

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas



TESIS PROFESIONAL

**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MONITOREO PARA EL CONTROL DE
ESTABILIDAD DE LA PRESA DE RELAVES, U.M. YAURICOCHA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Ruth Isabel Cabrera Boñón

ASESOR:

Ing. Roberto Severino Gonzales Yana

Cajamarca - Perú

2018

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por ser quien dirige mi vida, me da la dirección, fuerzas y sabiduría para lograr mis objetivos.

Asimismo, quiero agradecer a mis padres y hermanos, quienes perennemente me apoyan y fortalecen para lograr mis objetivos.

Y un agradecimiento sincero a mi alma mater, Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Escuela Académico profesional de Ingeniería de Minas y a mis docentes quienes con sus enseñanzas contribuyeron significativamente en mi formación profesional.

Ruth Cabrera

DEDICATORIA

A Dios, mis padres amados Wilder e Isabel y hermanos Cristhian, Tania y Dámaris; quienes incondicionalmente me brindan su apoyo para lograr mis metas y objetivos, con todo mi amor les dedico la presente tesis.

Ruth Cabrera

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE FOTOS	x
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xi
ABREVIATURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	4
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS	4
2.2. BASES TEÓRICAS	5
2.2.1. Análisis de estabilidad de una presa de relaves	5
2.2.2. Normas legales que sustentan la investigación.....	8
2.2.3. Riesgos geotécnicos en presas de relaves	9
2.2.4. Sistema de Monitoreo Geotécnico.....	11
2.2.5. Implementación de instrumentación geotécnica para monitoreo	17
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	30
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	31
3.1.1. Ubicación geográfica.....	31
3.1.2. Accesibilidad	31
3.1.3. Clima	33
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	33

	Pág.
3.2.1. Variables.....	33
3.2.2. Tipo y diseño de la investigación	34
3.2.3. Población de estudio.....	34
3.2.4. Muestra.....	34
3.2.5. Unidad de análisis.....	34
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	34
3.3.1. Técnicas.....	34
3.3.2. Instrumentos, Materiales y Equipos	34
3.3.3. Software's usados para el procesamiento de datos.....	34
3.4. PROCEDIMIENTO	35
3.4.1. Etapa preliminar de gabinete	35
3.4.2. Etapa de campo.....	35
3.4.3. Etapa final de gabinete	36
3.5. CONTEXTO.....	36
3.5.1. Geología Local	36
3.5.2. Geología Estructural.....	39
3.5.3. Geología del Yacimiento.....	39
3.5.5. Geodinámica Externa	39
3.5.6. Sismicidad	39
3.6. ESTADO ACTUAL DE LA PRESA DE RELAVES.....	40
3.6.1. Descripción del proyecto	40
3.6.2. Criterios de diseño.....	41
3.6.3. Caracterización Geotécnica	41
3.6.4. Propiedades de los Materiales	41
3.6.5. Estabilidad de la presa de relaves	42
3.6.6. Dique de contención.....	43
3.7. CORROBORACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD.....	44
3.8. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO	57
3.8.1. Objetivos de la implementación del sistema de monitoreo	59
3.8.2. Variables para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves	59
3.8.3. Valores y estándares de criticidad para monitorear la presa de relaves	60
3.8.4. Selección de equipos para monitoreo	61
3.8.5. Instalación de los instrumentos de medición.....	62
3.9. EJECUCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO	71

	Pág.
3.9.1. Resultados obtenidos a partir de la instrumentación geotécnica	71
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	88
4.2. ANÁLISIS DEL MONITOREO DE ESTABILIDAD	89
4.2.1. Análisis de movimientos superficiales	89
4.2.2. Análisis de movimientos en el interior del dique de la presa de relaves	92
4.2.3. Análisis del comportamiento del agua.....	94
4.2.4. Plan y medidas de contingencia.....	94
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	97
CAPÍTULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
5.1. CONCLUSIONES.....	98
5.2. RECOMENDACIONES	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	106

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones geológicas para diferentes tipos de falla.....	6
Tabla 2. Factores asociados a los mecanismos de fallas en presas de relaves	7
Tabla 3. Criterios de Diseño Geotécnico.....	8
Tabla 4. Mecanismos de falla a analizar en depósitos de relaves.....	11
Tabla 5. Enfoque sistemático del planeamiento de un programa de instrumentación .	16
Tabla 6. Equipos utilizados en las mediciones geotécnicas	18
Tabla 7. Métodos de controles de movimientos en el interior del terreno	26
Tabla 8. Control de monitoreo del nivel freático de un talud.....	29
Tabla 9. Accesibilidad a la zona de estudio.....	31
Tabla 10. Variables de la investigación.....	33
Tabla 11. Columna estratigráfica.....	38
Tabla 12. Propiedades de los Materiales	42
Tabla 13. Resultados del Modelo de Estabilidad	43
Tabla 14. Características del Dique de Contención.....	44
Tabla 15. Variables para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves	59
Tabla 16. Estándar de criticidad para movimientos superficiales – TM 50	60
Tabla 17. Estándar de criticidad para movimientos internos.....	60
Tabla 18. Prisma de monitoreo de desplazamientos superficiales	61
Tabla 19. Resumen de piezómetros de tubo abierto, antes de la cuarta etapa del recrecimiento de la presa de relaves	62
Tabla 20. Resumen de piezómetros instalados después de la cuarta etapa de recrecimiento de la presa de relaves	63
Tabla 21. Resumen de Instalación de los Piezómetros.....	63
Tabla 22. Resumen del inclinómetro instalado en la cresta de la presa de relaves	65
Tabla 23. Resumen de Instalación del Inclinómetro	65
Tabla 24. Resumen de los prismas GRP112 instalados en la presa de relaves	69
Tabla 25. Frecuencia de monitoreo de estabilidad de la presa de relaves.....	71
Tabla 26. Resumen de monitoreo con el punto PR-01	72
Tabla 27. Resumen de monitoreo con el punto PR-02.....	74
Tabla 28. Resumen de monitoreo con el Punto PR-03.....	76

	Pág.
Tabla 29. Resumen de monitoreo con el Punto PR-04.....	78
Tabla 30. Resumen de monitoreo con el punto PR-05	80
Tabla 31. Datos del monitoreo piezométrico hasta el mes de Setiembre -2018.....	86
Tabla 32. Instrumentación geotécnica implementada para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves	88
Tabla 33. Resumen consolidado del monitoreo con prismas GPR112	89
Tabla 34. Resumen de deformaciones de acuerdo al inclinómetro 3.....	93
Tabla 35. Plan de contingencia para la presa de relaves -1.....	95
Tabla 36. Plan de contingencia para la presa de relaves -2.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo para monitoreo de proyectos. (ASCE, 2000)	13
Figura 2. Métodos de Instrumentación Geotécnica (Herrera y Rivas, 2000)	17
Figura 3. Inclínómetro. (Geoinstruments, 2017)	20
Figura 4. Esquema de un inclinómetro. (Hanna, 1985).....	21
Figura 5. Ejemplo de datos del inclinómetro (Cornforth, 2005)	23
Figura 6. Designaciones de las ranuras y vectores del movimiento(Cornforth, 2005) 23	
Figura 7. Extensómetro vertical. (Corominas, 2000)	25
Figura 8. Piezómetros sencillos de cabeza abierta. (Cornforth, 2005)	27
Figura 9. Piezómetros de cabeza abierta. (Suarez, 2009).....	28
Figura 10. Ubicación del área de estudio	32
Figura 11. Esquema gráfico del área de Yauricocha. (Córdova, 2012).....	38
Figura 12. Mapa de zonas sísmicas del Perú. (Tavera, 2012)	40
Figura 13. Análisis Pseudoestático en Condiciones Actuales	46
Figura 14. Análisis Post Sismo – Condiciones Actuales.....	47
Figura 15. Análisis estático – Condiciones Actuales	48
Figura 16. Análisis Pseudoestático – Condiciones actuales	49
Figura 17. Análisis Post Sismo – Condiciones actuales.....	50
Figura 18. Análisis Estático – Operaciones.....	51
Figura 19. Análisis Pseudoestático - Operaciones	52
Figura 20. Análisis Post Sismo – Operaciones.....	53
Figura 21. Análisis Estático - Operaciones	54
Figura 22. Análisis Pseudoestático – Operaciones.....	55
Figura 23. Análisis Post Sismo – Operaciones.....	56
Figura 24. A la derecha se observa la tubería inclinométrica de ABS y tapa de fondo Grout Adapter (Geokon, 2018).....	68
Figura 25. Entrada inicial de datos al software Gtilt Plus	82
Figura 26. Interfaz del programa Gtil Plus para importar cada medición realizada en campo, en formato GKN.....	83
Figura 27. Deflexión en el eje A del inclinómetro instalado en la presa de relaves.....	84
Figura 28. Deflexión en el eje B del inclinómetro instalado en la presa de relaves.....	85

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Inspección de la presa de relaves – U.M. Yauricocha	57
Foto 2. Dique de contención de la presa de relaves – U.M. Yauricocha.....	58
Foto 3. Talud de la presa de relaves – U.M. Yauricocha	58
Foto 4. Máquina perforadora realizando el taladro BH-04-18	64
Foto 5. Piezómetro BH-02-18	64
Foto 6. Piezómetro BH-03-1	64
Foto 7. Sonda eléctrica adquirida por SMCSA	64
Foto 8. Inclímetro INC-03 instalado.....	65
Foto 9. Equipo inclinométrico – adquirido de Geokon	66
Foto 10. Instalación del equipo inclinométrico para dar inicio a las lecturas	67
Foto 11. Prismas de monitoreo instalados para registrar movimientos superficiales en la presa de relaves	70
Foto 12. Vista desde la caseta de monitoreo Leica, al lado derecho superior se observa el Equipo Robot Leica TM50 y en la parte inferior derecha el prisma de monitoreo GPR112.....	70

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1: Desplazamiento relativo PR-01	73
Gráfica 2: Velocidad de desplazamiento PR-01	73
Gráfica 3: Aceleración del punto PR-01	73
Gráfica 4: Vector de desplazamiento PR-01	73
Gráfica 5: Desplazamiento relativo PR-02	75
Gráfica 6: Velocidad de desplazamiento PR-02	75
Gráfica 7: Aceleración del punto PR-02	75
Gráfica 8: Vector de desplazamiento PR-02	75
Gráfica 9: Desplazamiento relativo PR-03	77
Gráfica 10: Velocidad de desplazamiento PR-03	77
Gráfica 11: Aceleración del punto PR-03	77
Gráfica 12: Vector de desplazamiento PR-03	77
Gráfica 13: Desplazamiento relativo PR-04	79
Gráfica 14: Velocidad de desplazamiento PR-04	79
Gráfica 15: Aceleración del punto PR-04	79
Gráfica 16: Vector de desplazamiento PR-04	79
Gráfica 17: Desplazamiento relativo PR-05	81
Gráfica 18: Velocidad de desplazamiento PR-05	81
Gráfica 19: Aceleración del punto PR-05	81
Gráfica 20: Vector de desplazamiento PR-05	81
Gráfica 21: Comportamiento del nivel del agua en el talud de la presa de relaves	87

ABREVIATURAS

ABS	: Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
DCR	: DCR Ingenieros S.R.L.
DIA BRAS	: Dia Bras Exploration Inc.
GP-GC	: Grava mal gradada - grava arcillosa
GPR	: Prisma de auscultación terrestre
IMTA	: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
KCB	: Klohn Crippen Berger
PR	: Prisma de monitoreo de la presa de relaves
PVC	: Policloruro de vinilo
S.A.	: Sociedad Anónima
SENARGEOMIN	: Servicio Nacional de Geología y Minería
SRK	: SRK Consulting U.S.
SMCSA	: Sociedad Minera Corosa S.A.
SVS	: SVS Ingenieros S.A.C.
TM	: Smart Horizontal Mode
U.M	: Unidad Minera Yauricocha

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el sistema de monitoreo idóneo a implementarse para el control y monitoreo geotécnico de la presa de relaves de la Unidad Minera Yauricocha, perteneciente a Sociedad Minera Corona S.A, considerando los factores geotécnicos, parámetros de diseño y cálculos de estabilidad, debido a que se encuentra en una etapa operativa donde es necesario el control y monitoreo de estabilidad a través de la evaluación de ciertos parámetros como desplazamientos superficiales, deformaciones en la estructura interna del dique de contención de la presa de relaves y análisis del comportamiento del nivel freático, dichos parámetros son fundamentales para manejar niveles de riesgo que puedan anticipar una posible ruptura de la presa de relaves, para que se pueda elaborar un plan de contingencia y tomar las medidas preventivas de manera oportuna. Se determinó los objetivos, parámetros, frecuencia de monitoreo, y se ha implementado 5 prismas de monitoreo que en conjunto con el Equipo Robot Leica TM50 registraron desplazamientos superficiales entre 0.15 cm y 1.99 cm , un inclinómetro de 45.5 m de longitud que registró deformación interna en la estructura del dique con respecto a la cara del talud con un valor de 0.2046 mm y 3 piezómetros tipo Casagrande que con la sonda eléctrica modelo 101 P7 registraron un descenso del nivel de agua de 22.78 m con respecto al nivel de agua registrado en la construcción de la cuarta etapa de incremento de la presa de relaves en el 2016. A partir de la toma de datos con la instrumentación geotécnica implementada y el correspondiente análisis, se concluye que la presa de relaves tiene un comportamiento estable; sin embargo, se comprueba que es necesario contar con un sistema de monitoreo basado en la instrumentación geotécnica, a través del cual se logre óptimo control y monitoreo de la estabilidad de la presa de relaves; el que a la vez debe ejecutarse de manera continua en función del tiempo operativo de la mina y cierre de la misma.

Palabras claves: Estabilidad, sistema de auscultación, monitoreo, instrumentación, desplazamientos, deformaciones, prisma, inclinómetro, piezómetro.

ABSTRACT

In the present investigation the suitable monitoring system to be implemented for the control and geotechnical monitoring of the tailings dam of the Yauricocha Mining Unit, belonging to Sociedad Minera Corona SA, was evaluated, such as geotechnical factors, design parameters and stability calculations, It is in an operative stage where it is necessary to control and monitor the stability through the evaluation of values such as surface displacements, deformations in the internal structure of the tailings dam and the analysis of the behavior of the level. Therefore, the parameters are fundamental to manage the levels of risk that can be anticipated to a possible rupture of the tailings dam, so that a contingency plan and preventive measures can be created in a timely manner. The objectives, parameters, frequency of monitoring were determined, and 5 monitoring systems were implemented that together with the Leica TM50 Robotics Team registered surface displacements between 0.15 cm and 1.99 cm, an inclinometer of 45.5 m in length that internal deformation in the structure of the dike with respect to the face of the slope with a value of 0.2046 mm and 3 piezometers type Casagrande that with the electric probe model 101 P7 registered in a descent of water level of 22.78 m with respect to water level registered in the construction of the fourth stage of the introduction of the tailings pressure in 2016. From the data collection with the geotechnical instrumentation, the implementation and the analysis, it is concluded that the tailings dam has a stable behavior; however, it is found that it is necessary to have a monitoring system based on geotechnical instrumentation, through which optimum control and monitoring of tailings dam stability is achieved; The work of the mine and the closure of it.

Keywords: Stability, auscultation system, monitoring, instrumentation, displacements, deformations, prism, inclinometer, piezometer..

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El monitoreo geotécnico de estabilidad de una presa de relaves durante el proceso operativo es imprescindible debido a que el mayor riesgo que presenta es el de rotura de la presa, la liberación de sus depósitos y fluidos tóxicos originando problemas de flujo, estabilidad y deslizamiento de taludes, problemas de erosión interna, vulnerabilidad al rebose, su comportamiento bajo acciones sísmicas, susceptibilidad a licuefacción. Además, los efectos de rotura en una presa de residuos se agravan a medida que transcurre el tiempo, su altura y el volumen de residuos almacenados aumenta.

