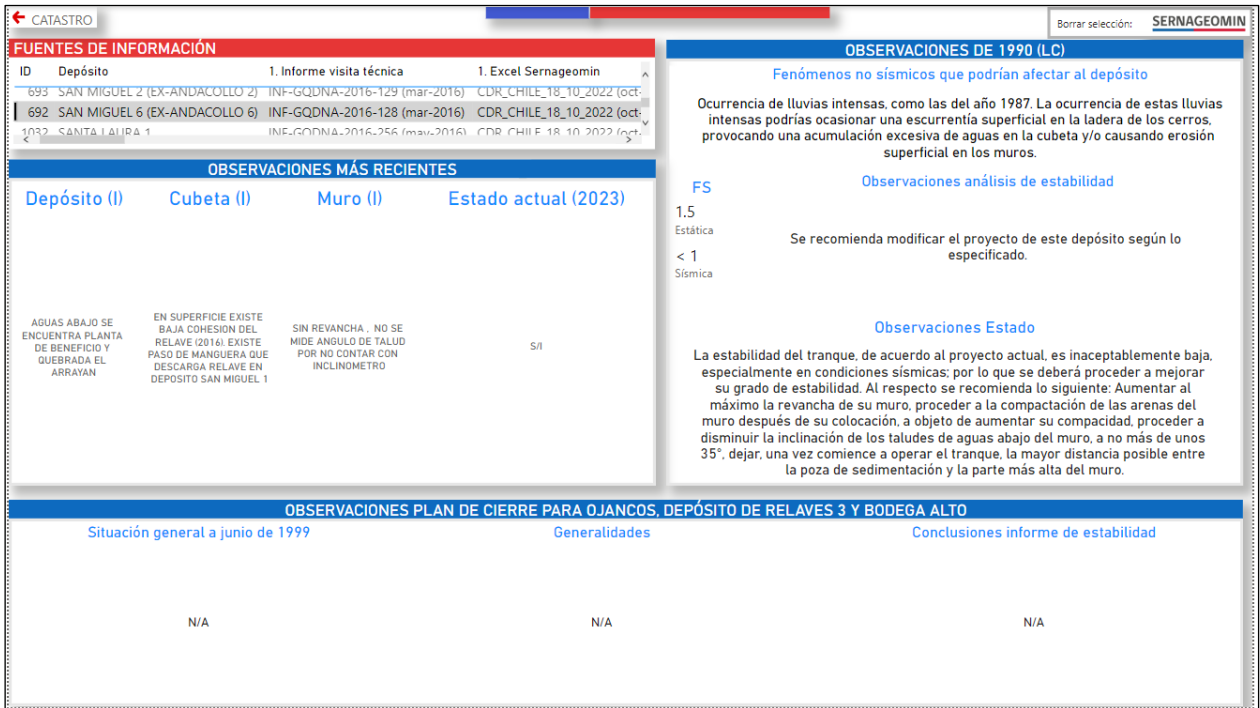


Figura 0-20: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “San Miguel 6 (Ex - Andacollo 6)”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

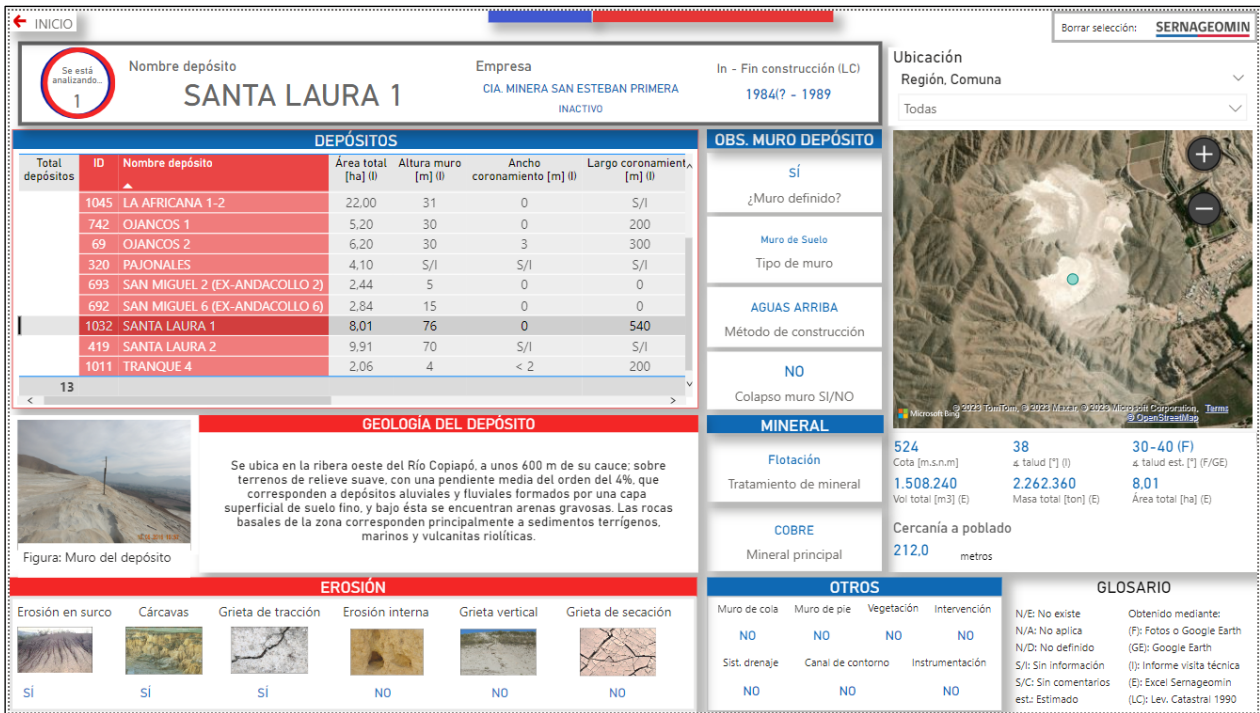


Figura 0-21: Características generales depósito de relaves “Santa Laura 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

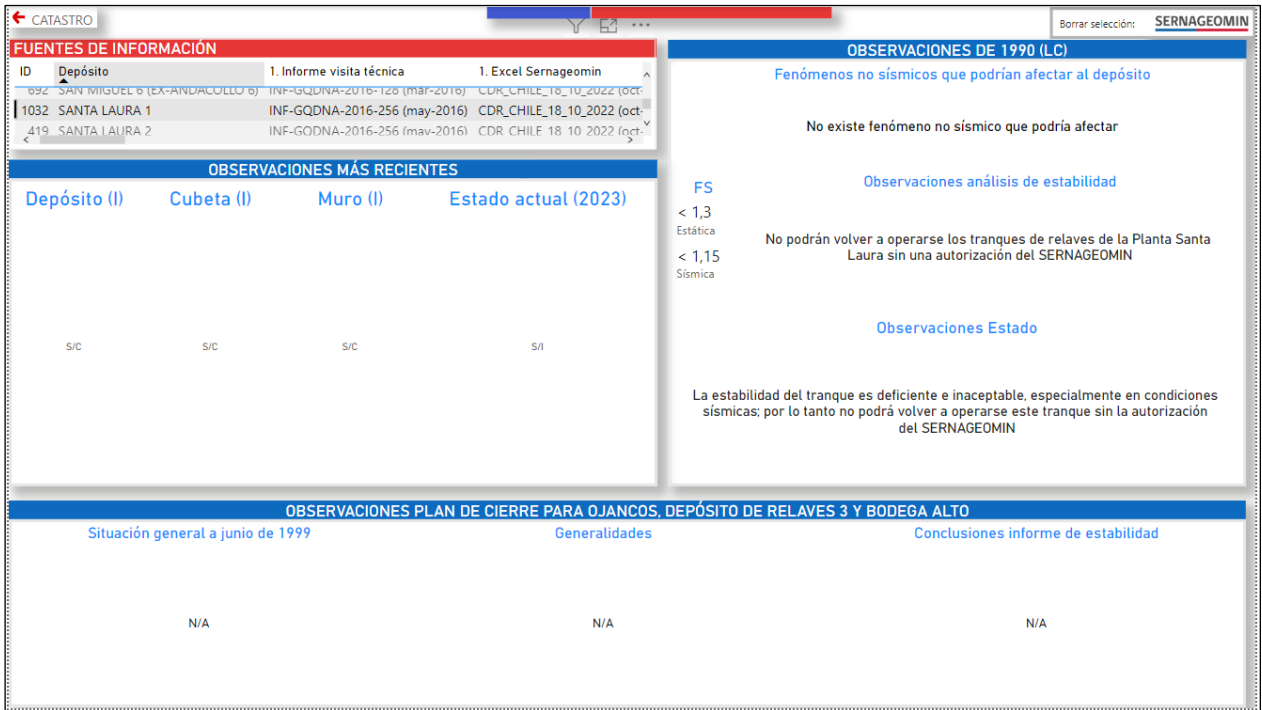


Figura 0-22: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Santa Laura 1”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

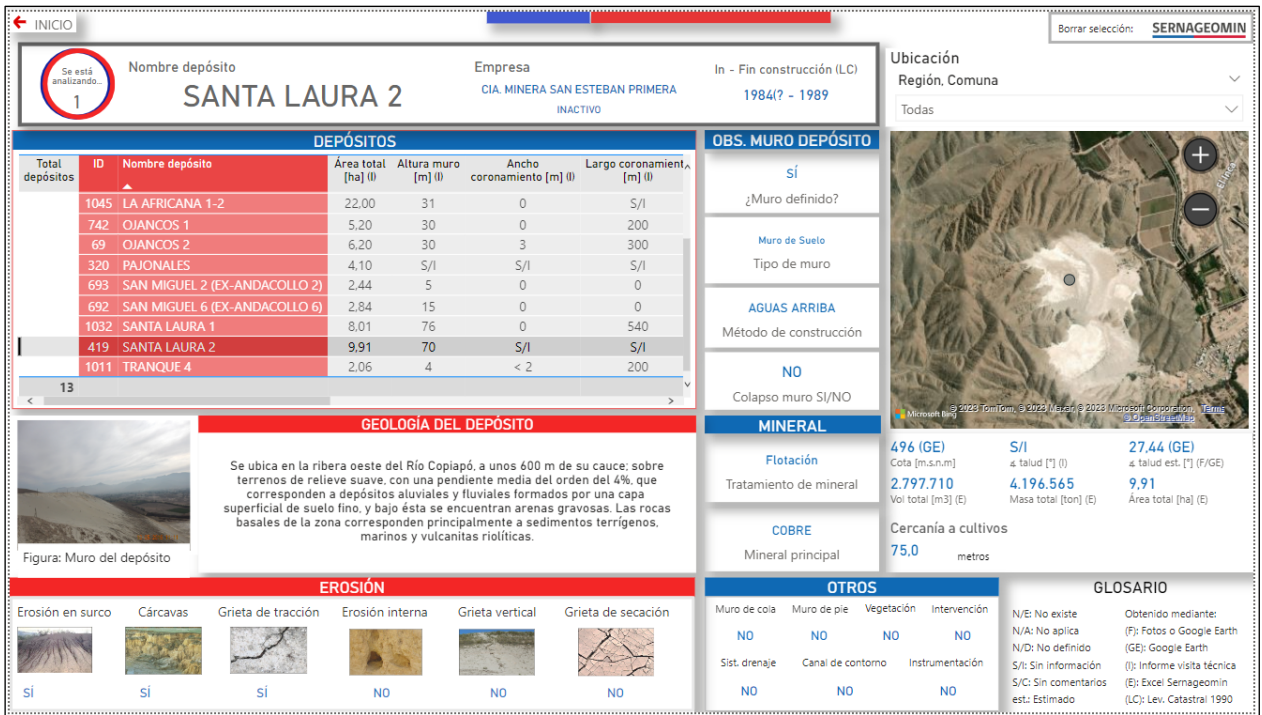


Figura 0-23: Características generales depósito de relaves “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

FUENTES DE INFORMACIÓN				OBSERVACIONES DE 1990 (LC)	
ID	Depósito	1. Informe visita técnica	1. Excel Sernageomin	Fenómenos no sísmicos que podrían afectar al depósito	
1032	SANTA LAURA 1	INF-GQDNA-2016-256 (may-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	No existe fenómeno no sísmico que podría afectar	
419	SANTA LAURA 2	INF-GQDNA-2016-256 (may-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	Observaciones análisis de estabilidad	
2011	TRANQUE 4	INF-GQDNA-2016-256 (may-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	No podrán volver a operarse los tranques de relaves de la Planta Santa Laura sin una autorización del SERNAGEOMIN	
OBSERVACIONES MÁS RECIENTES				Observaciones Estado	
Depósito (I)	Cubeta (I)	Muro (I)	Estado actual (2023)	La estabilidad del tranque es deficiente a inaceptable, especialmente en condiciones sísmicas; por lo tanto no podrá volver a operarse este tranque sin una autorización del SERNAGEOMIN	
S/C	S/C	S/C	S/I		
OBSERVACIONES PLAN DE CIERRE PARA OJANCOS, DEPÓSITO DE RELAVES 3 Y BODEGA ALTO					
Situación general a junio de 1999		Generalidades		Conclusiones informe de estabilidad	
N/A		N/A		N/A	