Tal es el caso de la presa de relaves en la Unidad Minera Yauricocha que se encuentra en su cuarta etapa de incremento y no cuenta con un sistema de monitoreo geotécnico de estabilidad; por lo que mediante el presente trabajo de investigación se ha evaluado, analizado y buscado las mejores alternativas para implementar un sistema de monitoreo con el que se controle la estabilidad de la misma, a fin de garantizar la seguridad de los trabajadores, operaciones y cuidado medio ambiental.

A partir de ello, se plantea la siguiente incógnita: ¿Cuál es el sistema de monitoreo que se debe implementar para el control de estabilidad de la presa de relaves en la Unidad Minera Yauricocha?, orientados en tal sentido, la presente investigación ha comprobado que: El sistema de monitoreo que se debe implementar para el control de estabilidad de la presa de relaves en la Unidad Minera Yauricocha, se basa en el control de desplazamientos a nivel de superficie, movimientos internos en el dique y análisis del comportamiento del agua a través de la instrumentación geotécnica.

Asimismo, el presente estudio de investigación se realiza debido a que en la cuarta etapa operativa que se encuentra la presa de relaves, no existe un control geotécnico; por lo que resulta necesario la implementación de un sistema de monitoreo que registre, controle, alerte las zonas de riesgo de inestabilidad a fin de tomar las medidas preventivas necesarias ante el posible fallamiento y rotura de la presa de relaves.

Con esta investigación se busca analizar el sistema de monitoreo a implementar para el control de la estabilidad de la presa de relaves, siendo de tipo descriptivo, alcance correlacional y con enfoque cuantitativo. El objetivo general de la investigación es: Analizar el sistema de monitoreo para el control de estabilidad de la presa de relaves en la Unidad Minera Yauricocha. Para mayor detalle de la investigación, se tiene como objetivos principales: Determinar los factores geotécnicos que influyen en la estabilidad de la presa de relaves; Evaluar, dentro de la instrumentación geotécnica, los equipos más idóneos para la implementación del sistema de monitoreo para el control de estabilidad de la presa de relaves y Ejecutar la puesta en marcha de la implementación del sistema de control de monitoreo de estabilidad.

La investigación se organizó en cinco capítulos donde se incluye sus respectivos ítems, como se muestra en el índice de contenido.

En el capítulo I, se describe el planteamiento y formulación del problema, hipótesis, justificación, delimitación y los objetivos de la investigación.

El capítulo II, contiene el marco teórico de esta investigación; bases teóricas de diversos autores con sus respectivos libros u obras; definición de términos básicos, a fin de correlacionarlas entre ellas y sirviendo de base para el desarrollo de la presente investigación.

El capítulo III, constituye la descripción de los materiales y métodos que se utilizó en esta investigación: ubicación geográfica, accesibilidad, estudios de diseño y estabilidad de la presa de relaves, técnicas e instrumentos de recolección de datos, análisis y elección de la instrumentación geotécnica a implementarse a partir de la cual se midieron parámetros como movimientos superficiales, movimientos internos en la estructura del dique y comportamiento del nivel de agua, procesando los datos obtenidos y analizándolos oportunamente para la evaluación de la estabilidad de la presa de relaves.

En el capítulo IV, se presenta el análisis y discusión de resultados, a partir de los datos obtenidos del monitoreo y del respectivo análisis de los parámetros que determinan la estabilidad de la presa de relaves; a la vez se contrastó con la hipótesis, la cual fue demostrada.

El capítulo V, plasma las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Alegría (2009). Realizó el Procesamiento y presentación de datos de instrumentación de la presa del P.H. Pirrís implementando el monitoreo de obra a través de diversa instrumentación geotécnica a partir de la cual concluye que, según la información reportada por los inclinómetros, se observa que los macizos que componen las márgenes de la represa, tienden a inclinarse en la dirección de A+, o lo que es igual, hacia el cuerpo de represa. Aunque los movimientos reportados están en su mayoría, dentro del grado de error del instrumento. Estos instrumentos mostrarán mayores desplazamientos, una vez llenado el embalse, debido a la presión hidrostática sobre las márgenes. En lo que concierne a los niveles freáticos encontrados en las márgenes de la estructura, se observa que a pesar de que las precipitaciones en los primeros meses del año fueron muy bajas, éstos tienden a aumentar con el tiempo, debido a los trabajos que se realizarán para la construcción de la represa.

Alva y Escalaya (2011). En su estudio Instrumentación geotécnica de la Presa Pillones, concluyen que la instalación de un sistema de instrumentación geotécnica permite la oportuna detección de anomalías que se desarrollen o tengan tendencia a desarrollarse tanto durante la construcción como durante la vida útil de la obra, es el medio más eficiente para que el ingeniero encargado vigile el comportamiento de una obra y evalúe su seguridad.

Rodríguez y Oldecop (2011). En su estudio Humedad y estabilidad geotécnica de presa de relaves analizó el comportamiento y los factores más influyentes en la estabilidad de una presa de relaves; concluyendo que la humedad, expresada en contenido volumétrico

y grado de saturación, y cuando supera el 85 % implica una menor estabilidad geotécnica, mayor probabilidad de rotura y peores consecuencias de la rotura en cuanto a magnitud de desastre, por lo que es necesario medir, controlar la variación de grado de saturación y contar con sistemas de instrumentación.

Barrios (2012). En su proyecto Análisis Sísmico 2D de una presa de relaves espesados considerando la existencia de grietas por desecación analizó la estabilidad de presas mediante métodos de equilibrio límite y análisis dinámico, concluyendo que para el monitoreo y control es necesario generar un modelo numérico de deformaciones planas capaz de representar el comportamiento sísmico de una presa de relaves, la cual considere el muro de contención, el relave depositado y la roca basal, incluyendo grietas de desecación al interior del material, para una modelación más realista del problema.

Media, et al. (2017). En su estudio de Instrumentación Geotécnica de presas, concluyen que la tecnología actualmente juega un papel importante para automatizar la instrumentación geotécnica y a la vez reducir costos de monitoreo obteniendo los datos en tiempo real e incluso dar alertas en un tiempo más corto que el programa manual de monitoreo, sirviendo esto para tomar una decisión óptima frente a la problemática que pueda presentarse y evitar fenómenos catastróficos.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Análisis de estabilidad de una presa de relaves

La estabilidad del depósito de relaves está asociada a la eventual ocurrencia de deformaciones limitada durante un evento sísmico, manteniendo su integridad y funcionamiento después de la ocurrencia de un movimiento sísmico. En consecuencia, para garantizar un adecuado comportamiento de estas estructuras es necesario evaluar la estabilidad de sus taludes y verificar si los factores de seguridad determinados se encuentran por encima de los valores mínimos recomendados. (Linares, 2007)

2.2.1.1. Fallas de taludes

Debido a diferentes tipos de suelo, compleja estratigrafía, condiciones de carga, existen múltiples formas en que puede fallar un talud.

A grandes rasgos, las fallas ocurren en taludes de suelo en una de las cuatro formas: traslado, cuña o plano, circular y no circular; una falla también puede ser compuesta de estas cuatro formas básicas. En la tabla 1, resume las condiciones geológicas que afectan la forma como se desarrollan diferentes tipos de superficies de falla.

Tabla 1. Condiciones geológicas para diferentes tipos de falla

Condiciones geológicas	Superficie de falla potencial
<ul style="list-style-type: none"> - Suelos granulares - Suelos residuales o coluviales sobre rocas superficiales - Arcillas duras fisuradas y lutitas marinas con una zona superior fuertemente intemperizada 	Traslado de poca profundidad con respecto a su longitud
<ul style="list-style-type: none"> - Bloque deslizante - Roca estratificada e inclinada o suelo - Material con capas débiles o espejos de falla. - Suelo cohesivo duro, firme e intacto sobre taludes profundos 	Superficie plana
<ul style="list-style-type: none"> - Bloques deslizantes en masas rocosas. - Rocas sedimentarias intemperizadas y estratificadas. - Lutitas arcillosas, arcillas duras y fisuradas. - Suelos estratificados. - Escombros laterales sobre depósitos coluviales. 	Superficies planas múltiples
<ul style="list-style-type: none"> - Estratos profundos de suelo residual o coluvial - Arcillas marinas blandas - Suelos cohesivos blandos o firmes 	Forma circular o cilíndrica

Fuente: Abramson et al. 1999

2.2.1.2. Factores asociados a la generación de mecanismos de falla en depósitos de relaves

Los principales factores que se pueden generar en las presas de relaves que tienen incidencia directa sobre los mecanismos de falla y de acuerdo a los diversos antecedentes son:

Tabla 2. Factores asociados a los mecanismos de fallas en presas de relaves

Grupo	Denominación	Factores
1	Tipo de Depósito	<ul style="list-style-type: none"> - Tranque de arena de relave - Embalses de relave - Depósito de relave filtrado - Depósito de relave en pasta - Depósitos de relaves espesados
2	Configuración Geométrica	<ul style="list-style-type: none"> - Altura de revancha - Ancho de coronamiento - Pendiente global del talud
3	Calidad del relave y niveles de compactación alcanzados en el depósito	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría y plasticidad de la fracción fina - Nivel de compactación
4	Suelo de fundación	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización del suelo de fundación para el proyecto de diseño
5	Antecedentes analizados de instrumentación y monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> - Posición de niveles freáticos - Funcionamiento sistema de drenaje - Aceleraciones sísmicas - Movimientos de muros y/o depósitos - Otros
6	Comportamiento mecánico durante la fase operacional (historia de la instalación)	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidad física evaluada durante la fase operacional - Incidentes con impacto a las operaciones - Cierres temporales por incidentes
7	Entono regional para la condición de cierre	<ul style="list-style-type: none"> - Sismicidad - Crecidas - Régimen de vientos
8	Grado de implementación de medidas para asegurar la estabilidad física en la etapa de cierre	<ul style="list-style-type: none"> - Verificación de obras y acciones implementadas, según lo indicado en el plan de cierre aprobado

Fuente: SERNAGEOMIN, 2018

2.2.2. Normas legales que sustentan la investigación

- Sobre los factores mínimos de estabilidad:

Los factores de seguridad mínimos considerados son aquellos recomendados por la Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósito de Residuos Sólidos Provenientes de Actividad Mineras del Ministerio de Energía y Minas (MEM), conforme se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios de Diseño Geotécnico

Condiciones de Carga	Factor de Seguridad Mínimo ^[1]
Estático – Empleando parámetros de resistencia pico al corte	1.5
Estático – Empleando parámetros de resistencia residual al corte	1.3
Pseudo-Estático	1.0 o deformación ≤ 1 m ^[2]
Post-Sismo	1.2

Notas: ^[1] Si se anticipa que se produciría daños severos como consecuencia de una falla en el depósito.

^[2] Se añade el criterio de deformación para ser consistente con las prácticas de ingeniería modernas.

Fuente: MEM, 1997

- Referente al monitoreo de estabilidad:
 - a) Decreto Supremo N° 024-2016-EM (y su modificatoria Decreto Supremo N° 023-2017-EM), Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en el Minería:

En el artículo 400, estipula acerca de los residuos generados y/o producidos en la unidad minera como ganga, desmonte, relaves, lixiviados, aguas ácidas, escorias, entre otros serán, según el caso, almacenados, encapsulados o dispuestos en lugares diseñados para tal efecto hasta su disposición final, asegurando la estabilidad física y química de dichos lugares, a fin de garantizar la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores.

El titular de actividad minera presentará a la autoridad competente, cada dos (2) años, un estudio de estabilidad física de los depósitos de relaves, depósitos de desmontes, pilas de lixiviación y depósitos de escorias operativos, realizados por una empresa especializada en la materia, que garantice las operaciones de manera segura de dichos componentes.

Dicho estudio de estabilidad física fue realizado por la empresa especializada Tierra Group International S.A.C., tal como se muestra en el Anexo 1.

- b) Decreto Legislativo N° 613, Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, modificado por D.S. N° 014-92-EM, Texto único Ordenado de la Ley General de Minería:

En el artículo 14, regula lo referente a la descarga de sustancias contaminantes al ambiente, estableciendo la obligación de adoptar precauciones para la depuración, medidas de control y monitoreo.

En el artículo 63, se establecen las condiciones ambientales que debe reunir un proyecto de depósito de relaves, las cuales son:

- Que las condiciones técnicas garanticen la estabilidad del sistema.
- Que se especifique técnicamente la operación del sistema.
- Que se precisen las medidas técnicas de abandono del depósito.

- c) Decreto Supremo N° 016-93-EM, Reglamento para la protección Ambiental en la Actividad Minero-Metalúrgica, modificado por D.S. N° 059-93-EM:

En el artículo 39, establece la obligación de garantizar la estabilidad física y química del material depositado en la etapa de abandono.

2.2.3. Riesgos geotécnicos en presas de relaves

En los depósitos de relaves ante un escenario de falla o colapso, parte del relave depositado es liberado a través de una brecha. El resultado es similar a un deslizamiento de terreno junto con el flujo de las lamas embalsadas, liberando una gran parte de los materiales depositados, ya que los relaves saturados se encuentran como un fluido bajo la forma de una “pasta” viscosa, alcanzando grandes velocidades de desplazamiento. De los depósitos de relave son los tranques de arenas de relave que presentan un mayor riesgo desde el punto de vista de la estabilidad física, ante un inapropiado o incorrecto diseño,

inadecuada operación, insuficiente control y mal manejo de aguas. (SERNAGEOMIN, 2018)

Los principales riesgos asociados en tranques de relaves se refieren a: licuefacción del prisma resistente, inestabilidad de taludes (bajo condiciones estáticas y sísmicas), deformaciones excesivas, rebalse, overtoping y vaciamiento, piping o tubificación, inestabilidad del suelo de fundación, planos de falla por precipitaciones de erosión eólica. (Espinace, 2015).

A nivel mundial, del total de incidentes reportados en depósitos mineros (desde 1901 a 2017), el 45% de un total de 129 casos se generaron en tranques o embalses de relave. Según la clasificación propuesta por USCOLD (1994) ICOLD (2001), los incidentes (accidentes y fallas) se produjeron por las siguientes causas (SERNAGEOMIN, 2018):

- Inestabilidad de taludes en condiciones estáticas, que incluye deslizamientos en los taludes del muro resistente del depósito.
- Rebose (overtopping) en el depósito, debido a eventos hidrológicos o deficiente control operacional de la laguna de aguas claras.
- Inestabilidad debido a los efectos producidos por movimientos sísmicos.
- Percolación, deficiencias de estabilidad relacionadas con filtraciones hacia el depósito y/o suelo de fundación de éste, incluyendo piping (tubificación).
- Estructural, deficiencias estructurales de un vertedero de canal abierto, estructuras de decantación o tuberías de descarga de relave.
- Erosión, daño erosivo superficial no relacionado con deficiencias estructurales.
- Subsistencia de mina, liberación de relave hacia trabajos subterráneos, o daños en el depósito causados por operaciones de minas subterráneas.

Considerando estos antecedentes y los registros de incidentes reportados a nivel mundial la posibilidad de ocurrencia de estos mecanismos de falla y otros, debería ser evaluada y analizada conforme a lo indicado en la tabla 4. (Rico et al. 2008)

Tabla 4. Mecanismos de falla a analizar en depósitos de relaves

Tipo de depósito	Licuaación Sísmica	Inestabilidad de taludes	Deformaciones sísmicas inducidas	Rebose (Overtopping)	Erosión interna (pipping)	Licuaación estática	Inestabilidad del suelo de fundación
Tranques de relave	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Embalse de relave	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí
Depósitos de relave filtrados	(*)	Sí	Sí	No	No	(*)	Sí
Depósitos de relave filtrados	(*)	Sí	Sí	No	No	(*)	Sí
Depósitos de relave filtrados	(*)	Sí	Sí	No	No	(*)	Sí

Nota: (*) Indican que no hay certezas claras respecto de la posibilidad de ocurrencia de fallas por licuaación sísmica o licuaación estática en este tipo de depósitos.

Fuente: Rico et al.2008

2.2.3.1. Factores claves para reducir el riesgo de inestabilidad:

- Pendiente de taludes adecuada, en dirección “aguas abajo”
- Granulometría y nivel de compactación adecuados, porcentaje de finos < 0.074mm.
- Bajas presiones intersticiales al interior del prisma resistente.
- Altura de revancha y ancho de coronamiento suficientes.
- Eficiente sistema de drenaje.
- Compatibilizar acciones destinadas a seguridad minera con aquellas para el control ambiental.
- Contar con un sistema de auscultación: monitoreo y control de operación.

2.2.4. Sistema de Monitoreo Geotécnico

En la actualidad las grandes presas tienen la necesidad de ser sometidas a una vigilancia y control permanente y minucioso mediante un sistema de auscultación y/o implementación de instrumentación geotécnica (Oliva, 2015).

Este sistema de auscultación es constituido por un conjunto de instrumentos adecuados, observado sistemáticamente con la frecuencia necesaria, y evaluando los resultados de inmediato para poder tomar decisiones oportunas y preventivas ante un evento siniestro. Permite establecer medidas de prevención para evitar deslizamientos, colapsos de estructuras frente a potenciales fallas por acción dinámica. Los objetivos de un programa de monitoreo del talud de la presa de relaves son: proporcionar un aviso anticipado de la inestabilidad, proporcionar información geotécnica para analizar los mecanismos de desplazamiento de la pendiente, para designar medidas correctivas y mantener los procedimientos operacionales de seguridad con el fin de proteger al personal y los equipos. (Linares, 2007).

La necesidad de incluir un monitoreo instrumental, la cantidad y ubicación de los dispositivos, depende de las incertidumbres que se tienen en relación a las condiciones de sitio y el comportamiento de las estructuras en operación normal del proyecto o ante eventos de tipo externo.

Determinando que es vital y necesario el uso de instrumentación, el proceso de monitoreo debe seguir las fases que son ilustradas en la Figura 1.

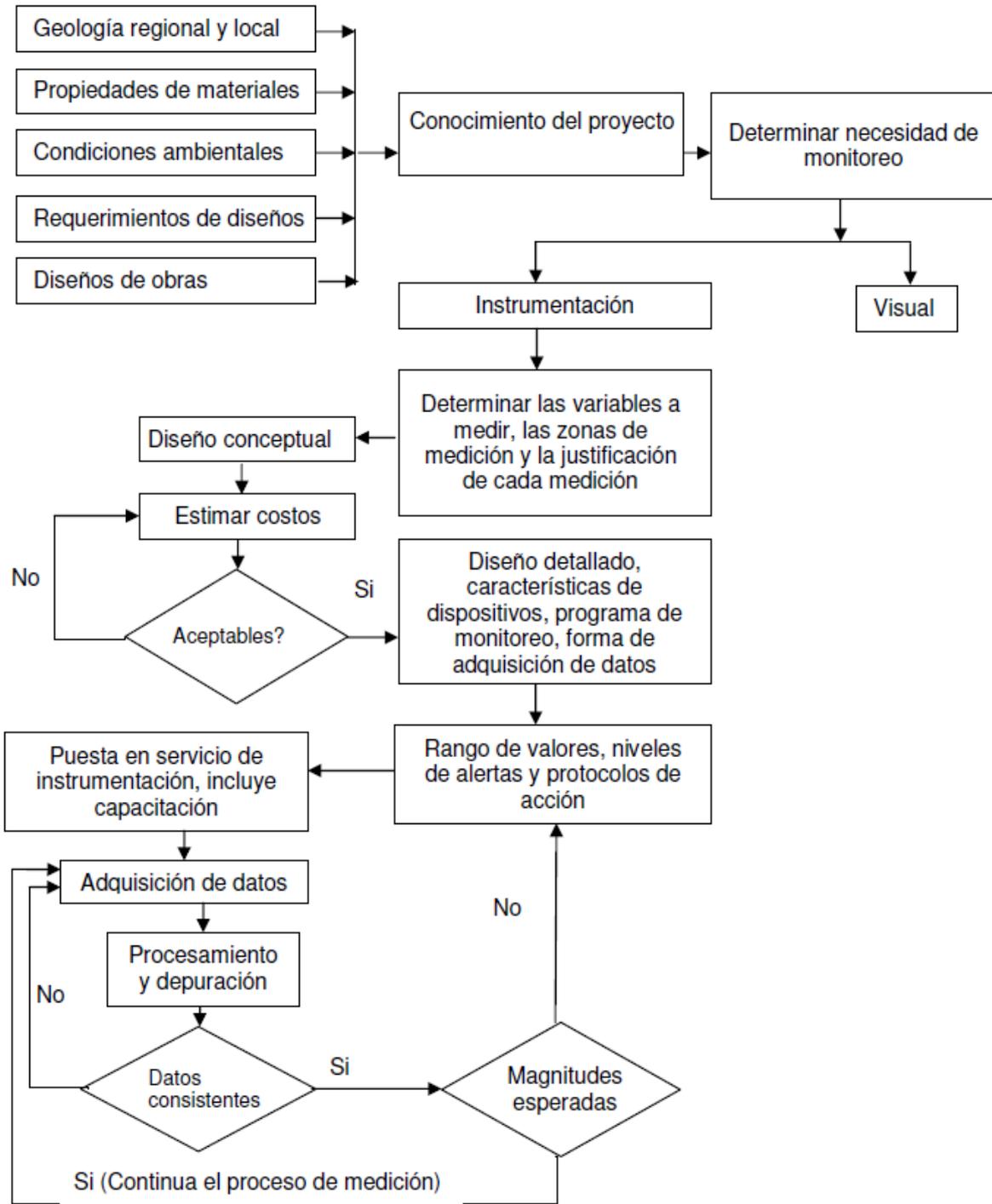


Figura 1. Diagrama de flujo para monitoreo de proyectos. (ASCE, 2000)

2.2.4.1. Monitoreo de la presa de relaves

Para una presa de relaves se recomienda los siguientes tipos de medición:

- a) Borde libre con respecto a la superficie de los relaves o del espejo de agua, es decir, la distancia vertical que la cresta de la presa está sobre el nivel del agua de la poza.
- b) Movimiento horizontal y vertical de la cresta de la presa de arranque y del talud aguas abajo.
- c) Medición y monitoreo de la superficie freática. El nivel de superficie freática es de primera importancia para la estabilidad de las presas de relaves. El dispositivo básico para medir el nivel freático es el piezómetro. Es importante colocar los piezómetros cerca de los drenajes para verificar la eficacia de estos últimos.
- d) Los movimientos verticales en los depósitos de relaves son grandes y se deben a la compactación por su propio peso y a la consolidación. Los movimientos externos son medidos por medio de un sistema de control topográfico de puntos de referencia geodésicos, lo suficientemente afuera de la presa para evitar la influencia del peso de la presa. Un incremento súbito en los movimientos verticales podría ser una señal de erosión interna de los relaves y de un potencial de colapso. (Obando, 2009).

2.2.4.2. Instrumentación Geotécnica:

En una campaña de instrumentación geotécnica o sistema de auscultación, deben definirse perfectamente las magnitudes que se van a medir, con qué aparatos se van a realizar los registros y con qué periodicidad. Todas ellas se derivan directamente de una correcta definición del problema geotécnico planteado. Así, por ejemplo: no es lo mismo realizar la auscultación de los movimientos producidos por una tuneladora encargada de excavar un túnel para un metro de una ciudad que realizar mediciones de desplazamientos en una ladera natural sometida a un proceso de creep. En el primer caso deberemos registrar movimientos horizontales y sobre todo verticales, así como controlar la aparición de grietas y su magnitud en edificios próximos. Al tratarse de movimientos relativamente rápidos la periodicidad de medida será alta (diariamente, semanalmente). En el segundo caso, al tratarse de un fenómeno de movimiento lento, la periodicidad será larga (mensualmente, trimestralmente) y la magnitud a medir serán movimientos en la horizontal.

Como conclusión, en toda campaña de instrumentación geotécnica o de auscultación debe quedar perfectamente definido (Herrera y Rivas, 2000):

- Problema geotécnico causante de la necesidad de la campaña de auscultación.
- Parámetro a medir y rango esperado del mismo.
- Instrumentación o aparatos de medida necesarios.
- Ubicación óptima de los aparatos.
- Periodicidad de medida.
- Personal técnico y auxiliar necesario.

La instrumentación geotécnica tiene como uno de sus objetivos básicos medir la respuesta del terreno ante determinadas variaciones, que puedan ocurrir en las condiciones de su entorno, las cuales pueden ser debidas a la ejecución de obras de ingeniería y fenómenos naturales. (Media et. al., 2017).

2.2.4.3. Planteamiento de un programa de instrumentación:

El planeamiento de un programa de instrumentación deber ser lógico y detallado porque la medición de un problema en particular podría requerir de diferentes tipos de instrumentos recolectando información a lo largo de un rango de escalas diferentes. Además, debido a limitaciones físicas y económicas todos los parámetros no podrán ser medidos con igual facilidad y éxito. (Osinergmin, 2017).

Todo plan de instrumentación deberá detallar y tomar en cuenta, como mínimo, lo siguiente:

- Secciones de control: La instalación de los instrumentos y el número de ellos se ubican en áreas críticas cuyos parámetros deseamos medir.
- Valores límite: Las mediciones obtenidas de los monitoreos se podrán utilizar como un mecanismo de alerta del programa de gestión de riesgos y se establecerán valores máximos de referencia que no deberán ser sobrepasados.
- Frecuencia de lecturas: El control e interpretación en forma regular del registro de las lecturas del monitoreo permite detectar tendencias anómalas del comportamiento del macizo y tomar las medidas correctivas necesarias.
- Medidas correctivas: En caso de que se estén monitoreando movimientos, y se superen los umbrales establecidos, será necesario instalar elementos de refuerzo en el macizo

como parte de las medidas correctivas. En el protocolo de actuación se preverá el refuerzo de la sección, o secciones, del macizo que lo necesiten, mediante estudio individual de cada caso, dependiendo del tipo de explotación e inestabilidades.

- Plan de contingencia: Se establecerá un protocolo de respuesta ante la posibilidad de que los umbrales de deformación sean superados, que incluya la comunicación entre las personas que tienen implicancias en el control del macizo.

En la siguiente tabla se muestra un esquema del planeamiento de un programa de instrumentación:

Tabla 5. Enfoque sistemático del planeamiento de un programa de instrumentación

Paso	Descripción
Planificación	
1	Definir las condiciones del proyecto.
2	Predecir los mecanismos que controlan el comportamiento del macizo rocoso.
3	Definir las preguntas geotécnicas que necesitan ser respondidas
4	Definir el propósito de la instrumentación
5	Seleccionar los parámetros a ser monitoreados
6	Predecir las magnitudes esperadas
7	Establecer las medidas correctivas
8	Asignar tareas para las fases de diseño, construcción y operación
9	Seleccionar los instrumentos
Ejecución	
10	Determinar la ubicación de los instrumentos
11	Establecer procedimientos para asegurar lecturas correctas.
12	Listar el propósito específico de cada instrumento instalado.
13	Planificar la instalación.
14	Planificar la calibración regular y el mantenimiento de los equipos.
15	Planificar la frecuencia de la recolección de datos, procesamiento, presentación, interpretación y reporte.
16	Establecer valores límites y un plan de contingencia

Fuente: Osingermin, 2017

2.2.5. Implementación de instrumentación geotécnica para monitoreo

2.2.5.1. Sistemas de Medida

Son muchos los sistemas de medida utilizados en la instrumentación geotécnica. Puede establecerse una jerarquización dependiendo de la magnitud de la medida, Así tenemos (Herrera y Rivas, 2000):

- Métodos geodésicos (triangulación, trilateración y poligonalización), Nivelación y Colimación, con los que se pueden realizar controles de movimientos superficiales (horizontales y verticales).
- Extensometría e Inclínometría para el control de movimientos verticales y horizontales respectivamente en el interior del terreno.
- Medidores tridimensionales de juntas, cintas de convergencia, potenciómetros y flexímetros para el control de movimientos entre puntos superficiales próximos.
- Pozos de observación, piezómetros abiertos y cerrados, para el control de presiones intersticiales.
- Células de carga y transductores de presión, para el control de fuerzas de anclaje y presiones.

En la figura 2 se muestran cada uno de los métodos o sistemas de medida, relacionados con las magnitudes sometidas a control:

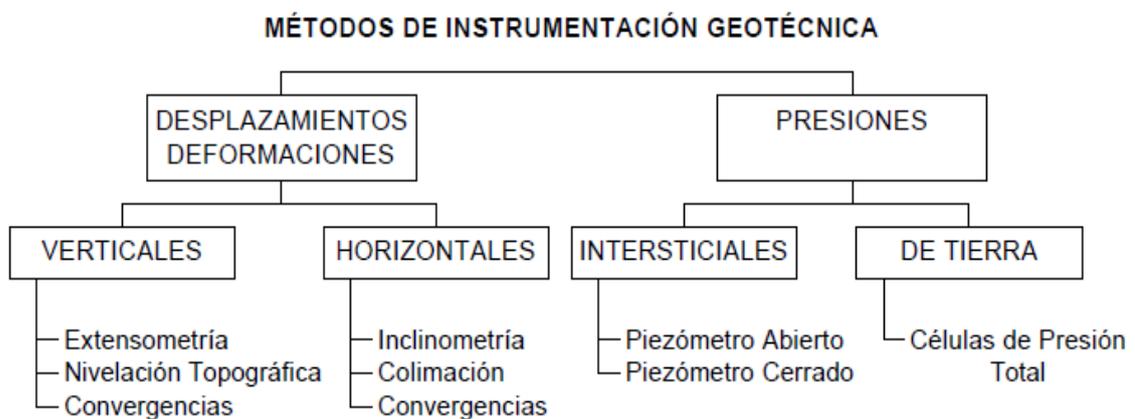


Figura 2. Métodos de Instrumentación Geotécnica (Herrera y Rivas, 2000)

2.2.5.2. Selección de equipos

Para seleccionar el instrumento de medición adecuado se debe tener en cuenta el parámetro geotécnico que se desea monitorear e investigar de acuerdo a la variedad de equipos disponibles. (Osinergmin, 2017)

Tabla 6. Equipos utilizados en las mediciones geotécnicas

Variable	Equipo
Desplazamiento superficial	Estación total
	Equipo láser 3D
	Hitos de nivelación / prismas
	GPS
	Clinómetros
	Fisurómetros (crackmeters)
	Distanciómetro
	Extensómetros • Cinta de convergencia • Extensómetro de vara telescópica
Desplazamiento en el interior del macizo	Extensómetros • Extensómetro de varilla • Pernos extensométricos • Cable bolt extensométrico (Smart cable)
	Sistema de monitoreo de convergencias
	Cables TDR
	Inclinómetros (fijos y portátiles)
	Columna inclino extensométricas
Esfuerzos	Celdas de presión
	Celdas de presión en taladros
	Sistema de micro sismicidad
Presión de poros y nivel de agua	Piezómetro de tubo abierto o de Casagrande
	Piezómetro de cuerda vibrante

Fuente: Osinergmin, 2017

2.2.5.3. Control de movimientos superficiales

Los movimientos superficiales que se registran durante el proceso de inestabilización de un talud son importantes, y de su control pueden deducirse velocidades de deformación, la zona comprendida por la inestabilidad o sometida a movimiento.