Figura 0-24: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Santa Laura 2”.
Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

DEPÓSITOS						OBS. MURO DEPÓSITO			
Total depósitos	ID	Nombre depósito	Área total [ha] (I)	Altura muro [m] (I)	Ancho coronamiento [m] (I)	Largo coronamiento [m] (I)	<p>SÍ</p> <p>¿Muro definido?</p> <p>Muro de relaves</p> <p>Tipo de muro</p> <p>AGUAS ARRIBA</p> <p>Método de construcción</p> <p>NO</p> <p>Colapso muro SI/NO</p>		
13	1045	LA AFRICANA 1-2	22,00	31	0	S/I	<p>MINERAL</p> <p>Amalgación y flotación</p> <p>Tratamiento de mineral</p> <p>ORO</p> <p>Mineral principal</p>		
	742	OJANCOS 1	5,20	30	0	200	<p>1067</p> <p>Cota [m.s.n.m]</p> <p>40</p> <p>± talud [°] (I)</p> <p>40 (F)</p> <p>± talud est. [°] (F/GE)</p>		
	69	OJANCOS 2	6,20	30	3	300	<p>145.920</p> <p>Vol total [m3] (E)</p> <p>218.880</p> <p>Masa total [ton] (E)</p> <p>2,06</p> <p>Área total [ha] (E)</p>		
	320	PAJONALES	4,10	S/I	S/I	S/I	<p>Cercanía a poblado y a otros depósitos</p> <p>220,0</p> <p>metros</p>		
	693	SAN MIGUEL 2 (EX-ANDACOLLO 2)	2,44	5	0	0	<p>OTROS</p> <p>Muro de cola</p> <p>Muro de pie</p> <p>Vegetación</p> <p>Intervención</p> <p>NO</p> <p>NO</p> <p>NO</p> <p>SÍ</p>		
	692	SAN MIGUEL 6 (EX-ANDACOLLO 6)	2,84	15	0	0	<p>Sist. drenaje</p> <p>Canal de contorno</p> <p>Instrumentación</p> <p>S/I</p> <p>NO</p> <p>NO</p>		
	1032	SANTA LAURA 1	8,01	76	0	540	<p>GLOSARIO</p> <p>N/E: No existe</p> <p>N/A: No aplica</p> <p>N/D: No definido</p> <p>S/I: Sin información</p> <p>S/C: Sin comentarios est.: Estimado</p> <p>Obtenido mediante:</p> <p>(F): Fotos o Google Earth</p> <p>(GE): Google Earth</p> <p>(I): Informe visita técnica</p> <p>(E): Excel Sernageomin</p> <p>(LC): Lev. Catastral 1990</p>		
	419	SANTA LAURA 2	9,91	70	S/I	S/I			
	1011	TRANQUE 4	2,06	4	< 2	200			
GEOLOGÍA DEL DEPÓSITO									
<p>Se ubica en terrenos que tienen una pendiente media del orden del 8%. Las rocas basales de la zona corresponden mayoritariamente a rocas volcánicas riolíticas y andesíticas. Los sedimentos de cobertura o suelos de la zona corresponden a gravas arenosas, de origen fluvial, y a depósitos de escombreras</p>									
EROSIÓN									
Erosión en surco	Cárcavas	Grieta de tracción	Erosión interna	Grieta vertical	Grieta de secación				
NO	NO	NO	NO	NO	NO				

Figura 0-25: Características generales depósito de relaves “Tranque 4”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

CATASTRO				Borrar selección: SERNAGEOMIN
FUENTES DE INFORMACIÓN				OBSERVACIONES DE 1990 (LC)
ID	Depósito	1. Informe visita técnica	1. Excel Sernageomin	Fenómenos no sísmicos que podrían afectar al depósito
419	SANTA LAURA 2	INF-GQDNA-2016-256 (may-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	Ocurrencia de lluvias intensas, que podría provocar escorrentías superficiales en la ladera del cerro, provocando una excesiva acumulación de aguas en la cubeta y erosión superficial de los muros.
1011	TRANQUE 4	INF-GQDNA-2016-145 (abr-2016)	CDR_CHILE_18_10_2022 (oct-2022)	
OBSERVACIONES MÁS RECIENTES				OBSERVACIONES ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
Depósito (I)	Cubeta (I)	Muro (I)	Estado actual (2023)	FS
EXISTEN OTROS 6 DEPÓSITOS EN PREDIO SUPERFICIAL DE LA EMPRESA. SE ENCUENTRA CARRETERA	RELAVE FRESCO EN SUPERFICIE (DESCARGA DE UNAS SEMANAS ATRÁS 2016)	CRECIMIENTO DEL MURO AGUAS ARRIBA	S/I	< 1,3 Estática
				< 1,1 Sísmica
				Se recomienda mejorar la situación actual de acuerdo a lo indicado.
				OBSERVACIONES ESTADO
				La estabilidad del tranque es inaceptablemente baja, por lo que la probabilidad de falla de su muro es alta, especialmente en condiciones sísmicas; por tanto, se requiere mejorar la situación actual de este tranque. Al respecto, se recomienda lo siguiente: Aumentar al máximo la revancha de su muro, proceder a la compactación de las arenas del muro después de su colocación, a objeto de aumentar su compacidad, proceder a disminuir la inclinación de los taludes de aguas abajo del muro, a no más de unos 35°, dejar la mayor distancia posible entre la poza de sedimentación y la parte más alta del muro.
OBSERVACIONES PLAN DE CIERRE PARA OJANCOS, DEPÓSITO DE RELAVES 3 Y BODEGA ALTO				
Situación general a junio de 1999		Generalidades		Conclusiones informe de estabilidad
N/A		N/A		N/A

Figura 0-26: Fuentes de información y observaciones depósito de relaves “Tranque 4”. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Power BI.

Anexo B

Procedimiento de Interferometría Satelital

Se muestran los resultados del procedimiento para la medición de deformaciones obtenidas con interferometría satelital mediante el software SARPROZ.

Depósito de relaves “Ojancos 1” – Órbita ascendente

Estimación de APS

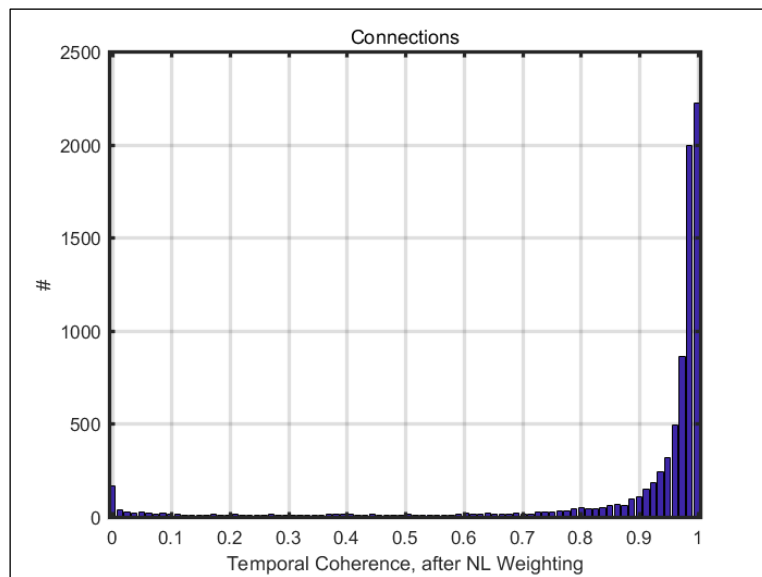


Figura 0-1:Temporal coherence after NL Weighting. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

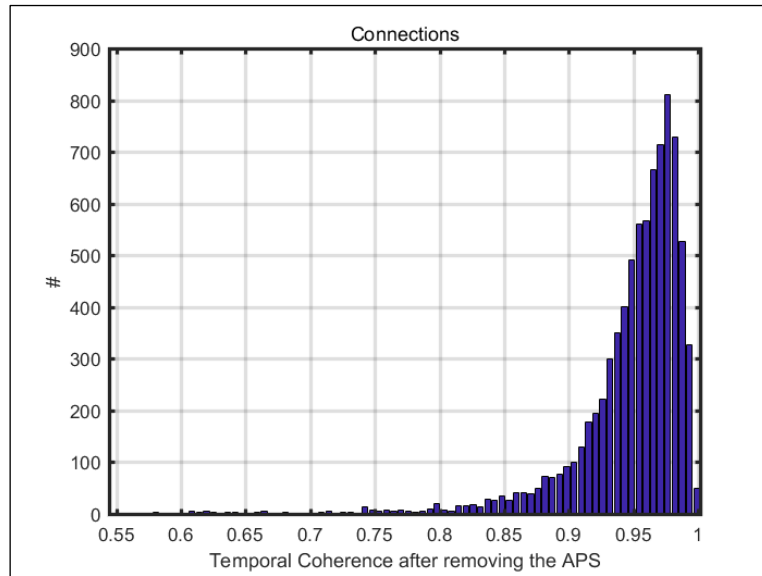


Figura 0-2: Temporal coherence after removing the APS. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

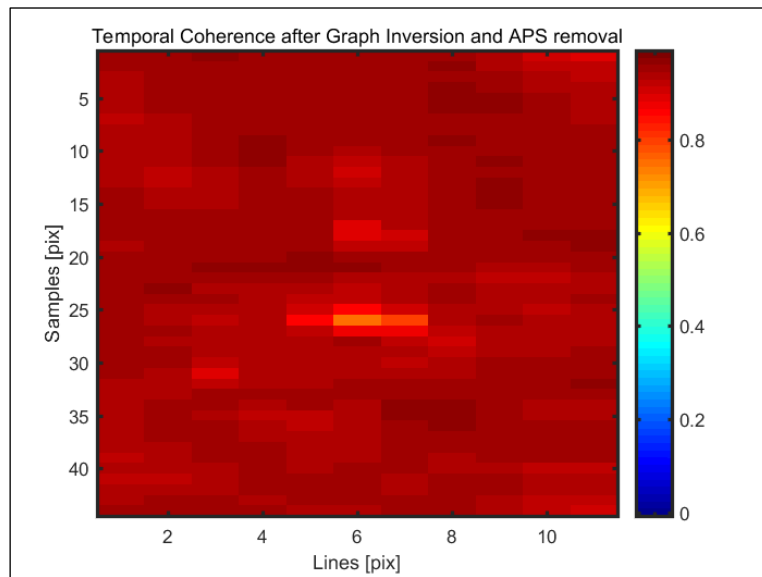


Figura 0-3: Temporal coherence after graph inversion and APS removal. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

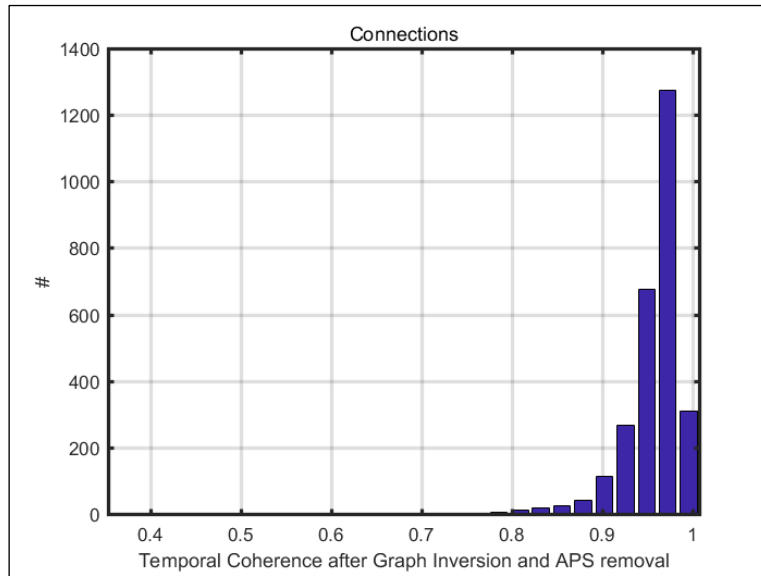


Figura 0-4: Temporal coherence after graph inversion and APS removal histogram. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