Existen varios métodos o técnicas topográficas para registrar estos movimientos:

- Método geodésico: que comprende varias técnicas, la Triangulación (medida de ángulos entre 2 ó más puntos fijos), la Trilateración (medida de distancias entre 3 o más puntos fijos) y la Poligonalización (medida de ángulos y distancias de al menos 3 bases o puntos fijos).
- Nivelación, que consiste en la medida de movimientos verticales respecto a bases de referencia fija.
- Colimación, que consiste en la medida de movimientos horizontales de puntos respecto a un plano de colimación vertical fijo.

La utilización de una técnica u otra dependerá del tipo de movimiento a detectar o controlar, así como del grado de exactitud en la medida. Con la nivelación sólo pueden medirse movimientos verticales y con la colimación sólo horizontales. Para realizar el control de movimientos superficiales con cierto grado de precisión, es necesario contar con una buena red de bases fijas fuera del área sometida a movimiento, con qué poder calcular las diferencias de movimiento. (Herrera y Rivas, 2000).

2.2.5.4. Control de movimientos en el interior del terreno

Los movimientos en el interior del terreno, son quizás, aquellos que más pueden interesar a la hora de instrumentalizar un talud o una ladera natural inestable. Los movimientos que frecuentemente se registran en taludes inestables son:

- De componente vertical.
- De componente horizontal.

Los primeros movimientos (los verticales) se suelen medir mediante la técnica de la extensometría, con la ayuda de equipos denominados extensómetros. Los segundos (los horizontales) se registran mediante la técnica denominada inclinometría, utilizando unos aparatos de medida denominados inclinómetros. (Herrera y Rivas, 2000):

2.2.5.4.1. Inclínometría:

La inclinometría constituye una técnica de instrumentación geotécnica capaz de registrar movimientos horizontales a lo largo de la vertical de un sondeo. Esto permite detectar la zona con movimientos más acusados (planos de deslizamiento), conocer la evolución de los mismos, la velocidad de desplazamiento y los volúmenes movilizados. Los inclinómetros (aparatos utilizados para registrar los movimientos horizontales en el interior de un sondeo inclinométrico) detectan movimientos relativos respecto al punto inferior de medida. Como consecuencia, se hace necesario que el sondeo utilizado para instalar la tubería inclinométrica profundice hasta una zona en la que no exista movimiento, es decir por debajo de la zona de movimientos esperada. (Herrera y Rivas, 2000)



Figura 3. Inclínómetro. (Geoinstruments, 2017)

Un sistema de inclinómetro está compuesto por cuatro componentes principales (Suarez, 2009):

- a) Un tubo guía de plástico, acero o aluminio, instalado dentro de una perforación: este tubo tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora; generalmente, se utilizan diámetros de tubo entre 1.5 y 3.5 pulgadas.
- b) Un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas que se mueven sobre la guía del tubo: el inclinómetro incorpora dos servo-acelerómetros con fuerzas balanceadas para medir la inclinación del instrumento.
- c) Un cable de control que baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie: generalmente, el cable está graduado para el control superficial. El cable tiene un núcleo de acero para minimizar las deformaciones; los cables eléctricos se

encuentran espaciados alrededor y unidos al núcleo. La cubierta exterior es de neopreno y permanece siempre flexible. El cable tiene unas marcas para medir profundidades, estas medidas están relacionadas hasta la mitad de la altura del torpedo. Superficialmente, el cable se maneja con una polea, que tiene unas tenazas para sostenerla. Se recomienda siempre, trabajar con la polea para evitar el riesgo de que el cable pueda torcerse al sostenerlo.

d) Un equipo de lectura en la superficie (que sirve de proveedor de energía) recibe las señales eléctricas, presenta las lecturas y en ocasiones, puede guardar y procesar los datos. El equipo de lectura es compacto y está sellado contra la humedad. La memoria puede guardar hasta 40 mediciones completas. La unidad también puede realizar chequeos y revalidar la información. En oficina, los datos del inclinómetro se descargan en un computador.

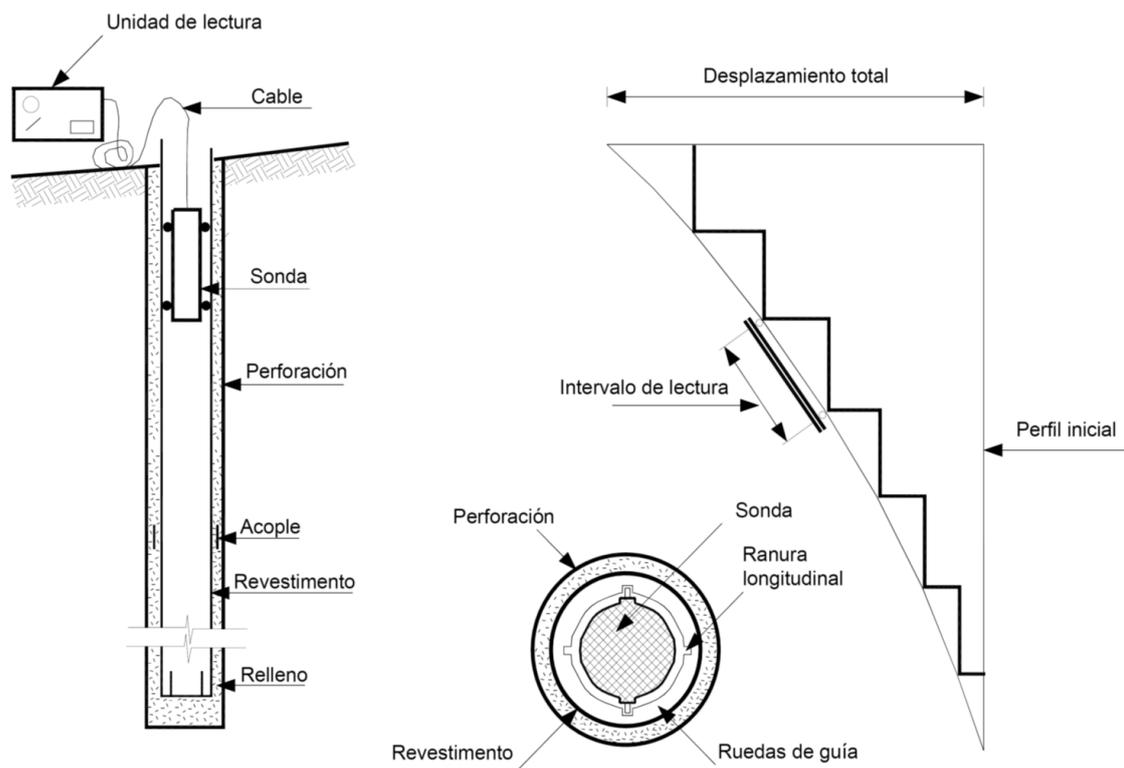


Figura 4. Esquema de un inclinómetro. (Hanna, 1985)

- Instalación del tubo inclinométrico:

El fondo del inclinómetro se supone fijo y es la base para la medición de la deformación. Por esta razón, es necesario que la base del tubo esté perfectamente anclada. La porción

baja del ducto debe instalarse mínimo tres metros por debajo de los sitios en los cuales se espera que el suelo sufra el desplazamiento lateral. Mikkelsen (1996) recomienda profundidades de 6 metros en la zona estable para evitar la ocurrencia de errores. Se recomienda el anclaje en la roca si las condiciones geológicas lo permiten.

La idea es que la curva de deformación del inclinómetro muestre la diferencia entre la zona profunda que no se mueve y la que presenta movimiento, como se ve en la figura 10. Los inclinómetros se instalan en longitudes de 3 a 6 metros, unidos por juntas; estas juntas generalmente son cementadas para asegurar una conexión firme; sin embargo, cada unión representa una posible fuente de error.

El espacio anular entre el tubo y la perforación debe ser perfectamente lleno con un sistema de inyección para asegurar que los movimientos del ducto, reflejen realmente los desplazamientos del suelo. Como las juntas del inclinómetro están selladas, es posible que el tubo tenga una tendencia a flotar. Si esto ocurre, es importante llenar el tubo con agua limpia para evitar que flote. El sistema del inclinómetro funciona en presencia del agua. Para profundidades mayores de 10 metros se requiere un anclaje exterior en las juntas (entre las secciones del tubo) para evitar que las uniones se suelten. Después de que el tubo llega al fondo de la perforación, se deben alinear las ranuras de tal forma, que un par de ranuras se encuentren alineadas en la dirección anticipada del movimiento.

La ranura que se encuentra, en dirección ladera abajo, se marca como A_0 y la ranura opuesta, se marca como A_{180} . Las otras dos ranuras se marcan como B_0 y B_{180} .

En el proceso de colocación de la lechada de cemento en el exterior del tubo, se debe llenar de agua el interior para evitar que pueda introducirse parte de la lechada dentro del tubo.

El propósito principal de la lechada exterior es rellenar todos los espacios entre el tubo y el suelo para asegurarse que el inclinómetro se encuentre soportado en la totalidad de su longitud. Se recomienda la utilización de la lechada de cemento sin arena o grava, a fin de garantizar que todos los espacios sean ocupados y no se presenten vacíos entre el inclinómetro y el suelo. Para mejorar la plasticidad de la mezcla se puede agregar bentonita. La lechada debe ser más densa en los suelos duros y menos densa en los suelos blandos, para evitar que la rigidez de la lechada afecte las mediciones.

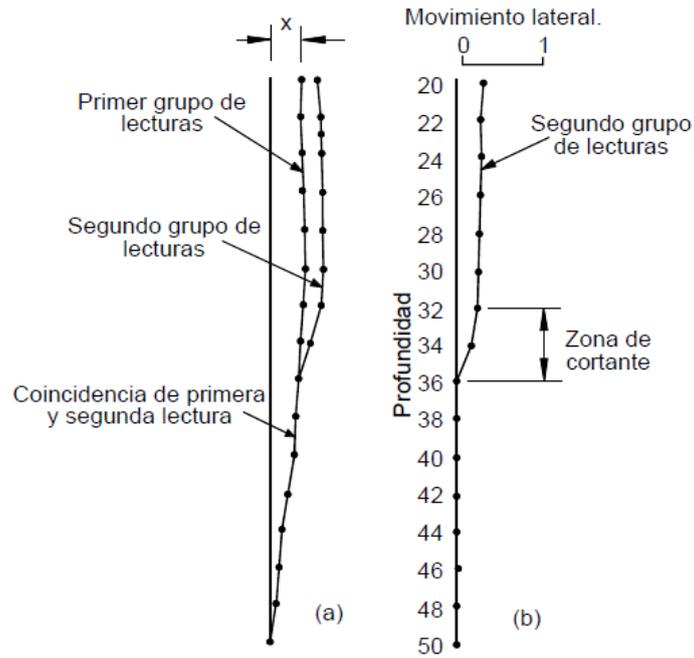


Figura 5. Ejemplo de datos del inclinómetro (Cornforth, 2005)

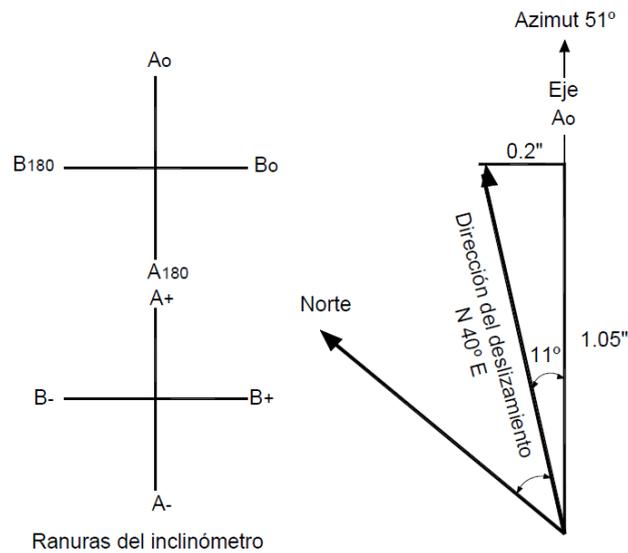


Figura 6. Designaciones de las ranuras y vectores del movimiento. (Cornforth, 2005)

- Lectura del inclinómetro:

Después de que el tubo del inclinómetro ha sido instalado y la lechada se ha cementado, se introduce el torpedo para verificar que no haya obstrucciones dentro del tubo.

Para este propósito, se recomienda utilizar un torpedo falso, para evitar el riesgo de daño del torpedo, aunque las obstrucciones no son comunes. Las mediciones iniciales son muy importantes porque todas las mediciones subsecuentes se basan en las primeras. Por esta razón, se recomienda tomar inicialmente, dos o tres grupos de medición para comprobar que la medición inicial es correcta y así evitar errores posteriores.

El inclinómetro se coloca dentro del tubo con la rueda superior en la ranura A_0 y se baja hasta el fondo del inclinómetro. Inicialmente, debe dejarse el equipo en el fondo, durante 10 minutos, para que se normalice con la temperatura del agua dentro del tubo; de esta forma evitar errores por temperatura. Se toma la lectura en el fondo y luego se registra cada 50 centímetros hacia arriba. En cada profundidad, se anotan las lecturas en las direcciones A_0 y B_0 .

Después de que el torpedo salga a la superficie, se gira 180° , se profundiza hasta el fondo de la perforación y se obtienen las mediciones en las direcciones A_{180} y B_{180} . La suma de las dos mediciones debe ser cercana a 0.0, aunque se presentan generalmente algunas diferencias.

Las mediciones, en un mismo sitio, deben realizarse siempre con el mismo torpedo, el mismo cable y el mismo operador, a fin de minimizar los errores de manejo.

- Aplicación de los inclinómetros en un deslizamiento:

Los inclinómetros son probablemente, la herramienta más útil y disponible para un analista de deslizamientos, siempre que sea económicamente posible, deben colocarse inclinómetros. Los inclinómetros permiten determinar la siguiente información:

- La profundidad de los movimientos del deslizamiento.
- La localización y forma de la superficie de falla.
- La velocidad del movimiento para obtener factores estáticos de seguridad, para medir la variación en rata con las lluvias y otros elementos, o para confirmar la efectividad de una medida de mitigación o estabilización.
- La dirección del movimiento, esta dirección puede ser obvia en la mayoría de los deslizamientos, pero no es fácil determinar cuando ocurren movimientos diferenciales, debido a los cambios de la superficie de falla u obstrucciones en el sitio.

2.2.5.4.2. Extensometría:

Los extensómetros permiten medir los movimientos horizontales relativos y los cambios en la amplitud de las grietas. El extensómetro es utilizado para medir el movimiento relativo comparando la distancia entre dos puntos de una forma manual o automática. Los extensómetros, generalmente, se instalan a través del escarpe principal o a través de las grietas, para determinar su movimiento.