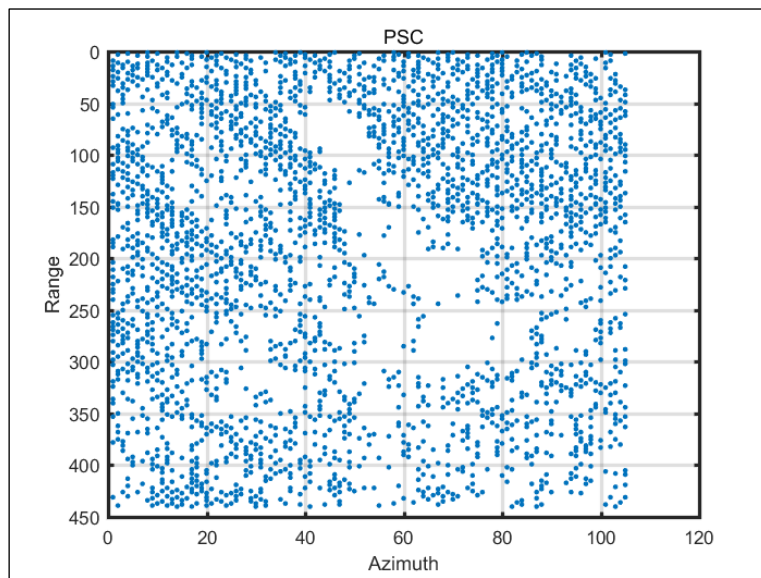


Figura 0-5: Sparse points selection, $ASI > 0.7$ $DS = 2$. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

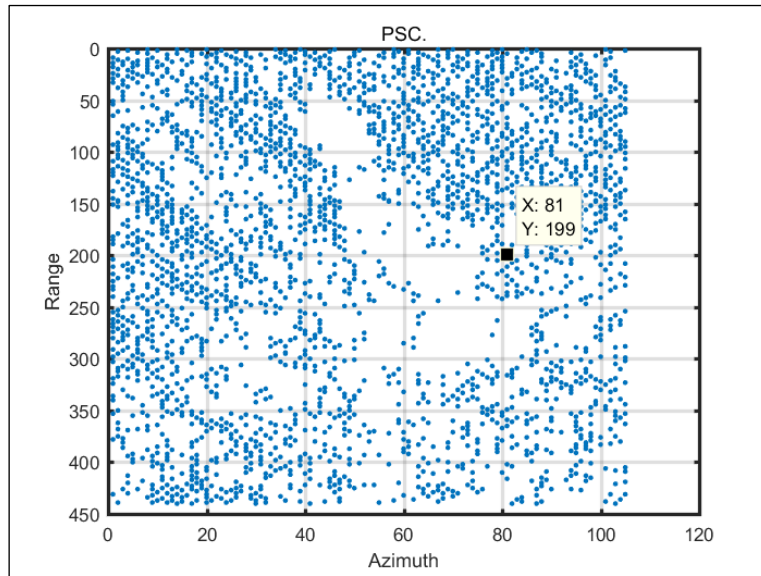


Figura 0-6: Sparse reference point. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

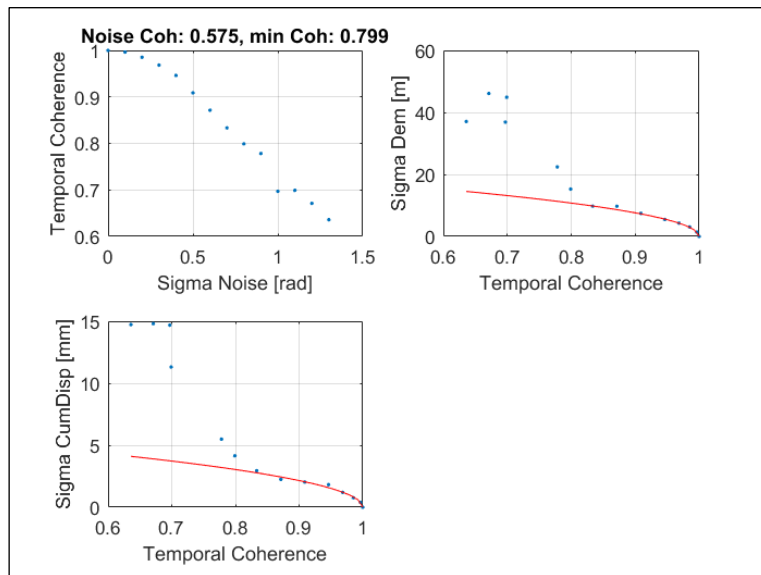


Figura 0-7: Estadísticas. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

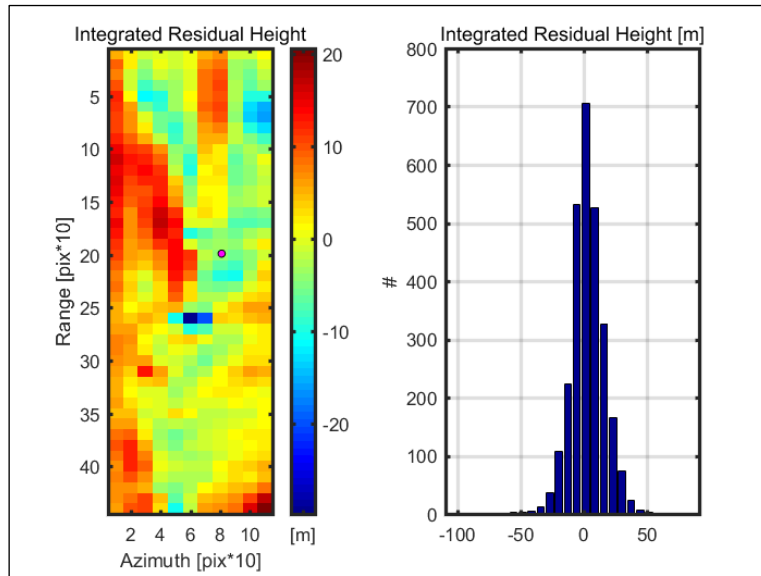


Figura 0-8: Integrated residual height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

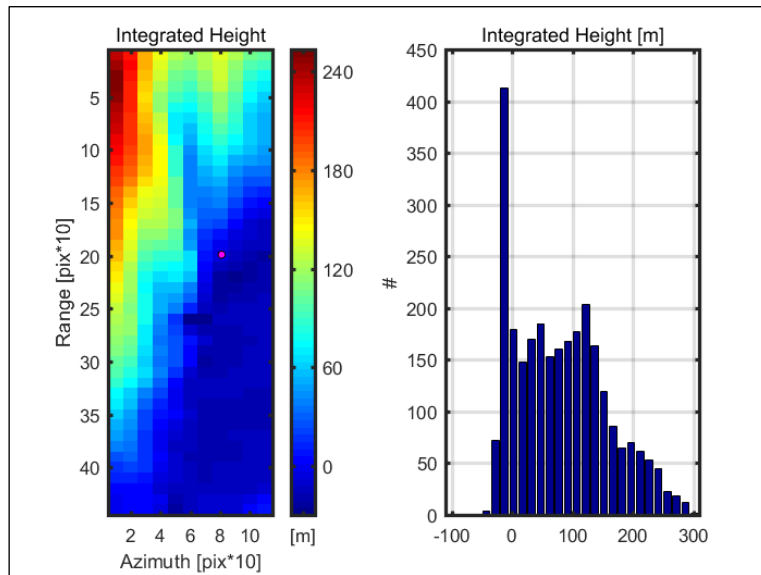


Figura 0-9: Integrated height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

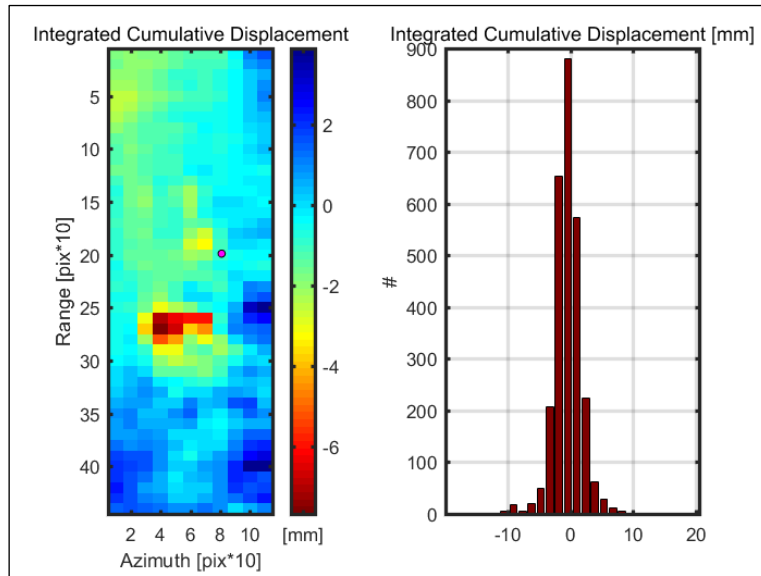


Figura 0-10: Integrated cumulative displacement. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

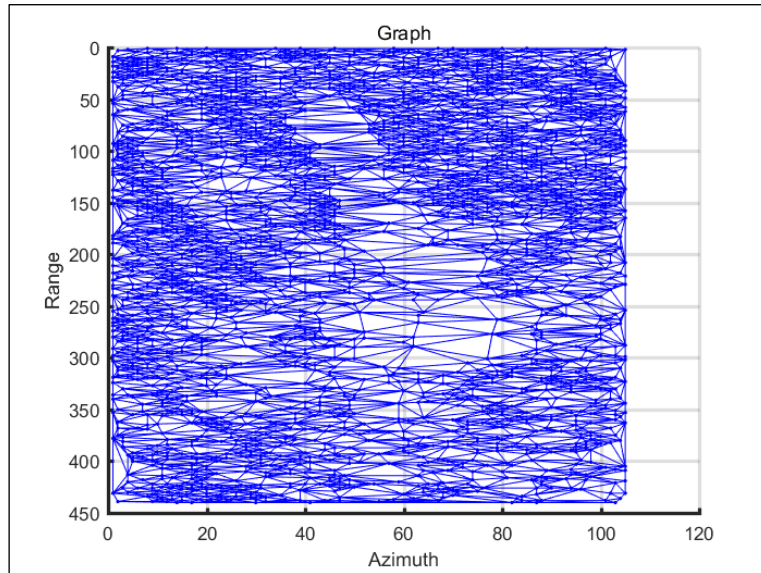


Figura 0-11: Graph connection. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

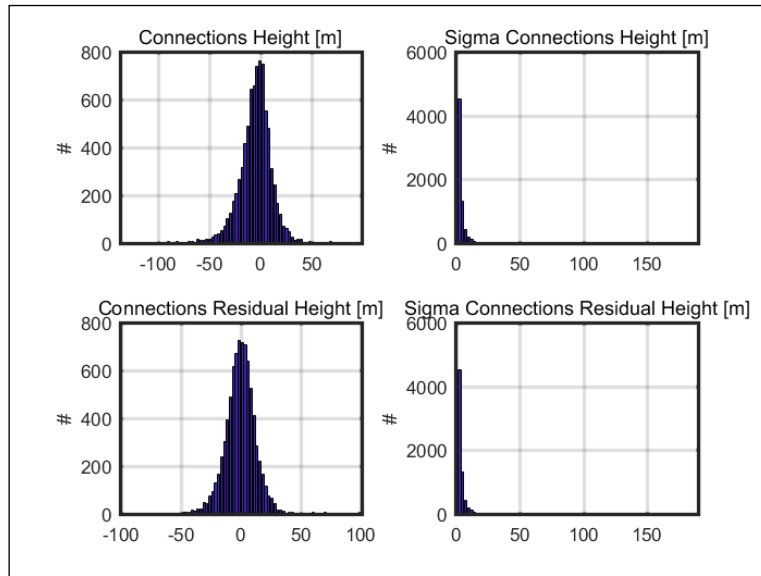


Figura 0-12: Connections height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

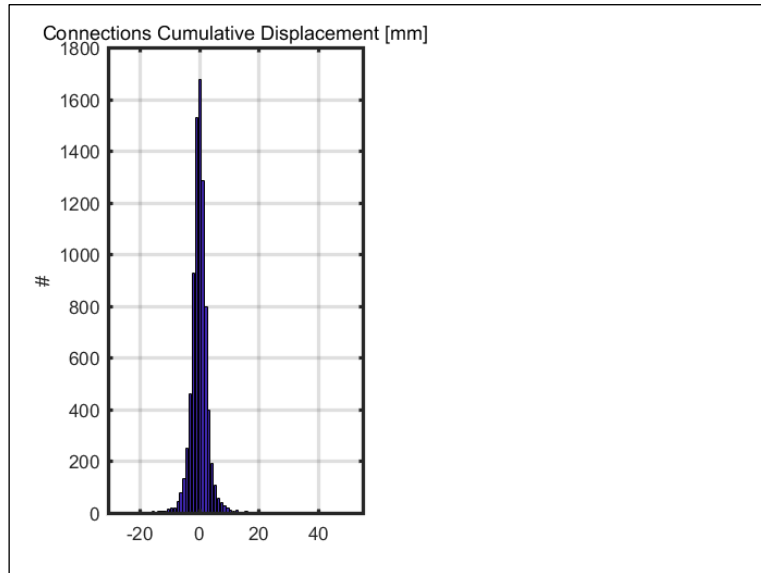


Figura 0-13: Connections cumulative displacement. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

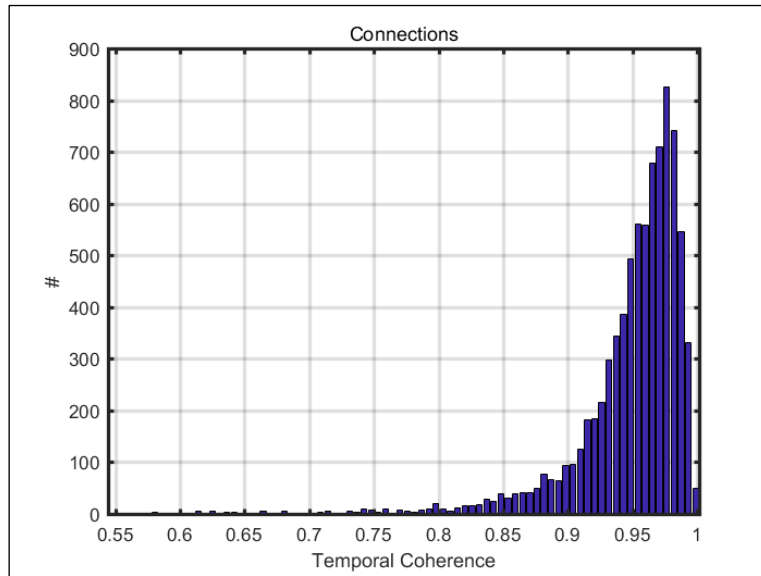


Figura 0-14: Connections coherence histogram. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

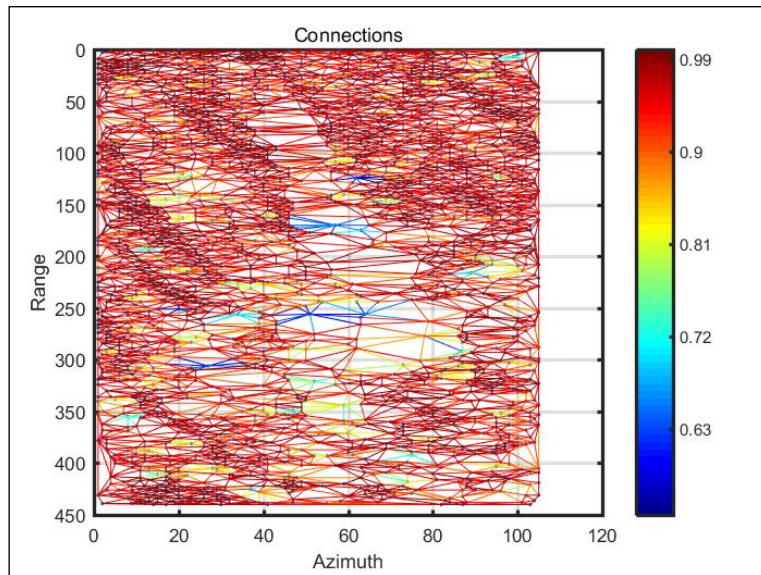


Figura 0-15: Connections coherence graph. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

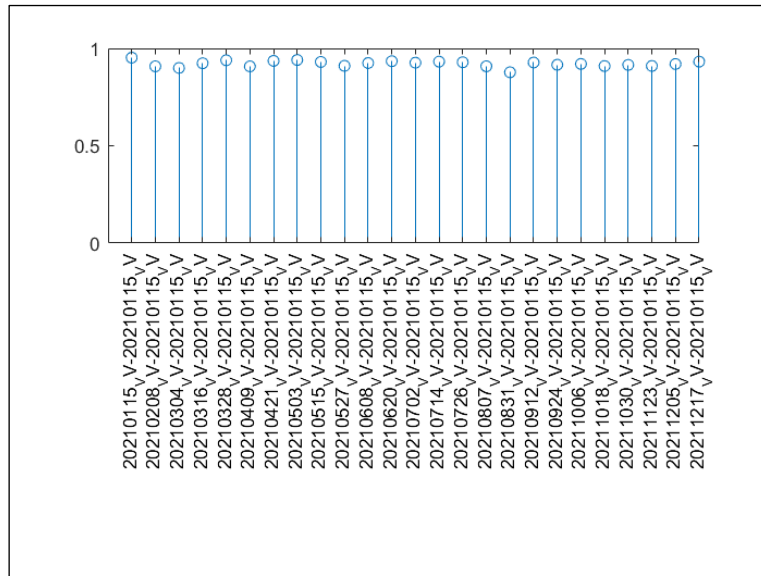


Figura 0-16: Coherence between each slave date and the master date. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

Multi-image Sparse Point Processing

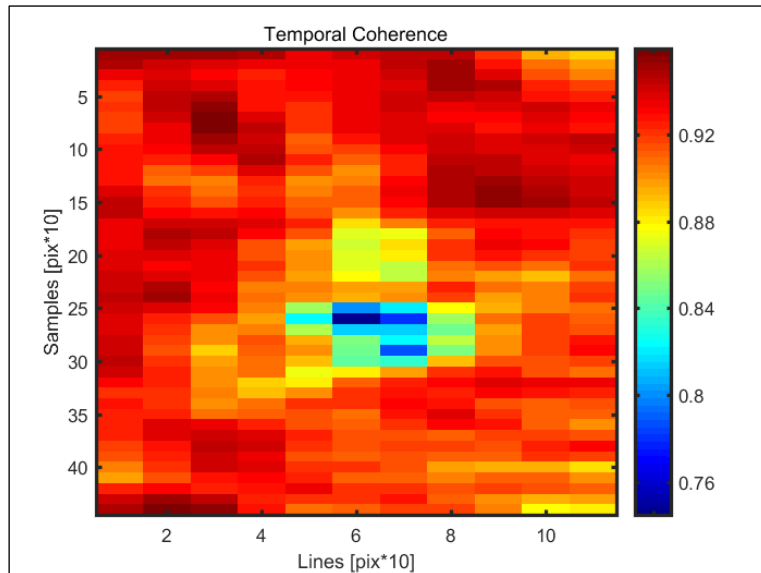


Figura 0-17: Temporal coherence. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

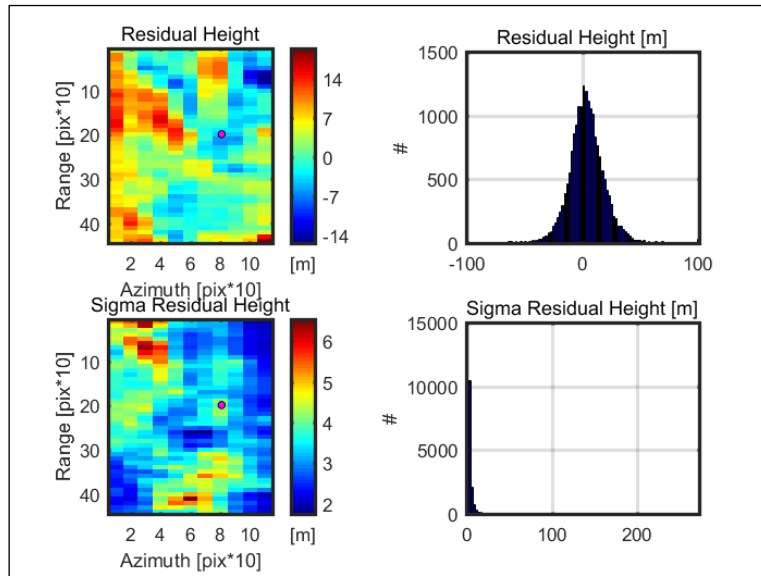


Figura 0-18: Residual height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

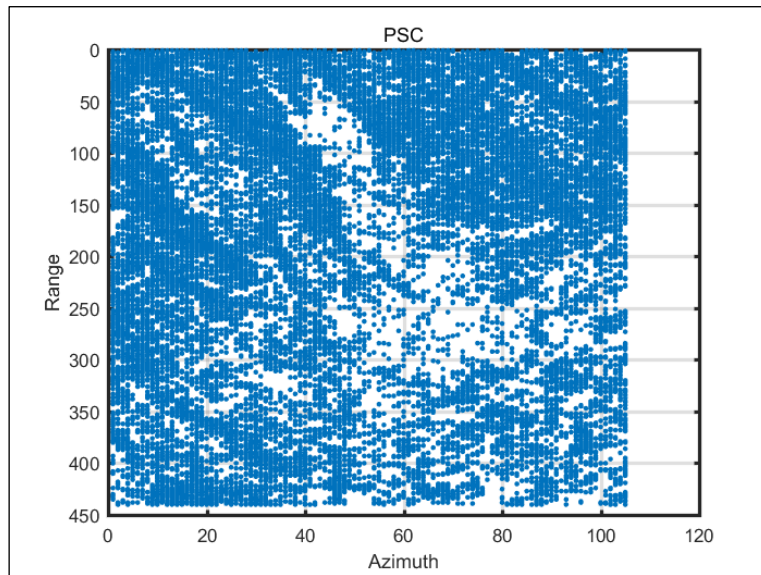


Figura 0-19: Sparse point selection ASI > 0.6. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

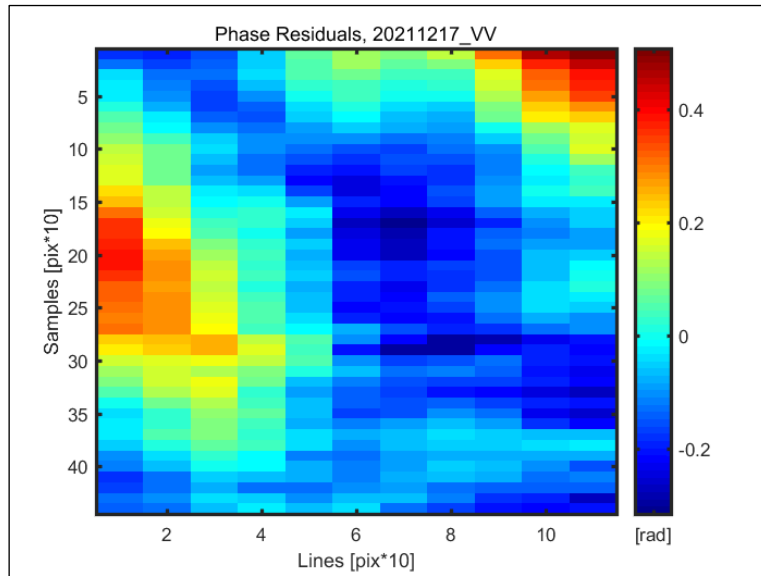


Figura 0-20: Phase residuals 17/12/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

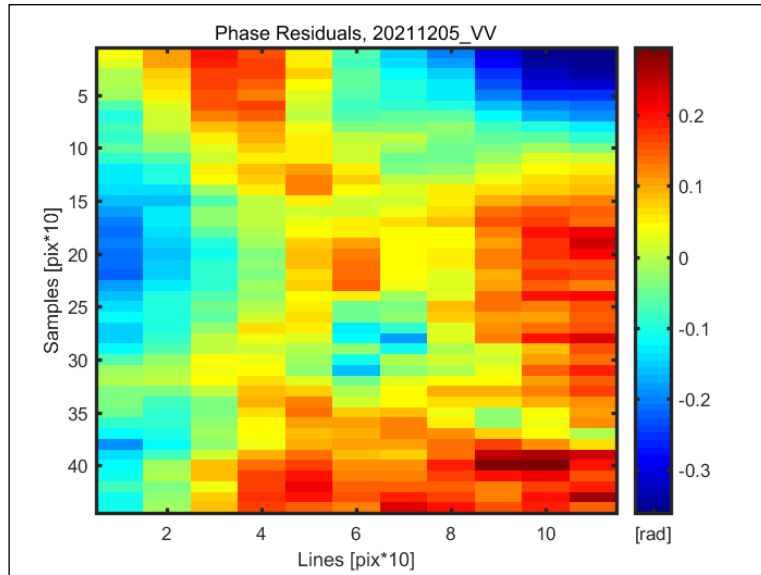


Figura 0-21: Phase residuals 05/12/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