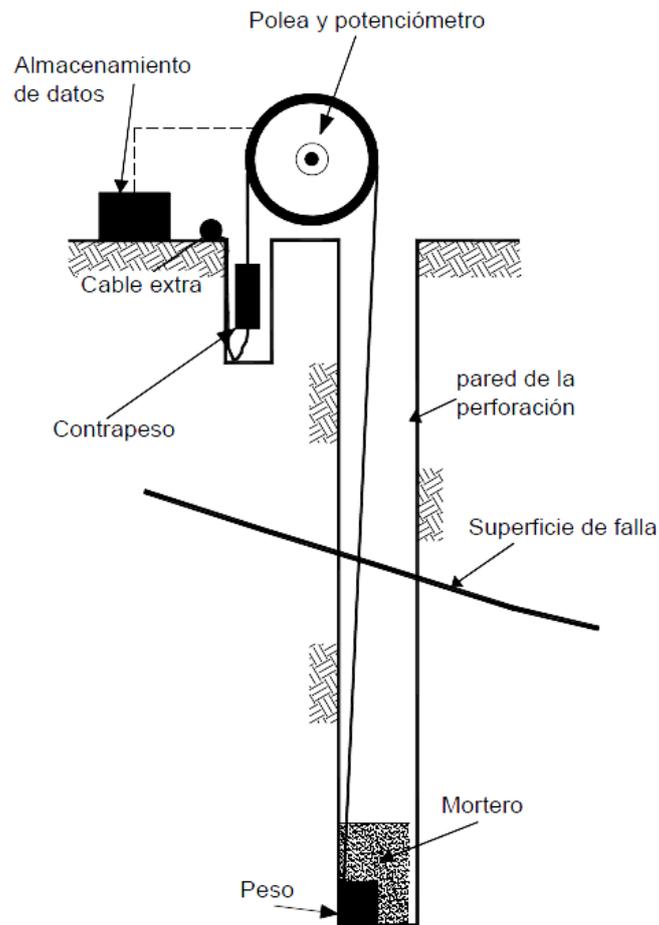


Figura 7. Extensómetro vertical. (Corominas, 2000)

Tabla 7. Métodos de controles de movimientos en el interior del terreno

Equipo	Sistema de Funcionamiento	Tipos	Observaciones
Inclinómetros	<p>Medida de inclinaciones en diversos puntos del interior de un sondeo mediante una sonda que da una señal eléctrica proporcional a la inclinación: diferencias de medidas realizadas en diversos instantes permiten conocer los movimientos perpendiculares a la dirección del sondeo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - De resistencia eléctrica. - De cuerda vibrante. - De servoacelerómetros 	<ul style="list-style-type: none"> - El tipo más fiable, preciso y de menos tiempo de respuesta es el de servoacelerómetros, que pueden lograr precisiones en la medida de dos giros de $2 \cdot 10^{-4}$ rad. - Hay que asegurarse en la instalación que el punto inferior de medida se sitúe por debajo de la zona de movimientos.
Extensómetros	<p>Miden movimientos relativos entre la cabeza de un sondeo y/o varios anclajes situados en su interior.</p> <p>Los movimientos de los anclajes se transmiten a la boca del sondeo mediante hilos y varillas.</p> <p>Las medidas se realizan en la cabeza mediante procedimientos mecánicos o eléctricos.</p>	<p>a)</p> <ul style="list-style-type: none"> - de hilos - de varillas <p>b)</p> <ul style="list-style-type: none"> - de lectura mecánica - de lectura eléctrica 	<ul style="list-style-type: none"> - Para longitudes menores de 40 metros es más conveniente el extensómetro de varillas y para longitudes mayores de 60 metros, el de hilos. - La lectura mecánica se realizará cuando la cabeza del sondeo sea accesible y no se requiera automatizar la medida. - Habrá que elegir el tipo de anclaje más adecuado para cada terreno de forma que se pueda asegurar que queda solidariamente unido al terreno circundante. - Hay que asegurarse que el punto más profundo de medida del extensómetro esté por debajo de la zona de movimiento.

Fuente: Herrera y Rivas, 2000

2.2.5.4.3. Medida de controles intersticiales

En ocasiones, es fundamental conocer con cierta precisión el valor de las presiones intersticiales y niveles freáticos en un talud, con el objeto de establecer las redes de flujo en el mismo.

- Pozos de observación:

La presión de poros se puede monitorear utilizando excavaciones de observación o piezómetros, los cuales pueden ser de tubo abierto, neumáticos o de cable vibratorio. El tipo de piezómetro a seleccionar para cada estudio específico depende de las características de funcionamiento del piezómetro y de su precisión.

- Sondeo Abierto:

Consiste en perforaciones abiertas en las cuales se coloca un tubo perforado en su base o tubos que se hincan a presión y luego se extraen ligeramente.

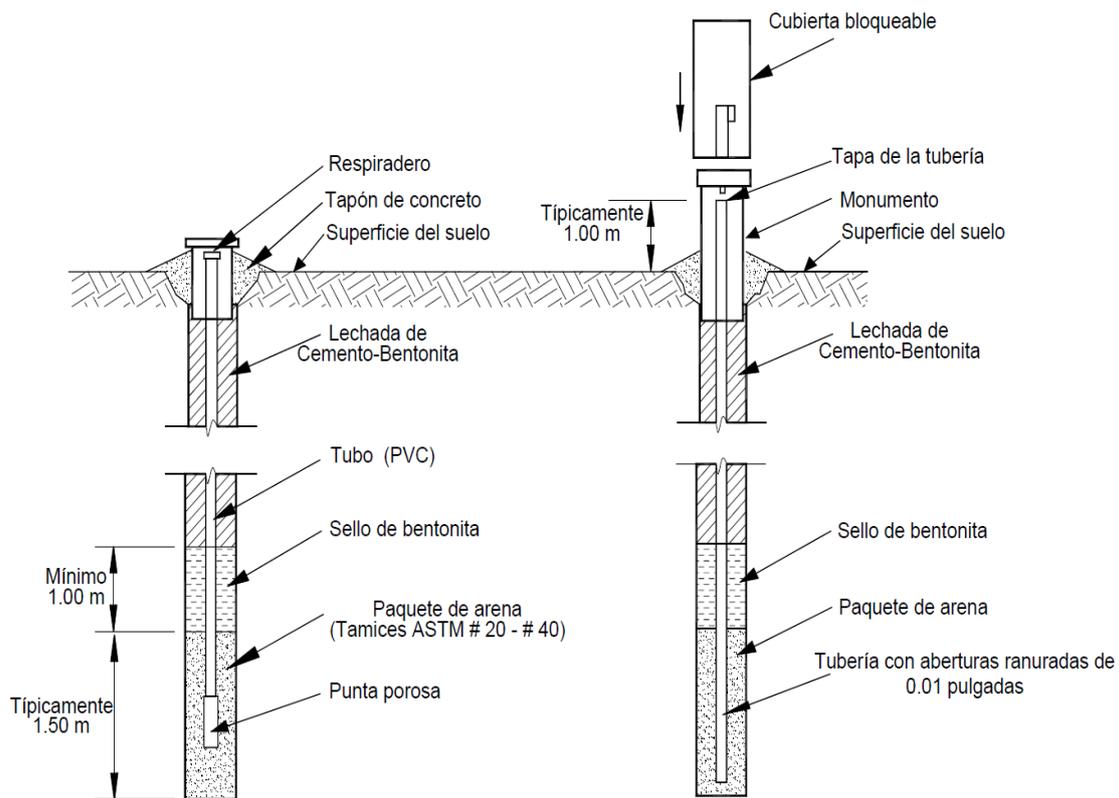


Figura 8. Piezómetros sencillos de cabeza abierta. (Cornforth, 2005)

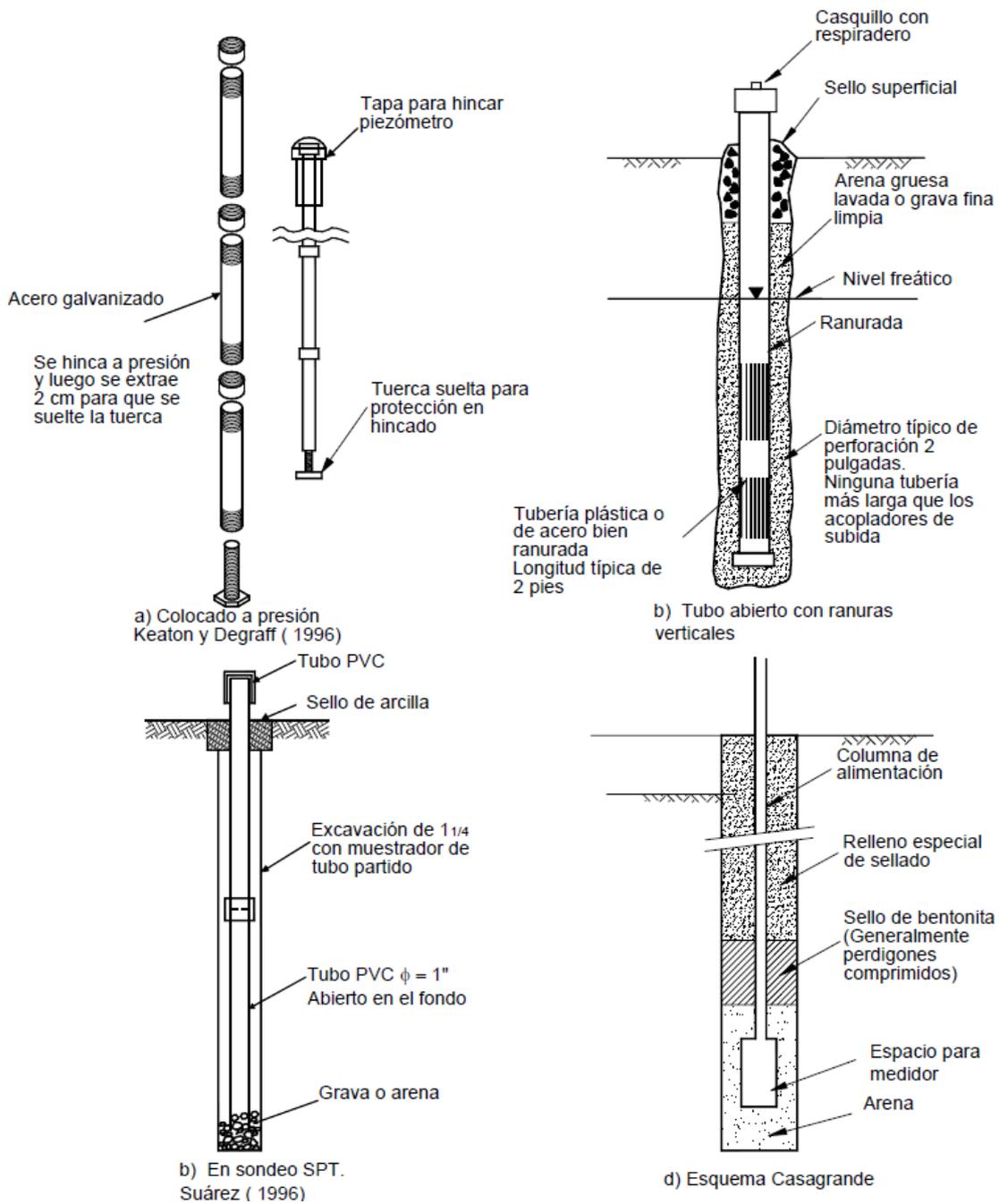


Figura 9. Piezómetros de cabeza abierta. (Suarez, 2009)

La profundidad del nivel de agua se puede medir por medio de un cable y un elemento detector (que bien puede ser un medidor eléctrico o un simple objeto metálico). Una cubierta de protección impide la entrada del agua lluvia.

Tabla 8. Control de monitoreo del nivel freático de un talud

Tipo	Sistema de Medida	Observaciones
Pozo de observación	Tubo ranurado instalado en el interior de un sondeo cuyo nivel de agua se mide con una sonda.	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos para medida de niveles freáticos en terrenos permeables. - No se pueden utilizar cuando hay niveles colgados o capas artesianas - Su tiempo de respuesta es largo, principalmente en terrenos poco permeables. - Movimientos grandes pueden dañar los tubos e impedir las medidas.
Piezómetro	Tubo ranurado en su extremo inferior, instalado en un sondeo. El extremo inferior se sella para evitar transmisión de presiones intersticiales en el interior del taladro. La medida del nivel se realiza con una sonda.	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos para medidas de presiones intersticiales en terrenos permeables - Baje coste - Solamente se pueden instalar en un punto de sondeo. - Su tiempo de respuesta es grande, principalmente en terrenos poco permeables. - Movimientos grandes pueden dañar los tubos e impedir las medidas.
Piezómetro cerrado	Sensor que detecta la presión intersticial en un punto mediante un transductor que da una señal proporcional a los cambios de presión.	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos para control de presiones intersticiales en uno o varios puntos situados en el interior de un sondeo. - Mayor coste que los anteriores. - Su tiempo de respuesta es corto aún en terrenos poco permeables. - Son poco afectados por los movimientos que se puedan producir en un talud. - Los de cuerda vibrante son precisos y fiables. Permiten transmitir la señal a distancias de más de 1000 metros sin perder la precisión. - Los de resistencia eléctrica pierden precisión con las variaciones de la temperatura y al transmitir la señal a distancia su estabilidad a largo plazo no está comprobada. - Los de tipo neumático son aconsejables para distancias entre sensor y unidad de lectura menores de 200 metros, siempre que no se quiera automatizar el proceso de medida.

Fuente: Herrera y Rivas, 2000

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Depósito de relave: Toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la Planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos. (SERNAGEOMIN, 2018)

Deslizamiento: los deslizamientos (“Landslides”) consisten en movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud (Suarez, 2009)

Estabilidad de taludes: es la teoría que estudia la estabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil siendo un aspecto directamente relacionado con la geotecnia; la estabilidad de un talud se puede producir por un desnivel, que tenga lugar a diversas razones. (Suarez, 2009)

Factor de Seguridad: equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad. (Suarez, 2009)

Filtración: Flujo de agua y humedad libre visible en discontinuidades o en la totalidad de la roca. (SERNAGEOMIN, 2018)

Instrumentación: es la técnica que proporciona al ingeniero información cuantitativa y cualitativa para permitirle adecuar y balancear los diseños geotécnicos de manera racional, obteniendo tanto seguridad como eficiencia, por lo que se le reconoce una gran utilidad. (IMTA, 2001)

Nivel freático: Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica. (SERNAGEOMIN, 2018)

Talud: cualquier plano que constituye una frontera entre los materiales de la cortina o con el medio ambiente. Generalmente se mide por la relación de longitudes entre el cateto horizontal y el vertical. (IMTA, 2001)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Ubicación geográfica

La Unidad Minera Yauricocha se ubica en el distrito de Alís, provincia de Yauyos, departamento de Lima, aproximadamente a 12 km al Sur de la Estación Pachacayo del Ferrocarril Central, en el flanco Oeste de la Cordillera Occidental de los Andes y en las nacientes de uno de los afluentes del río Cañete en la Sierra Central. A una altitud que varía entre los 4150 y los 4850 msnm.

3.1.2. Accesibilidad

El acceso al área del proyecto es por vía terrestre, se puede tomar 03 rutas alternas desde la ciudad de Lima, a través de la carretera Panamericana Sur y Central.