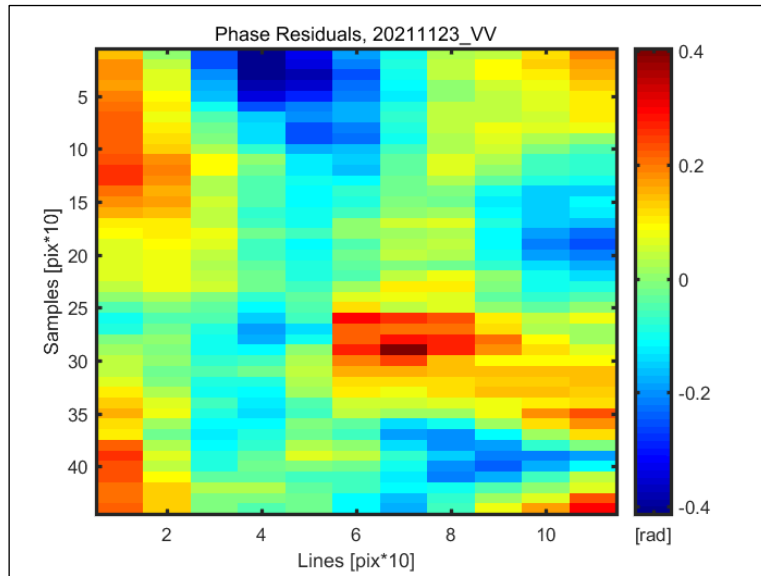


Figura 0-22: Phase residuals 23/11/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

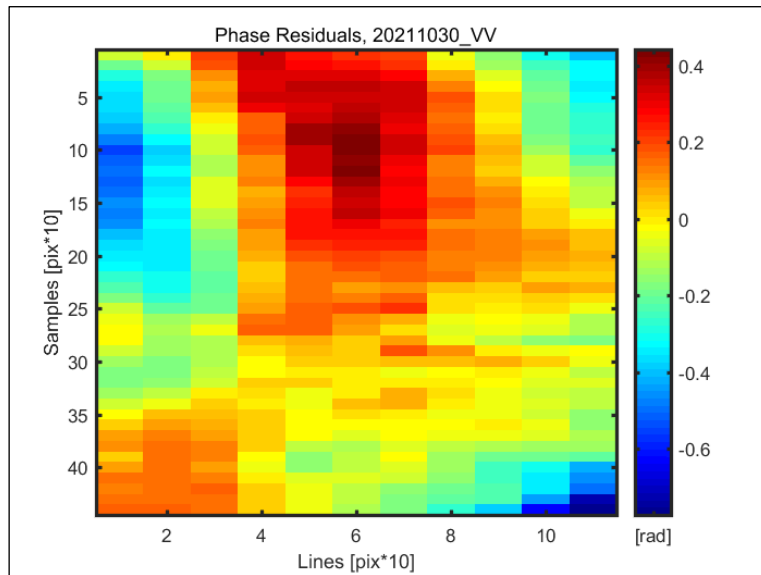


Figura 0-23: Phase residuals 30/10/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

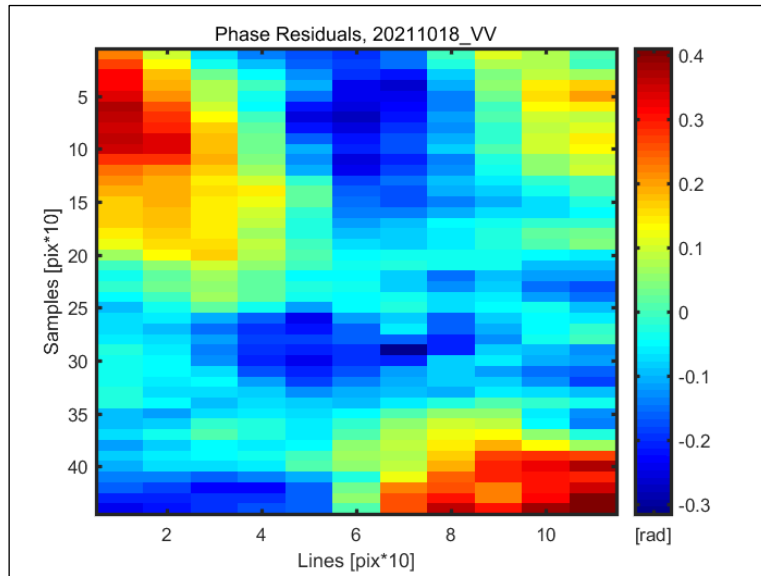


Figura 0-24: Phase residuals 18/10/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

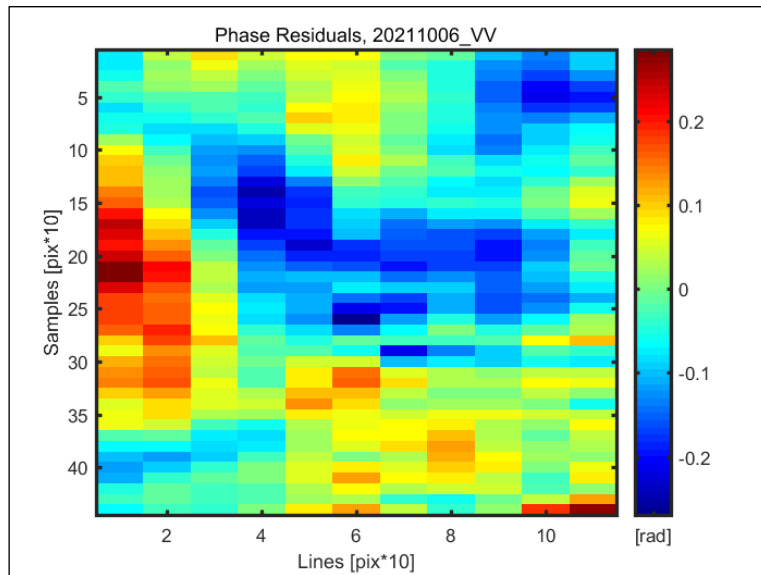


Figura 0-25: Phase residuals 06/10/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

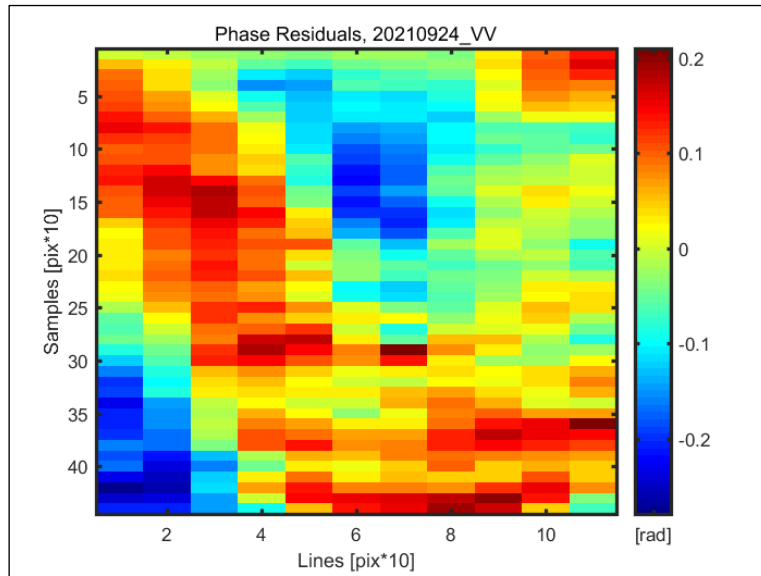


Figura 0-26: Phase residuals 24/09/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

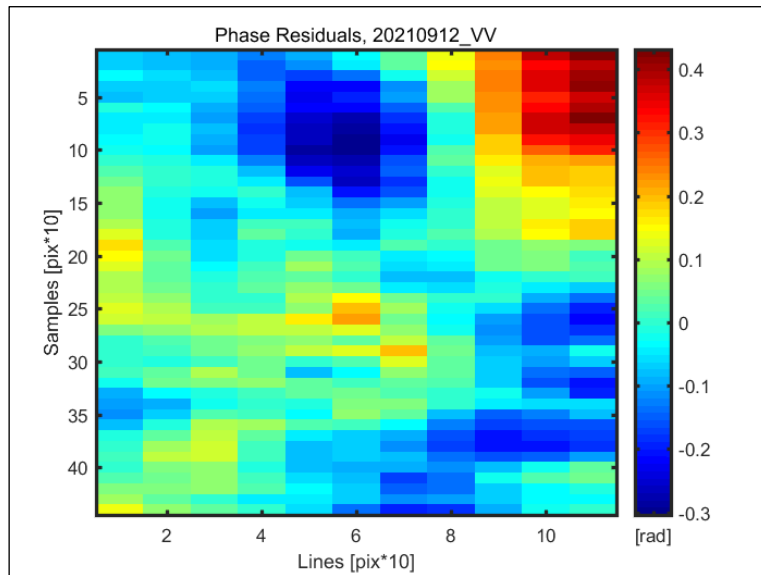


Figura 0-27: Phase residuals 12/09/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

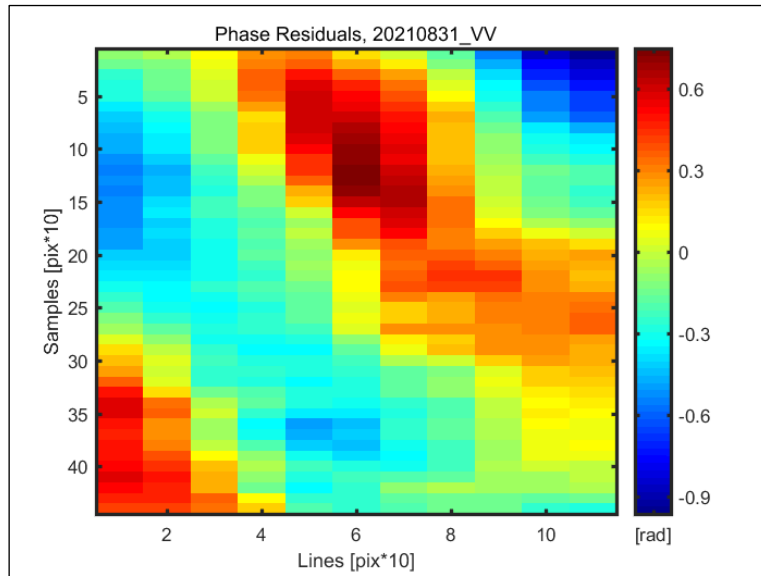


Figura 0-28: Phase residuals 31/08/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

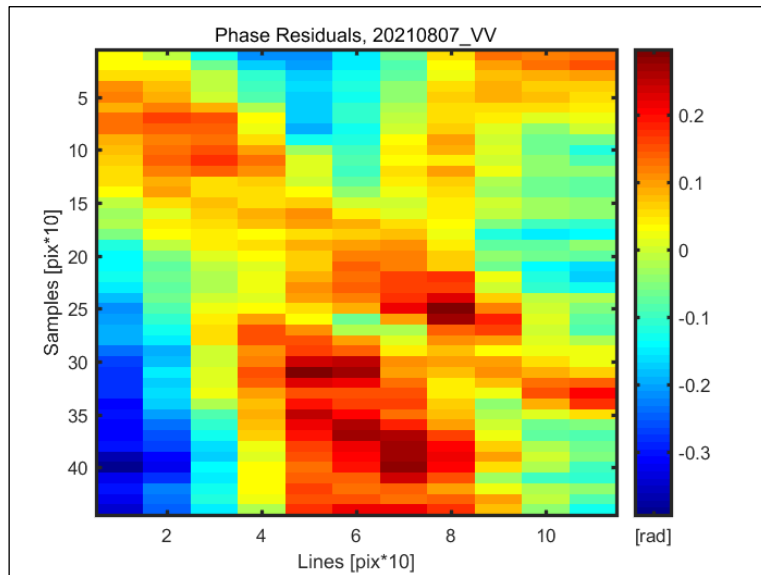


Figura 0-29: Phase residuals 07/08/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

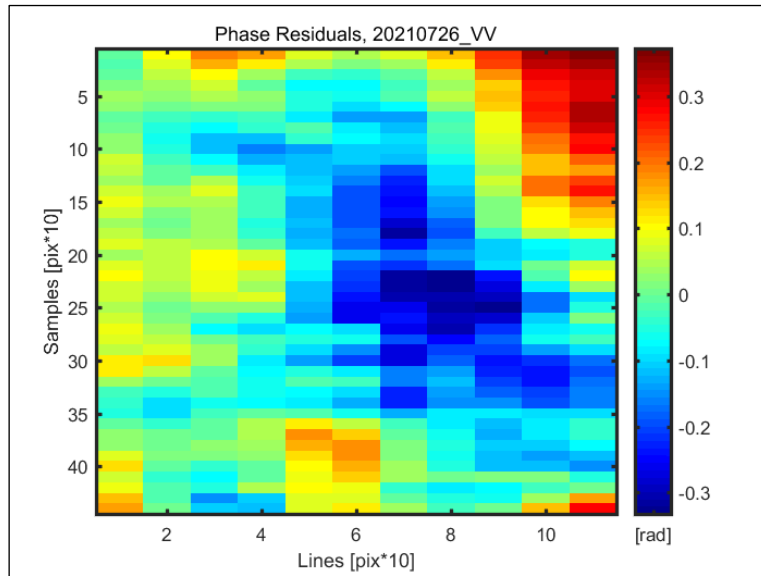


Figura 0-30: Phase residuals 26/07/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