Tabla 9. Accesibilidad a la zona de estudio

Tramo	Distancia (km)	Tiempo	Tipo de Carretera
Lima – La Oroya – Pachacayo - Yauricocha	330	8 horas	Asfaltada – afirmada
Lima – La Oroya – Huancayo - Yauricocha	420	8 horas	Asfaltada – afirmada
Lima – Cañete – Lunahuaná – Yauricocha	343	6 horas	Asfaltada – afirmada

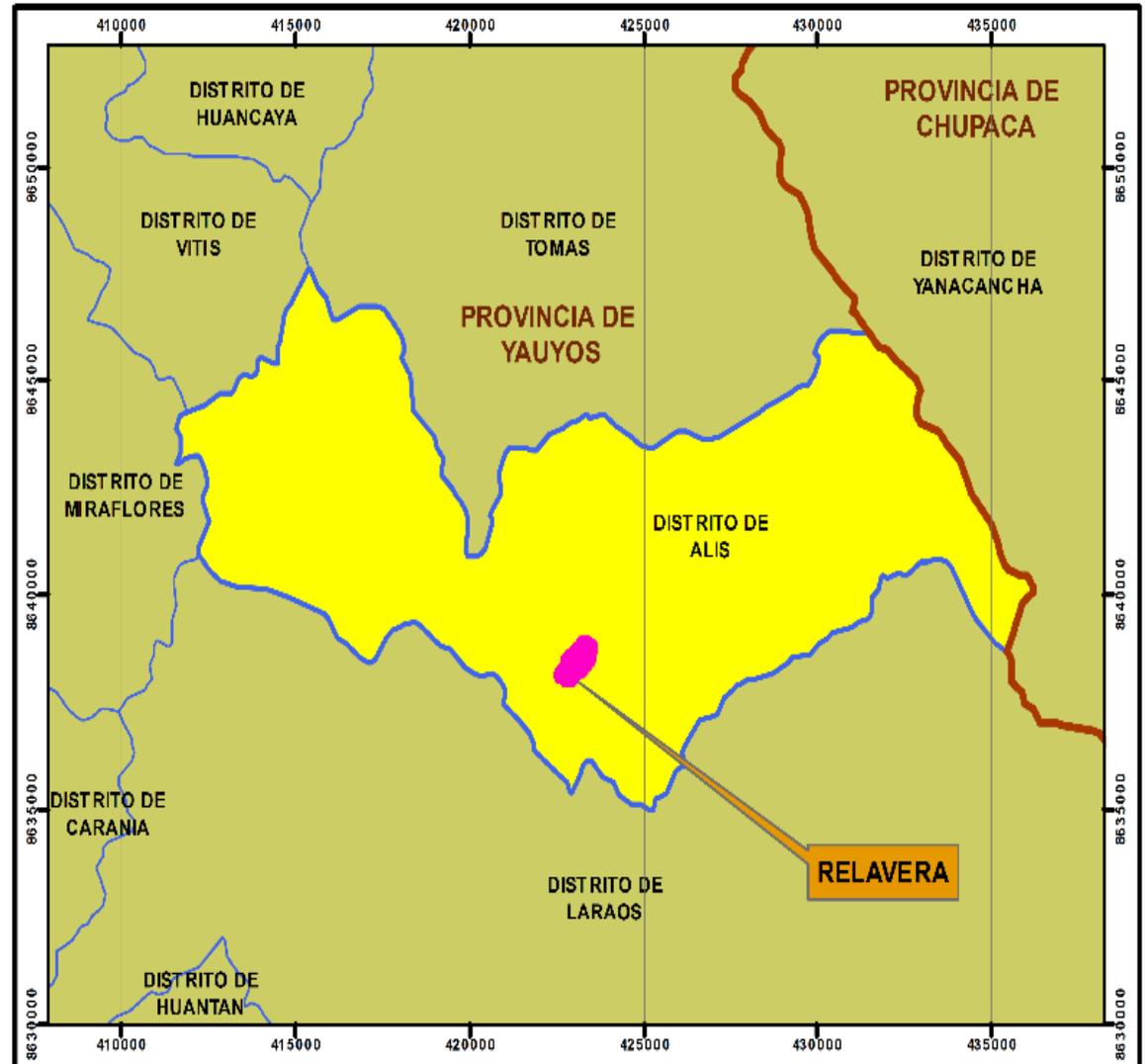


Figura 10. Ubicación del área de estudio

3.1.3. Clima:

El clima de la región es semifrío, lluvioso, con presencia de lluvias y granizadas en invierno y con humedad relativa calificada como húmeda. Se presentan dos estaciones bien demarcadas con temperaturas diurnas de más de 20 °C, las noches son frescas con temperaturas de menos de 10 °C. Las operaciones se llevan a cabo durante todo el año. La temporada de lluvias se extiende de noviembre a abril, y durante abril y mayo hay una amplia cubierta vegetal, la estación seca abarca el resto del año. (SRK, 2016).

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Variables

Tabla 10. Variables de la investigación

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL
DEPENDIENTE	
Control de estabilidad de la presa de relaves	La estabilidad del depósito de relaves está asociada a la eventual ocurrencia de rotura de la presa, fallamiento y deslizamiento del talud. Para garantizar un adecuado comportamiento es necesario evaluar la estabilidad de sus taludes y verificar si los factores de seguridad se encuentran por encima de los valores mínimos recomendados.
INDEPENDIENTE	
Factores geotécnicos	Referido a los riesgos asociados a la inestabilidad de taludes (bajo condiciones estáticas y sísmicas), deformaciones excesivas, rebalse, inestabilidad del suelo de fundación, planos de falla, filtraciones de agua.
Instrumentación geotécnica	Se entiende por instrumentación la instalación y disposición de los diversos sensores y equipos destinados a la lectura de las distintas magnitudes geotécnicas que se pretende controlar durante el proceso de auscultación del elemento constructivo y operativo.

3.2.2. Tipo y diseño de la investigación

La investigación es de tipo descriptivo, cuasi experimental y de carácter longitudinal.

Los métodos de investigación son: descriptivo, analítico, explicativo.

3.2.3. Población de estudio

Presa de relaves – Unidad Minera Yauricocha

3.2.4. Muestra

Piezómetros, Prismas de monitoreo, Inclinómetro

3.2.5. Unidad de análisis

Falla, talud, ángulo de reposo, desplazamientos, deformaciones, borde libre, nivel freático.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnicas

- Análisis documental: recopilar la información, planos, estudios e informes técnicos referidos a la presa de relaves y factores geotécnicos analizados en ellos (factor de seguridad, estabilidad de taludes).
- Observación directa: consta de la inspección del borde libre de la presa de relaves, ancho y longitud real del dique de contención, estado actual de los parámetros de la presa de relaves en su cuarta etapa de recrecimiento.

3.3.2. Instrumentos, Materiales y Equipos

- Cámara fotográfica, laptop: para el procesamiento de datos
- Flexómetro: verificar y tomar medidas de la presa de relaves
- Libreta de campo, lapiceros: anotar las observaciones y datos tomados en campo

3.3.3. Software's usados para el procesamiento de datos

- Autocad 2018
- Slope/W

- Gtilt Plus
- Geomos Analyzer
- Hoja de cálculo
- Word

3.4. PROCEDIMIENTO

3.4.1. Etapa preliminar de gabinete

En esta etapa se recopiló la información necesaria y concerniente sobre la presa de relaves; la misma que fue brindada por Sociedad Minera Corona, y empresas consultoras como Klohn Crippen Berger, Tierra Group, Geoservis, SVS Ingenieros. Asimismo, para la elaboración de la presente investigación se recurrió a guías como la Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Residuos Sólidos Provenientes de Actividad Mineras del Ministerio de Energía y Minas, Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remantes y el Reglamento Nacional de Edificaciones , además se consultó diversas tesis, información en internet relacionada al tema en mención a fin de adquirir aprendizajes más significativos y lograr un desarrollo óptimo de la investigación.

3.4.2. Etapa de campo

Se verificó en campo las condiciones actuales de la presa de relaves en su cuarta etapa de recrecimiento, así como del dique de contención, y correlacionando con la información recopilada se evaluó y analizó los parámetros a monitorear (movimientos superficiales, movimientos en el interior de la estructura del dique de contención y comportamiento del nivel del agua) por lo que se realizó un programa de trabajo de campo para la implementación de la instrumentación geotécnica, el cual consistió en: realizar 3 taladros para tubería piezométrica, 1 taladro para el inclinómetro y 5 puntos de control topográfico, mediante prismas de monitoreo con el Equipo Robot Leica TM50.

Simultáneamente se coordinó con los diversos proveedores y el área de logística de Sociedad Minera Corona para la adquisición de los materiales y equipos a instalarse, con el propósito de implementar el sistema de auscultación y/o monitoreo geotécnico de la presa de relaves.

3.4.3. Etapa final de gabinete

En esta etapa, la data adquirida fue procesada usando el software Excel, Gtilt Plus y Autocad a fin de graficar y analizar los desplazamientos, vectores de desplazamiento, velocidades y aceleraciones de los movimientos superficiales y del interior de la estructura de la presa de relaves, así mismo se graficó e interpretó el comportamiento del agua a partir de las lecturas obtenidas de los diversos piezómetros.

La instrumentación geotécnica instalada para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves se plasmó en planos en planta y sección, para lo cual se utilizó el software Autocad 2018.

3.5. CONTEXTO

3.5.1. Geología Local

El depósito de relaves Yauricocha, ocupa el espacio de la laguna del mismo nombre, en la cabecera de la quebrada Chumpe.

Siendo la laguna de origen glacial, en la cabecera se desarrollan depósitos glaciares morrénicos en todo su contorno. Así mismo también depósitos lagunares, bajo las aguas de las lagunas y sobre ellos los relaves depositados por la actividad minera.

Las rocas que se emplazan en los alrededores corresponden a un intrusivo granodiorítico(N-gd), que intruye a las Formaciones Celendín y Casapalca (Ksp-c), a consecuencia de ello se presentan rocas muy alteradas y formación de suelos, principalmente en la zona del material intrusivo, que ha sido aprovechado como cantera para la conformación del dique de relaves. (SRK, 2016)

- **Formación Goyllarisquizga**

Las rocas más antiguas expuestas en el área son las areniscas de la formación Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior. Este grupo de aproximadamente 300 m de espesor está constituido por areniscas gruesas blancas a grises, localmente bandeadas con lutitas carbonáceas así como pequeños mantos de carbón de mala calidad y arcilla. En las cercanías de Chaucha, estas areniscas presentan intercalaciones de lutitas rojas en la base, las areniscas afloran en los núcleos de los anticlinales al SW de Yauricocha y como capas dispersas a lo largo de la "zona revuelta de Chacras" así como en afloramientos aislados en la zona.

- **Formación Jumasha**

Concordante sobre la formación Goyllarisquizga, se encuentra la formación Jumasha del Cretáceo Medio. Esta formación con espesor promedio de 700 m consistente de caliza masiva de color gris claro. En la base, cerca al contacto con las areniscas, incluye intercalaciones de lutitas carbonosas. Estos estratos están sucedidos por lentes discontinuos de calizas marrones y grises, ocasionalmente con horizontes lutáceos y silíceos de unos 6,00 m de espesor. También están presentes pseudo brechas de probable origen sedimentario y un sill de basalto.

- **Formación Celendín**

Sobre yaciendo concordantemente a las calizas Jumasha se encuentra la formación Celendín; formada por lutitas silicificadas finamente estratificada con intercalaciones de caliza recristalizada de edad Santoniana. Su espesor promedio en el área de Yauricocha es de 400 metros.

A esta unidad que anteriormente se le consideraba como estratos inferiores de las capas rojas Casapalca, localmente se le ha denominado France Chert.

- **Formación Capas Rojas Casapalca**

Esta formación sobreyace concordantemente a la formación Celendín siendo su contacto gradacional. Se le ha asignado una edad entre el Cretáceo Superior y el Terciario Inferior, ya que la ausencia de fósiles no permite datarla con exactitud.

Está constituida principalmente por lutitas rojas calcáreas, calizas puras y calizas arenosas rojizas, ocasionalmente se ha reportado la presencia de flujos de lava y capas tufáceas.

- **Formación Intrusiva**

La actividad intrusiva se desarrolló mayormente en el mioceno. Los intrusivos presentan contactos definidos y de gran ángulo con los sedimentos, así como una neta tendencia a seguir el rumbo regional y plano de estratificación. Su composición varía de granodiorita a cuarzo-monzonita en los bordes, observándose macroscópicamente plagioclasa, ortosa, biotita, horblenda y cuarzo. Las plagioclasas, fluctúan desde oligoclasa hasta andesina, presentando comúnmente textura porfirítica.

• **Estratigrafía:**

La Figura 11 muestra una columna estratigráfica simplificada del área de la mina Yauricocha con detalles del período geológico.

Tabla 11. Columna estratigráfica

Cuaternario	Depósitos glaciales
Paleógeno Neógeno	Intrusivos (complejos monzoníticos-granodioríticos)
Casapalca capas rojas	
Cretácico Superior	Formación Celendín (France Chert)
	Caliza jumasha
Cretácico inferior	Formación Goyllarisquizga

Fuente: DIA BRAS, 2012

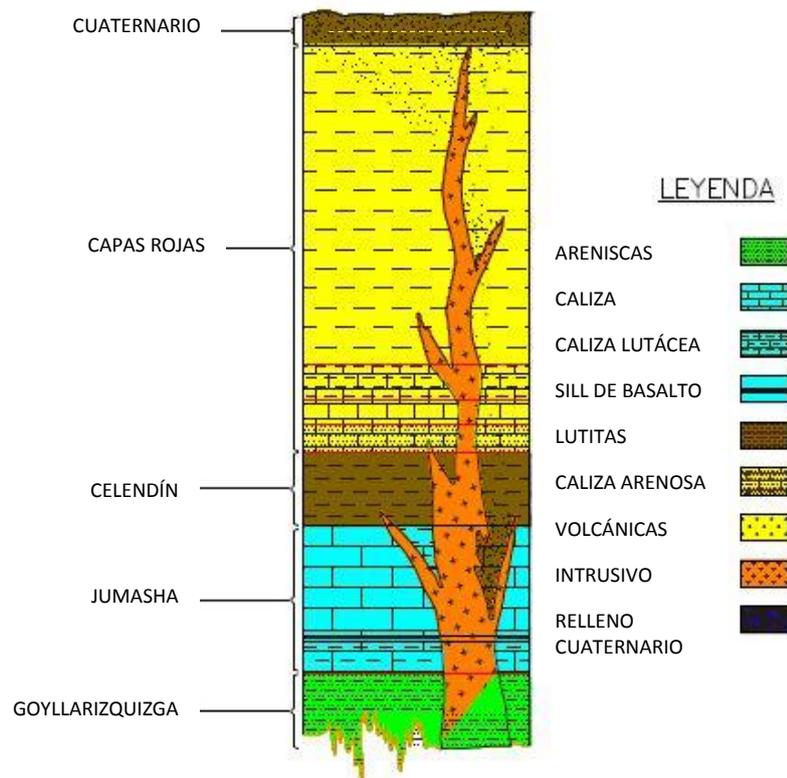


Figura 11. Esquema gráfico del área de Yauricocha. (Córdova, 2012)

3.5.2. Geología Estructural

La geología estructural en el área está representada por la Falla Yauricocha, proveniente de un sistema de fallas que tuvo lugar durante el plegamiento, de características longitudinales y paralelas al rumbo regional de la estratificación. Esta falla aparece a lo largo del contacto caliza Jumasha – lutita Celendín, la cual se extiende a gran distancia.

3.5.3. Geología del Yacimiento

La Unidad Minera Yauricocha está conformada por las minas: Central y Cachi Cachi. La mineralización de la mina Yauricocha está formada principalmente por pirita, cuarzo, enargita, chalcopirita, bornita, covelita en el núcleo y parte central de los cuerpos.

Asimismo, la presencia de Au nativo se halla asociado a dichos sulfuros. Como minerales ganga tenemos el cuarzo, especularita, calcita, fluorita y baritina.

3.5.5. Geodinámica Externa

Los fenómenos que involucran movimientos de masas en el área de interés se circunscriben a dos principalmente; caídas de roca debido a la topografía accidentada y a la alta pendiente de la parte media de los afloramientos rocosos y los pequeños deslizamientos de los depósitos coluviales presentes al pie de los taludes.

Asimismo, durante la prospección de campo se detectó actividad antrópica proveniente de la operación del depósito de relaves.

3.5.6. Sismicidad

La Norma Sismo resistente E-030, del Reglamento Nacional de Construcción, ubica a la zona de estudio, en la zona 3 de sismicidad, (límitrofe con la Zona 2), con un factor de aceleración máxima de zona de 0.35g, a nivel de la roca, con una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años, siendo posible la ocurrencia de sismos de intensidad de VI a VII grados en la escala de Mercalli Modificada. (SRK, 2016).



Figura 12. Mapa de zonas sísmicas del Perú. (Tavera, 2012)

3.6. ESTADO ACTUAL DE LA PRESA DE RELAVES

3.6.1. Descripción del proyecto

A partir del año 2002, Sociedad Minera Corona S.A. es propietaria de la concesión minera Yauricocha, donde opera un yacimiento polimetálico de plomo, cobre, plata, zinc y óxidos. Los residuos mineros de la operación son almacenados en el depósito de relaves Yauricocha.

En vista que el depósito presentaba una capacidad de almacenamiento reducida, el año 2007 SMC solicitó a CESEL S.A. la elaboración de la “Ingeniería de Detalle para el Recrecimiento del Dique de Relaves de la Unidad Yauricocha”, el cual fue construido parcialmente hasta la cota de cresta 4509 msnm.

El año 2008, SMC encargó a Klohn Crippen Berger S.A. (KCB) la elaboración de la “Ingeniería de Detalle del Recrecimiento del Depósito de Relaves Yauricocha”, el cual contempló el crecimiento del dique a partir de la cota 4509 msnm, en cuatro etapas de construcción hasta el nivel de cresta 4529 msnm, que es la cota actual del Dique de Relaves de la Unidad Yauricocha, con un borde libre de 3m.

3.6.2. Criterios de diseño

La evaluación geotécnica estuvo a cargo de la empresa consultora Tierra Group, quien consideró los criterios de diseño establecidos por el Ministerio de Energía y Minas (MEM, 1997) y los criterios de diseño establecidos en el Memorandum Técnico de “Criterios de Diseño del Proyecto” (Tierra Group, 2016).

3.6.3. Caracterización Geotécnica

En base a la información geotécnica obtenida en las campañas de investigación desarrolladas por KCB y SVS, se ha podido determinar que el dique del depósito está conformado por material granular denso a muy denso, clasificado como grava mal gradada ligeramente arcillosa (GP-GC), compuesta por fragmentos sub-angulosos de roca intrusiva (granodiorita) y rocas metamórficas silicificadas (caliza recristalizada), provenientes de las canteras Chumpe y desmonte de mina del nivel 300. La sobre-elevación final de la cresta del dique se hace a través de un muro de material compactado y reforzado, conocido como Sistema Terramesh. La cimentación del dique está constituida por un depósito residual compuesto por fragmentos de roca y bolonería en matriz de grava areno-arcillosa, densa a muy densa, bajo la cual yace el basamento de rocas intrusivas y metamórficas.

3.6.4. Propiedades de los Materiales

Las propiedades de los materiales provienen de ensayos de laboratorio en muestras recolectadas durante la investigación geotécnica, y ensayos de laboratorio realizados en análisis anteriores (Klohn Crippen, 2009, y Geoservice, 2014).

Las propiedades del material de relleno de la presa provienen de los ensayos de corte directo. Las propiedades del relave están basadas en un ensayo de compresión triaxial no consolidado no drenado realizada por Geoservice (2014). Las propiedades del muro Terramesh provienen del fabricante y están detallados en el reporte de Klohn Crippen

Berger (2009). El material de grava proviene de los ensayos de laboratorio realizados por Geoservice (2014). Los materiales de turba, roca caliza y roca granodiorita provienen de los análisis realizados por Klohn Crippen Berger (2009).

La Tabla 12 muestra el resumen de las propiedades de los materiales utilizados en el análisis de estabilidad por Klohn Crippen Berger S.A. (KCB).

Tabla 12. Propiedades de los Materiales

Nombre del Material	Modelo	Peso Unitario (kN/m³)	Ángulo de Fricción (°)	Cohesión (kPa)	Fuente
Relleno de Presa	Mohr-Coulomb	21.6	28.8	53	Ensayos de Laboratorio
Relaves	Mohr-Coulomb	19.3	33	0	Ensayo de Laboratorio (Geoservice, 2014)
Muro Terramesh	Mohr-Coulomb	17.5	40	17.5	Klohn Crippen Berger, 2009
Grava	Mohr-Coulomb	16.7	43	0	Ensayo de Laboratorio (Geoservice, 2014)
Turba	Mohr-Coulomb	16.0	37	0	Klohn Crippen Berger, 2009
Roca (Caliza)	Mohr-Coulomb	23.0	25	100	Klohn Crippen Berger, 2009
Roca (Granodiorita)	Mohr-Coulomb	23.0	25	100	Klohn Crippen Berger, 2009

Fuente: Tierra Group, 2016

3.6.5. Estabilidad de la presa de relaves

El cuerpo de la presa está compuesto principalmente por material de grava limoso y grava arcillosa compactado. La presa ha sido expandida utilizando el método del eje central colocando un muro vertical reforzado (sistema de Terramesh) en la cresta. El sistema de Terramesh consiste de geomallas y gaviones y material compactado.

Los suelos de fundación del pie de la presa están conformados en su mayoría por material gravoso, y una delgada capa de turba, que cubren el lecho de roca. El material encontrado por debajo de la presa es en su mayoría roca caliza y roca graniodiorita. Ambos tipos de roca se encuentran moderadamente fracturados a bastante fracturados.

Los resultados del modelo de estabilidad realizados por Tierra Group indican que la presa de relaves Yauricocha en su estado actual cumple con los factores de seguridad mínimos requeridos. (Tierra Group, 2016)

Tabla 13. Resultados del Modelo de Estabilidad

Caso	Factor de Seguridad		
	Estático	Pseudo-Estático	Post-Sismo
Factor de Seguridad Requerido	1.50	1.00	1.20
Construcción – Superficie de falla en fundación	2.05	1.26	1.68
Operaciones – Superficie de falla en fundación	2.05	1.24	1.68
Construcción – Superficie de falla en presa	2.17	1.33	1.68
Operaciones – Superficie de falla en presa	2.17	1.33	1.68

Fuente: Tierra Group, 2016

3.6.6. Dique de contención

El dique de contención es un terraplén de zonificación compuesta, conformado con material de relleno común compactado (o desmonte de mina) y elementos terramesh que cierran el límite aguas abajo de la quebrada Yauricocha.

El recrecimiento del dique de contención se efectuó en 4 etapas de sobreelevación de 5 m cada una (medidos desde la actual corona de presa), hasta que la cresta del dique de presa alcanzó el nivel 4529 msnm.

A continuación, se describe las características principales del dique de contención en sus 4 etapas de crecimiento:

Tabla 14. Características del Dique de Contención

Descripción	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	Etapas 4
Tipo de presa	Mixta	Mixta	Mixta	Mixta
Ancho de Corona	8 m	8 m	8 m	8 m
Talud de Aguas Arriba	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical
Talud de Aguas Abajo	2.5H:1V	2.5H:1V	2.5H:1V	2.5H:1V
Longitud Corona	172 m	199 m	235 m	267 m
Elevación Corona	4514 msnm	4519 msnm	4524 msnm	4529 msnm
Nivel Máximo de almacenamiento	4512 msnm	4517 msnm	4522 msnm	4526 msnm
Borde Libre	2 m	2 m	2 m	3 m
Máxima altura de presa (*)	29.5 m	34.5 m	39.5 m	44.5 m
Volumen del Depósito	866,000 m ³	1'059,000 m ³	1'402,000 m ³	1'348,000 m ³
Capacidad de almacenamiento	1'212,400 t	1'482,600 t	1'962,800 t	1'887,200 t
Producción anual (**)	730,000 t/año	730,000 t/año	730,000 t/año	730,000 t/año
Tiempo de operación	1.7 años	2.1 años	2.7 años	2.6 años
Tiempo de operación total	1.7 años	3.8 años	6.7 años	9.1 años
Capacidad total	1'212,400 t	2'695,000 t	4'657,800 t	6'545,000 t

Fuente: KCB, 2009

(*) En base a estudio elaborado por Cesel en el 2007.

(**) En base a información proporcionada por SMCSA

3.7. CORROBORACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

Con la finalidad de comprobar los cálculos de estabilidad de la presa de relaves de acuerdo a su diseño, se calculó los factores de seguridad usando como herramienta el software Slope/W y los datos de las propiedades de los materiales, ver tabla 12, los cuales

pertenecen a la empresa Tierra Group, responsable de la ejecución y construcción del diseño de la cuarta etapa de recrecimiento de la presa de relaves.

Para realizar el modelamiento en el Slope/W se trabajó con una sección que pasa por el centro de la presa de relaves, la estratigrafía de la sección es basada en registros de perforaciones realizadas durante análisis anteriores (Klohn Crippen Berger, 2009; Geoservice, 2014).

Para el análisis en el Slope/W se utilizó el método de Morgenstern-Price, el cual satisface el equilibrio de la fuerza y el momento. La presa de relaves Yauricocha fue evaluada para condiciones de carga estática y pseudoestática.

El análisis pseudo-estático somete la masa deslizante a una aceleración horizontal igual a una mitad de la máxima aceleración del suelo (Hynes-Griffin and Franklin, 1984). Sin embargo, para el presente análisis de los factores de seguridad se ha considerado un valor de aceleración horizontal de 0.20g. Los análisis pseudo-estáticos son considerados como un método de revisión para verificar la posible deformación del terraplén (CDA, 2014). Si los análisis de estabilidad pseudo-estáticos resultan en un factor de seguridad mayor a 1.0, entonces se anticipa una deformación de la cresta menor a 1.0 m (Hynes-Griffin and Franklin, 1984). Sin embargo, si el factor de seguridad pseudo-estático es menor a 1.0 se requiere un análisis de deformación más detallado para cuantificar la deformación anticipada que resulta del evento sísmico de diseño.

Los análisis post-sismo evalúan la estabilidad del talud/pendiente inmediatamente después del terremoto de diseño. Se asumen condiciones de carga estática, pero se emplean resistencias residuales usando una reducción del 20% a la resistencia de los materiales sujetos a presiones de poros durante condiciones cíclicas (Hynes-Griffen y Franklin, 1984). Los materiales sujetos a una reducción del 20% son los relaves, el material de relleno de la presa, y la grava al pie de la presa.

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Análisis Pseudoestático – Condiciones Actuales
 Horz Seismic Coef.: 0.2

Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Roca (Granodiorita)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Roca (Caliza)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 43°

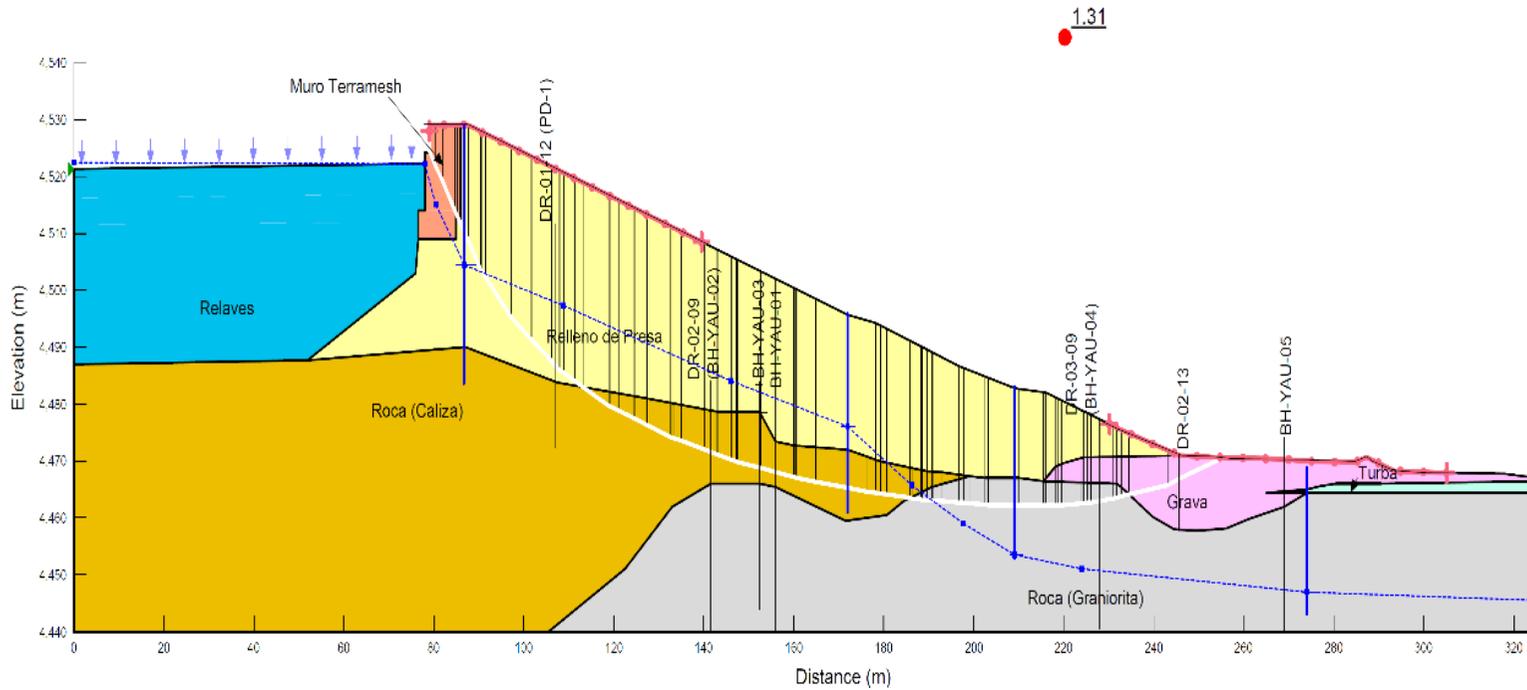
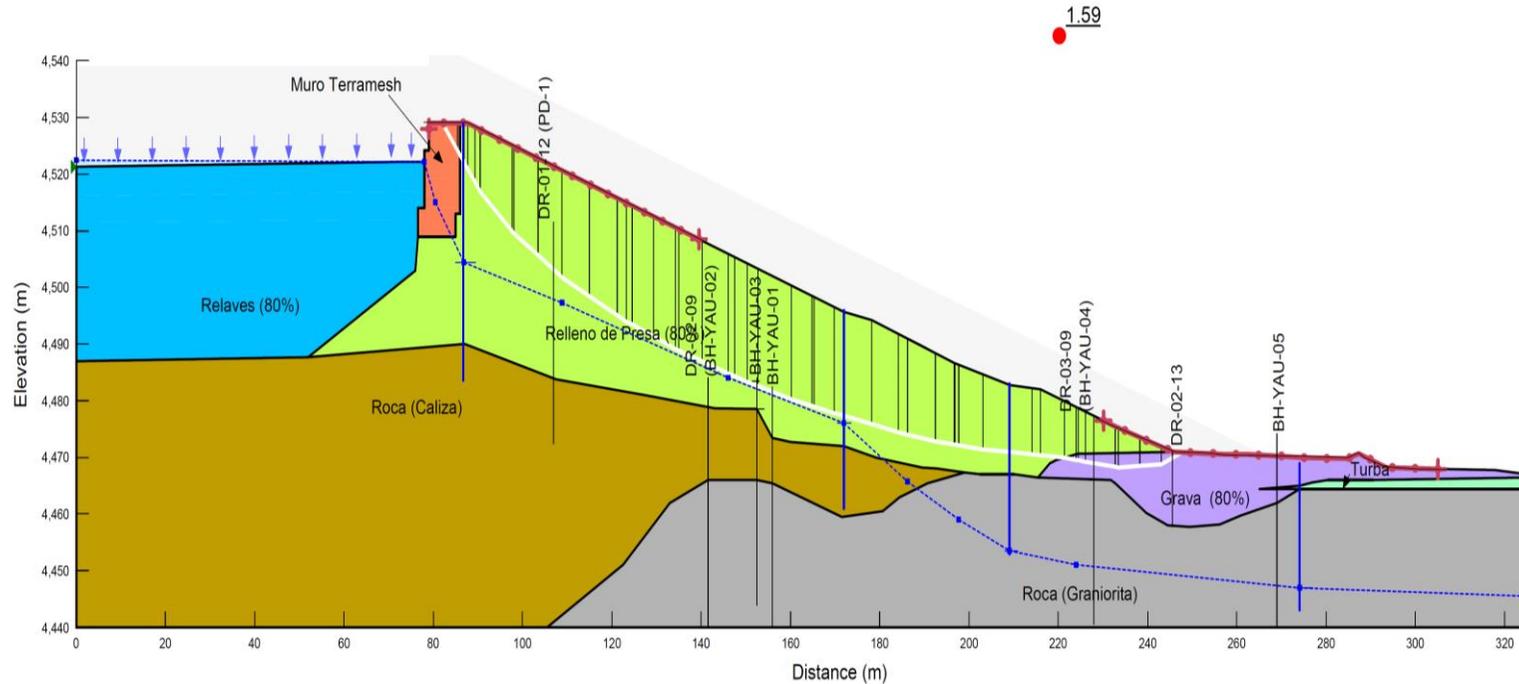