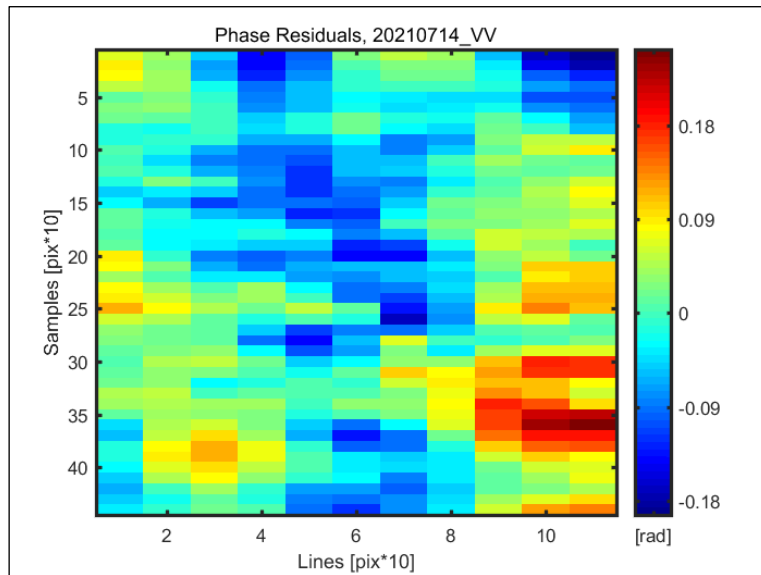


Figura 0-31: Phase residuals 14/07/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

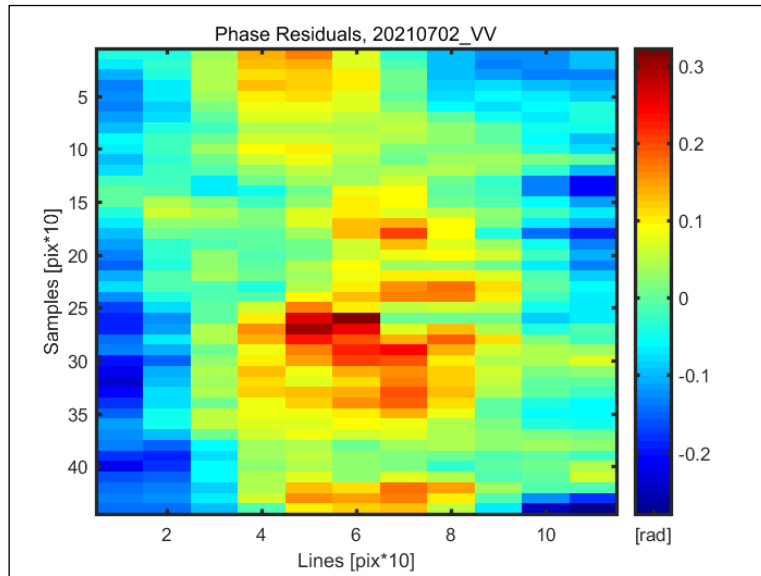


Figura 0-32: Phase residuals 02/07/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

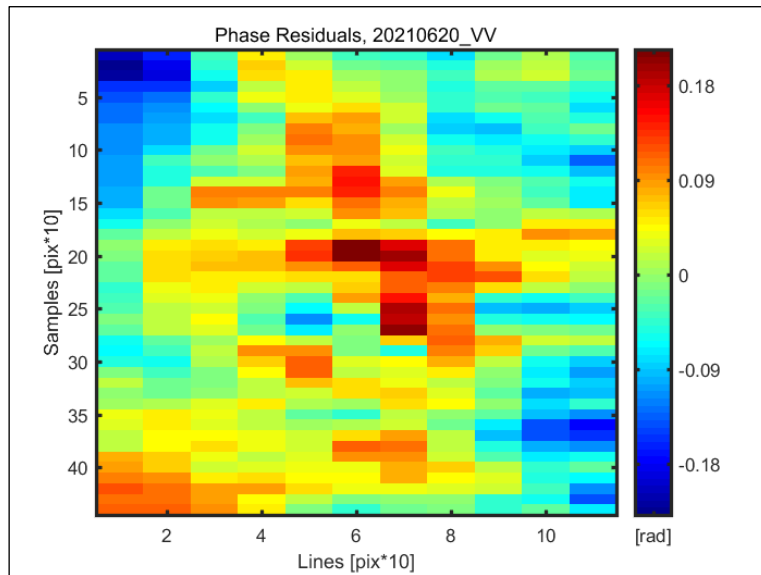


Figura 0-33: Phase residuals 20/06/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

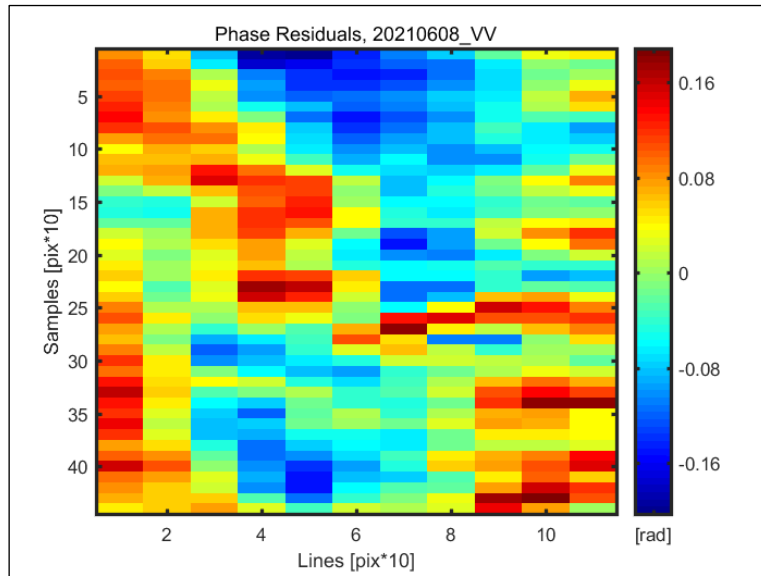


Figura 0-34: Phase residuals 08/06/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

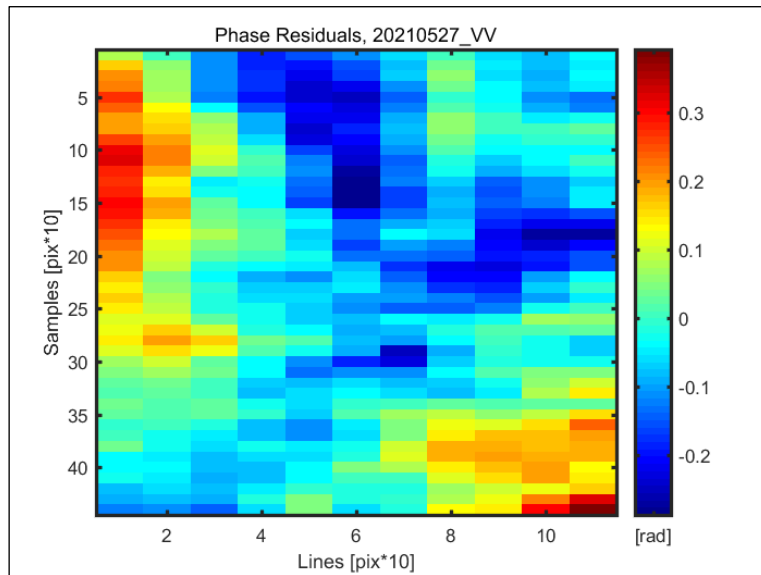


Figura 0-35: Phase residuals 27/05/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

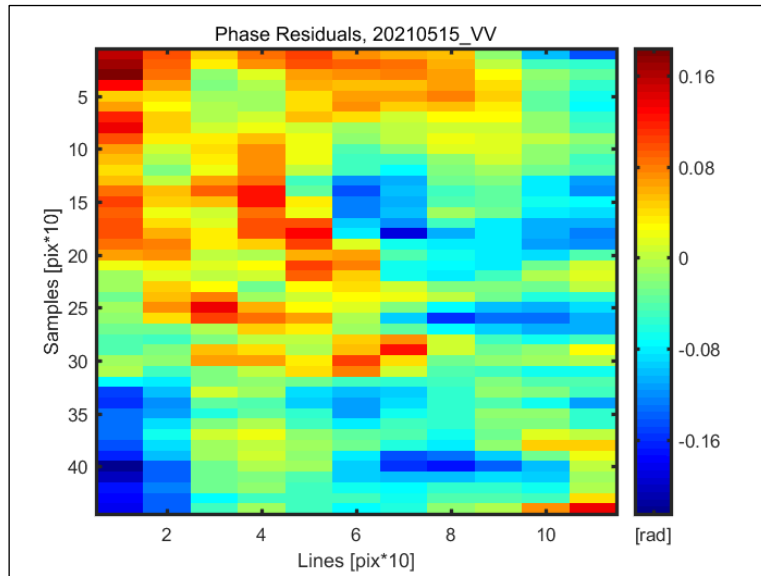


Figura 0-36: Phase residuals 15/05/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

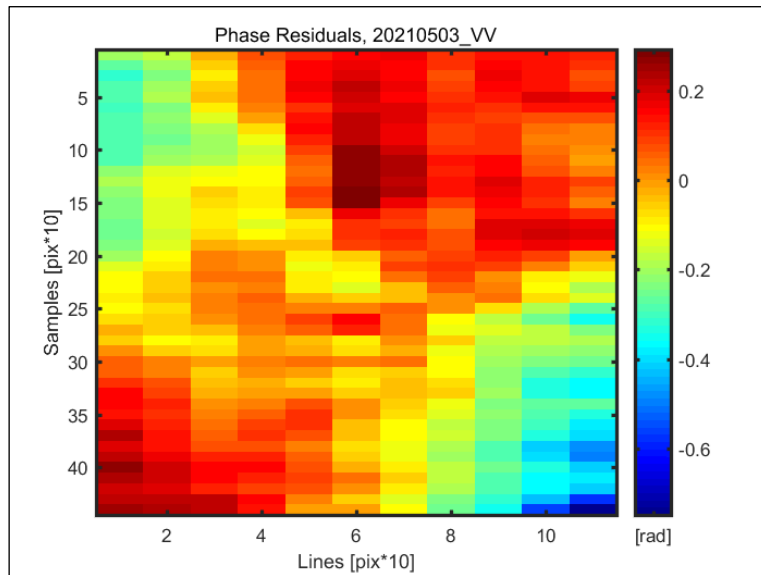


Figura 0-37: Phase residuals 03/05/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

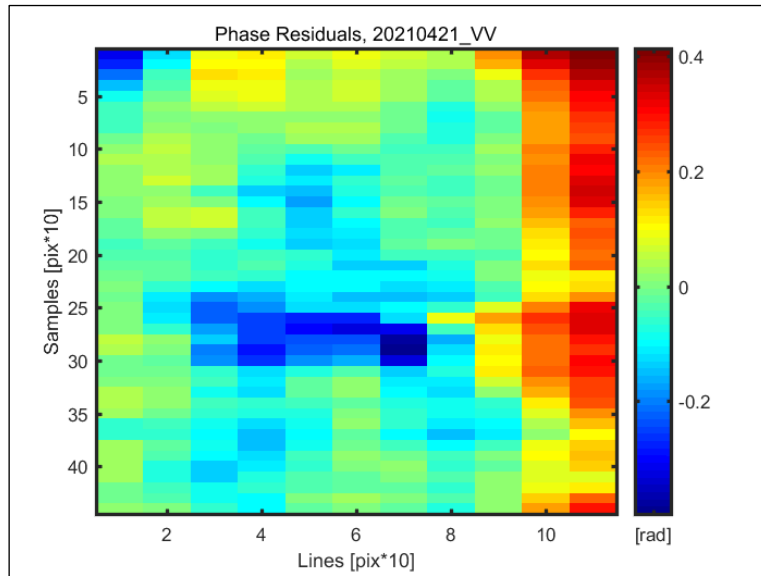


Figura 0-38: Phase residuals 21/04/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

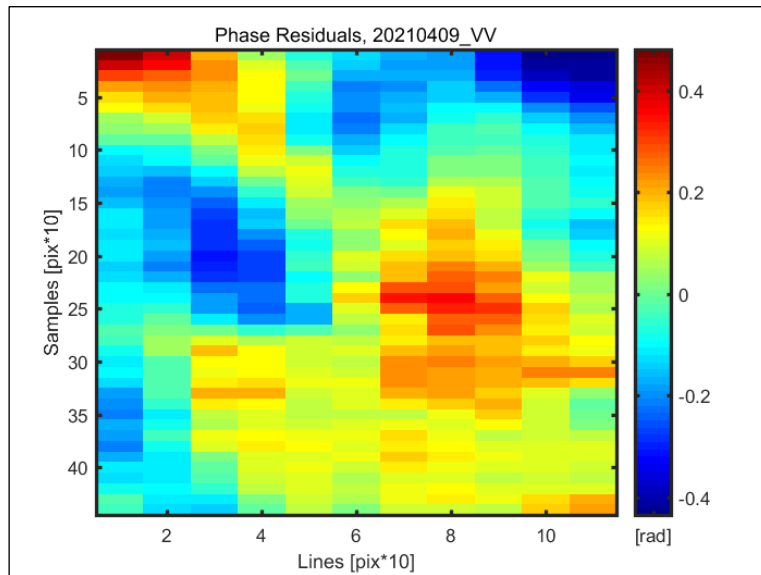


Figura 0-39: Phase residuals 09/04/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

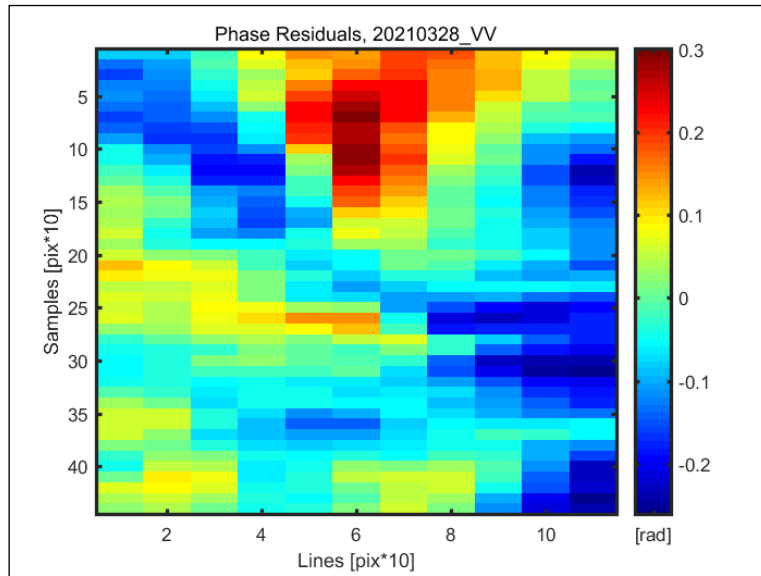


Figura 0-40: Phase residuals 20/03/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

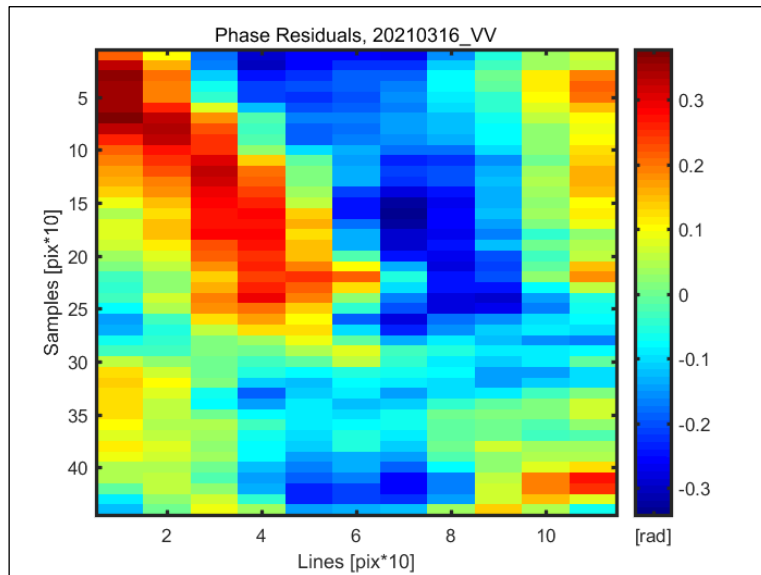


Figura 0-41: Phase residuals 16/03/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

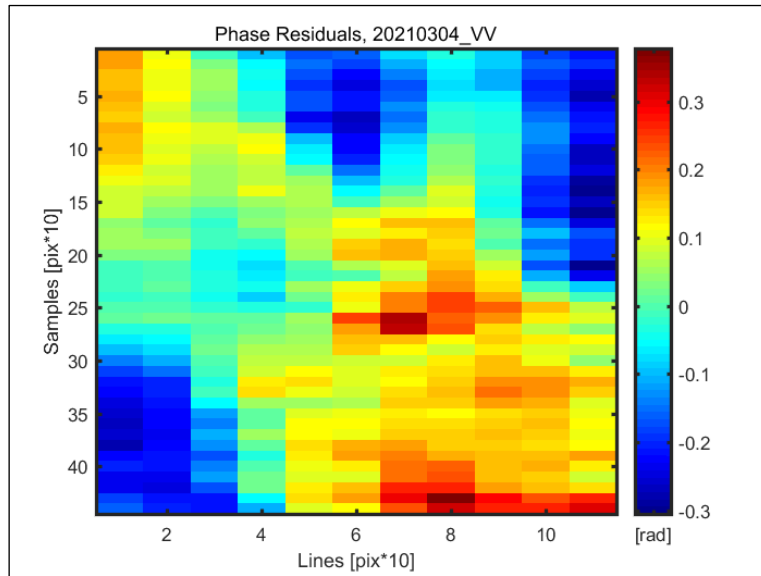


Figura 0-42: Phase residuals 04/03/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

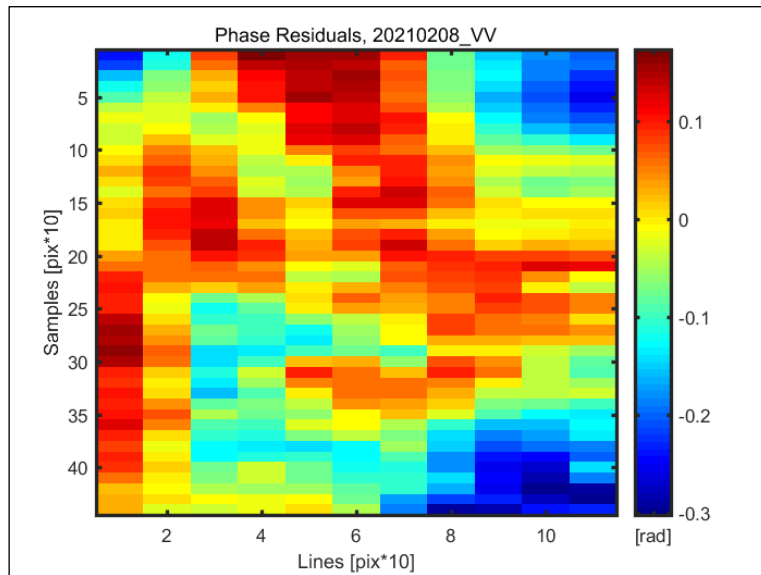


Figura 0-43: Phase residuals 08/02/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

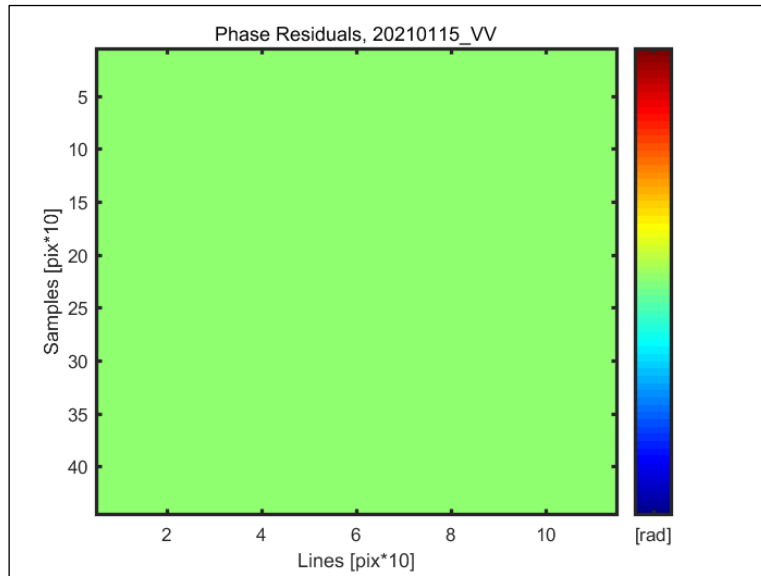


Figura 0-44: Phase residuals 15/01/2021. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

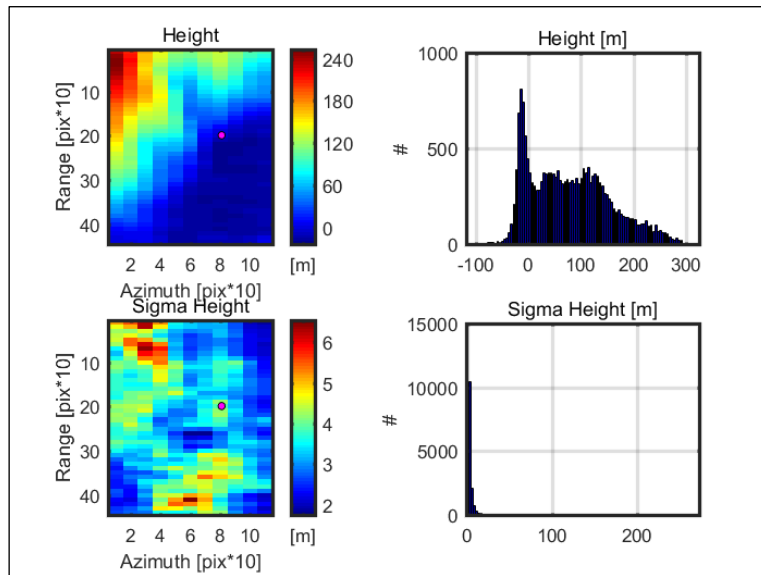


Figura 0-45: Height. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

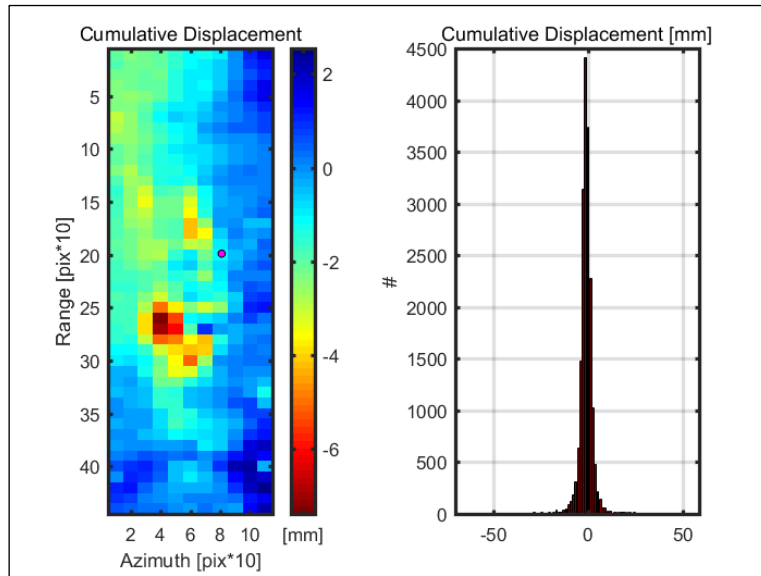


Figura 0-46: Cumulative Displacement. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

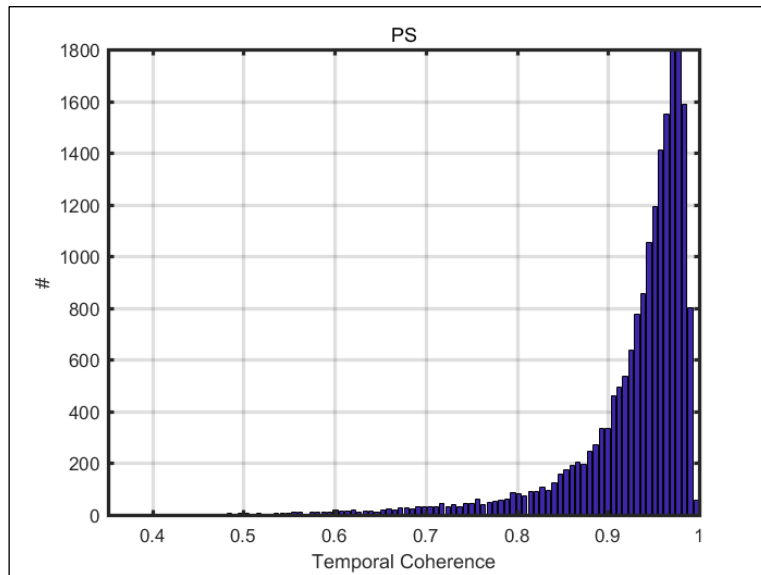


Figura 0-47: Coherence histogram after parameter estimation and APS removal. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

Anexo C

Combinación y coherencia entre imágenes SAR

Se muestra la combinación de las imágenes para cada uno de los depósitos, en particular, se utiliza la combinación STAR que consta de la selección de una imagen primaria que es combinada con las imágenes secundarias.

Además, se muestra la coherencia de las combinaciones de imágenes realizadas mediante el software SARPROZ.

Depósito de relaves “Ojancos 1” y “Ojancos 2”

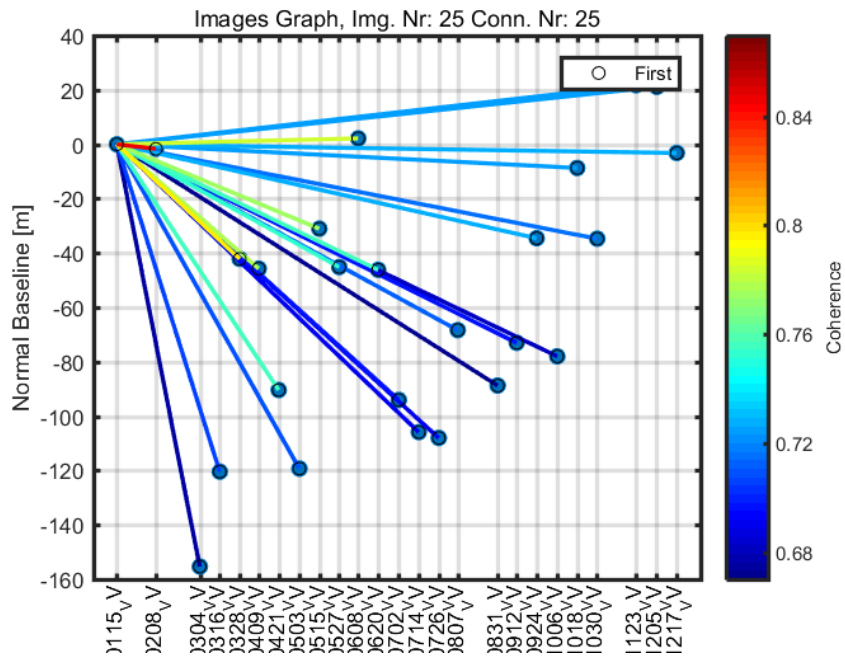


Figura 0-1: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósitos “Ojancos 1” y “Ojancos 2”.

Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

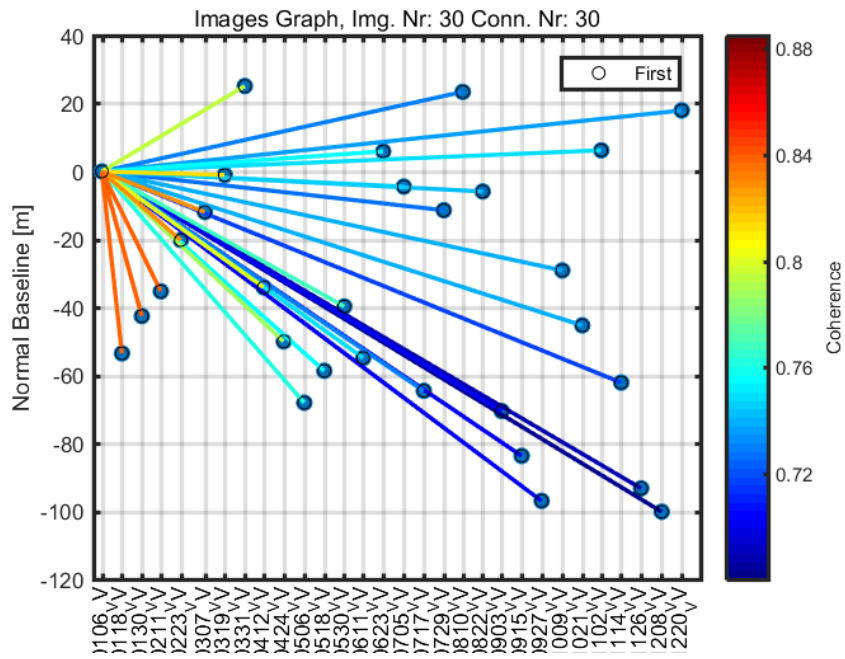


Figura 0-2: Coherencia entre imágenes descendentes para depósitos “Ojancos 1” y “Ojancos 2”.
Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

Depósito de relaves “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”

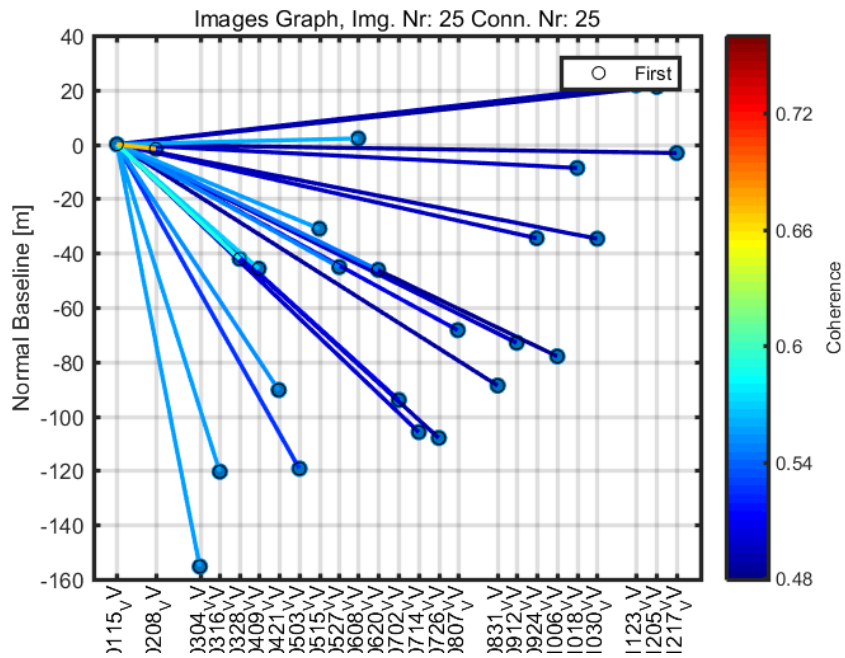


Figura 0-3: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

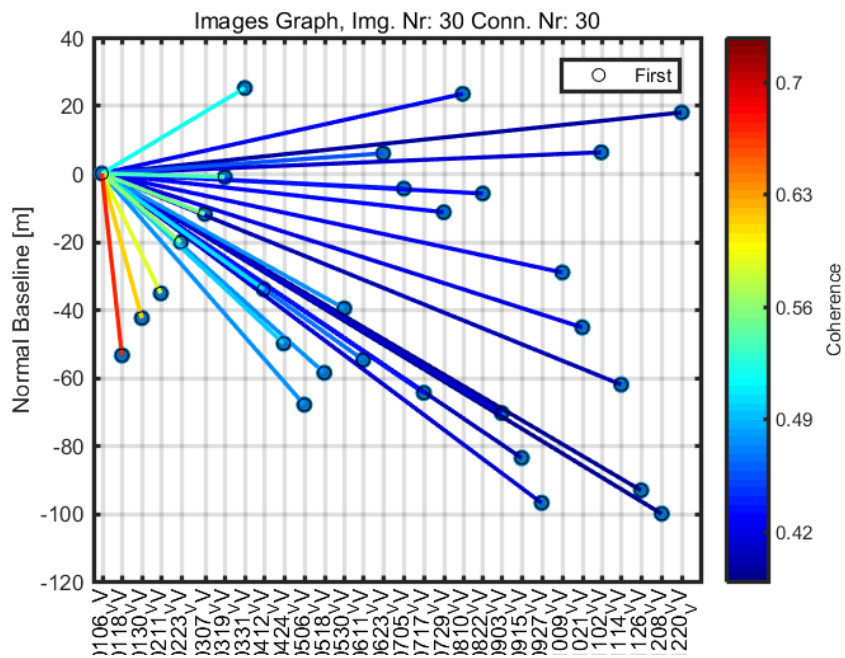


Figura 0-4: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósitos “Santa Laura 1” y “Santa Laura 2”.

Depósito de relaves “Desconocido”

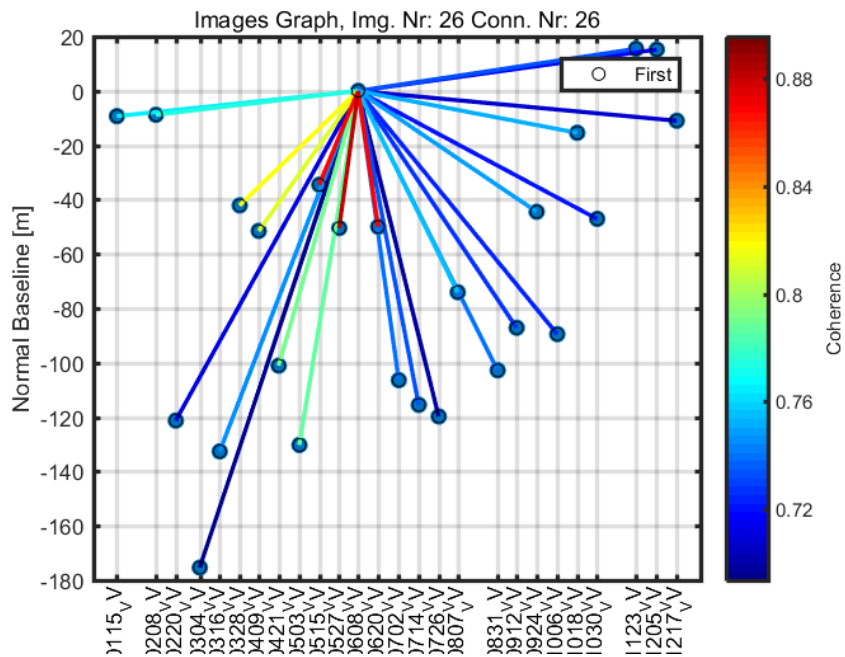


Figura 0-5: Coherencia entre imágenes ascendentes para depósito “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.

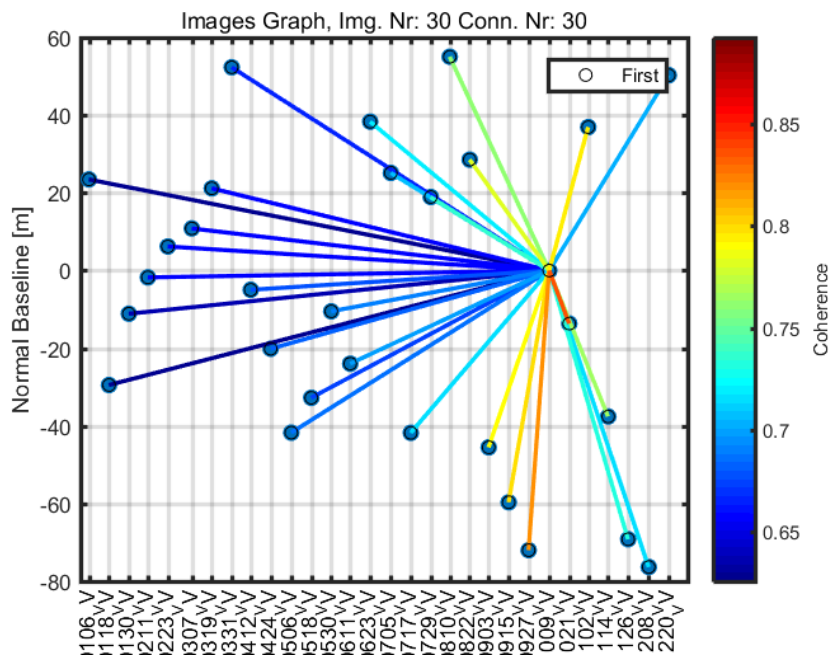


Figura 0-6: Coherencia entre imágenes descendentes para depósito “Desconocido”. Fuente: Elaboración propia con SARPROZ.