Figura 13. Análisis Pseudoestático en Condiciones Actuales

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Post Sismo – Condiciones Actuales



Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Roca (Granodiorita)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Roca (Caliza)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 26.4°

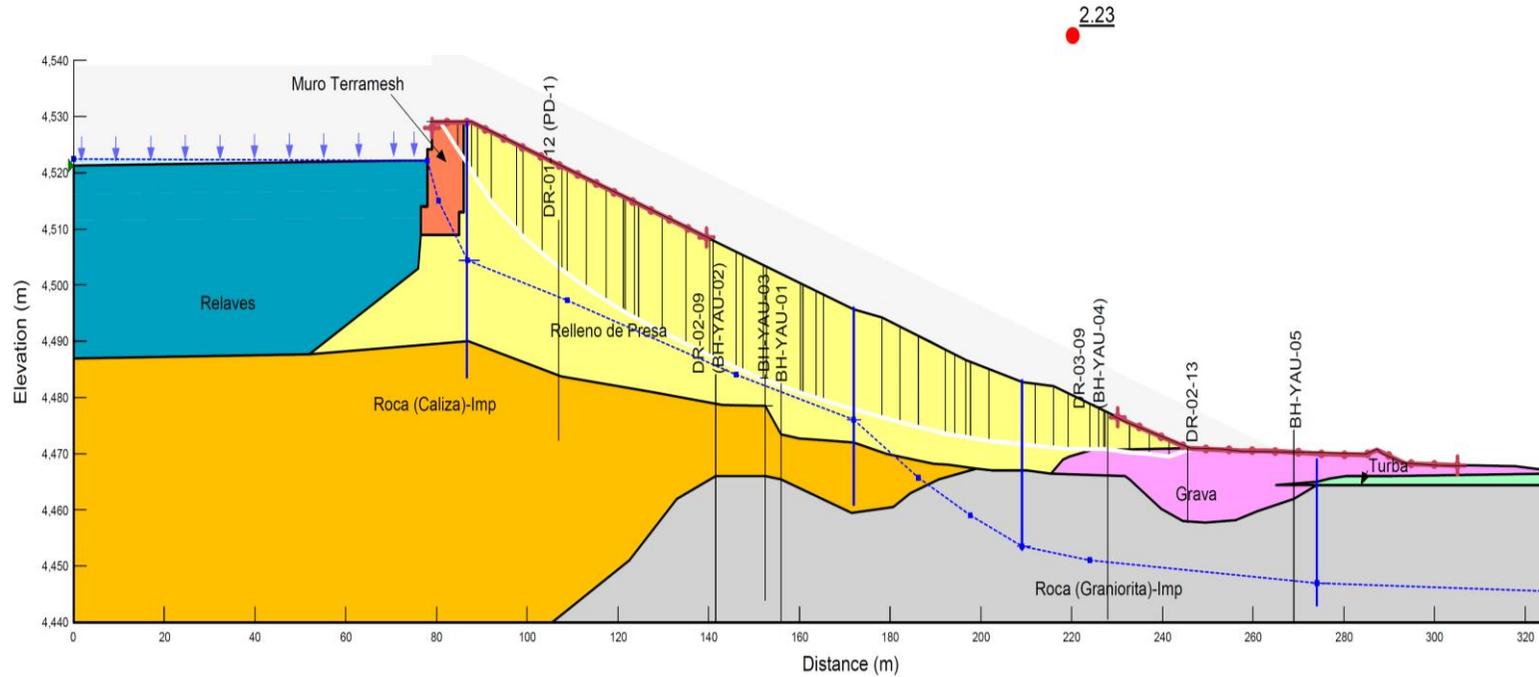
Name: Relleno de Presa (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 42 kPa
 Phi': 23.04°

Name: Grava (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 34.4°

Figura 14. Análisis Post Sismo – Condiciones Actuales

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Estática – Condiciones Actuales



Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 43°

Name: Roca (Caliza) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Name: Roca (Graniorita) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Figura 15. Análisis estático – Condiciones Actuales

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Pseudoestático – Condiciones Actuales
 Horz Seismic Coef.: 0.2

Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 43°

Name: Roca (Caliza) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Name: Roca (Granodiorita) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

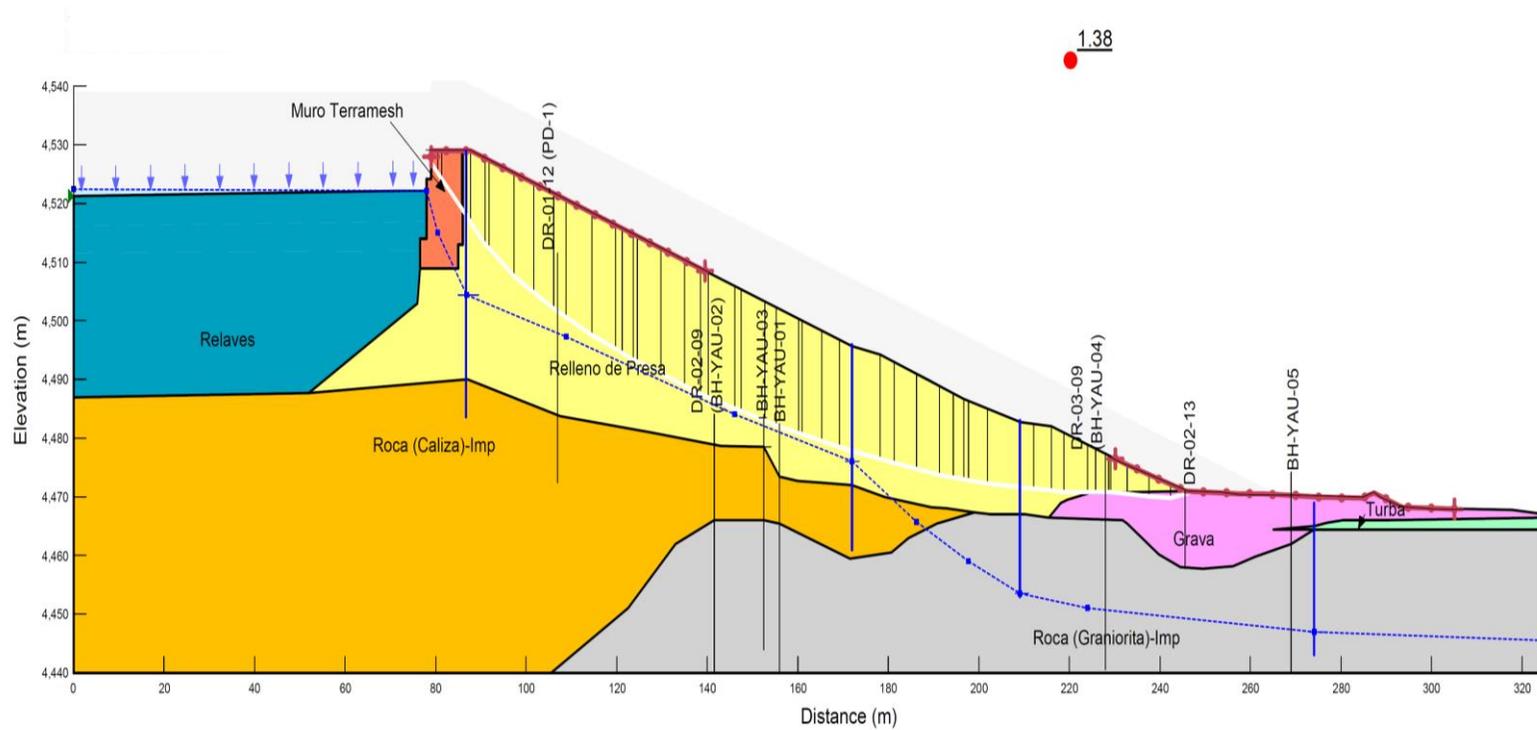
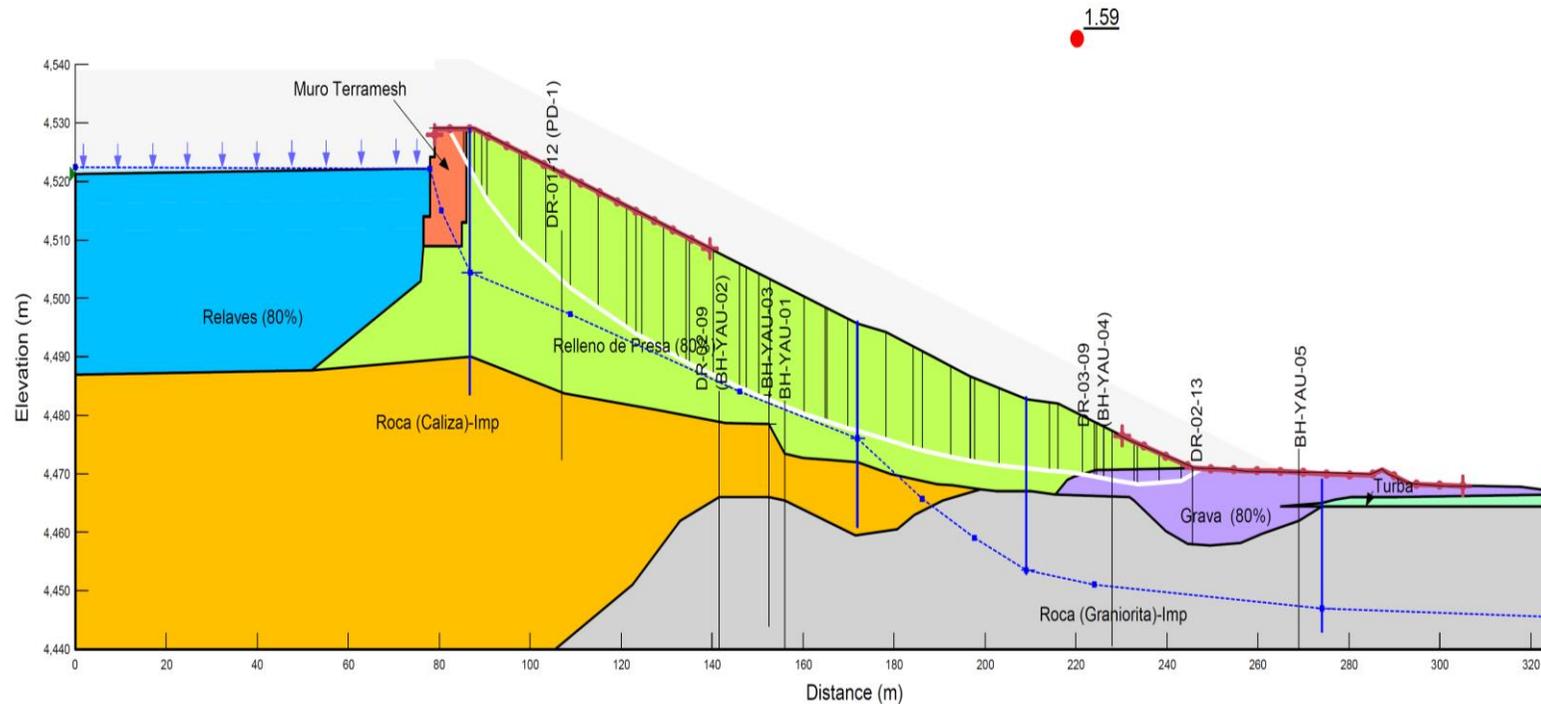


Figura 16. Análisis Pseudoestático – Condiciones actuales

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Post Sismo– Condiciones Actuales



Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 26.4°

Name: Relleno de Presa (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 42 kPa
 Phi': 23.04°

Name: Grava (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 34.4°

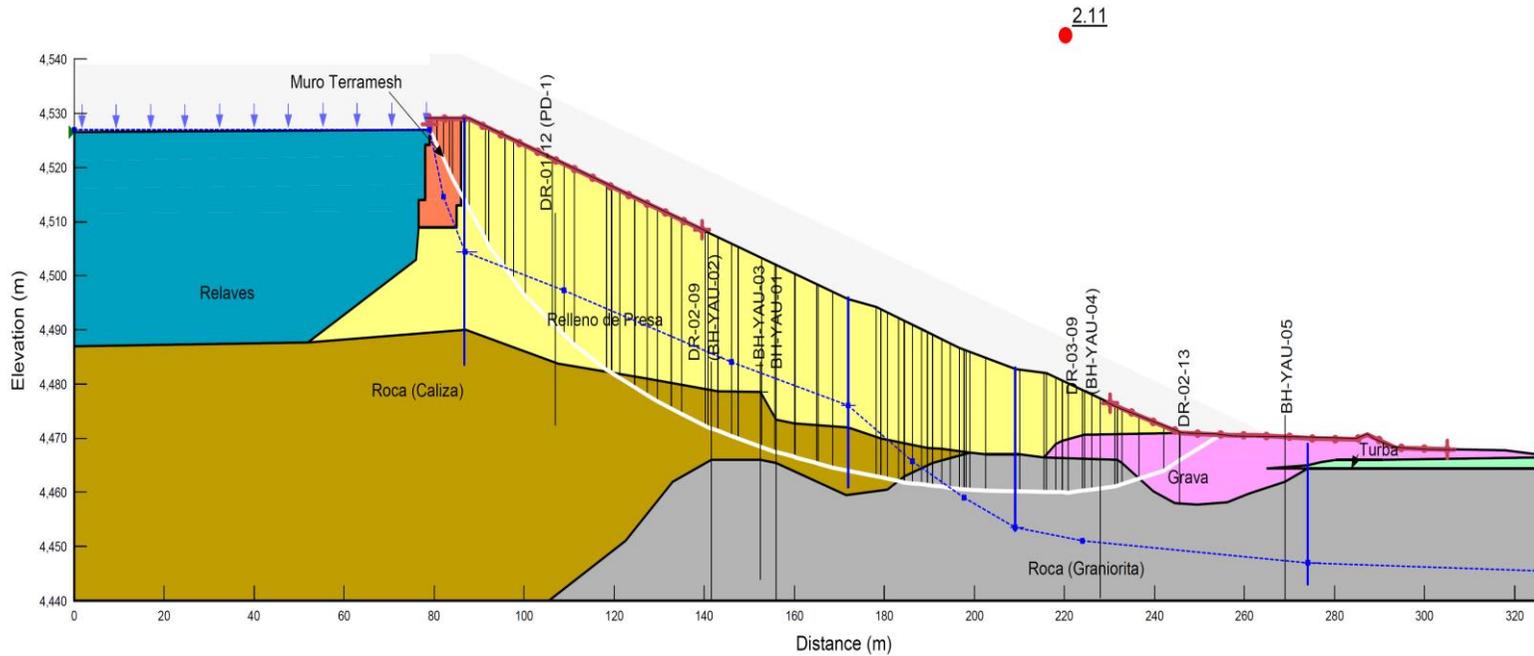
Name: Roca (Caliza) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Name: Roca (Graniorita) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Figura 17. Análisis Post Sismo – Condiciones actuales

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Análisis Estático – Operaciones



Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Roca (Granodiorita)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Roca (Caliza)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

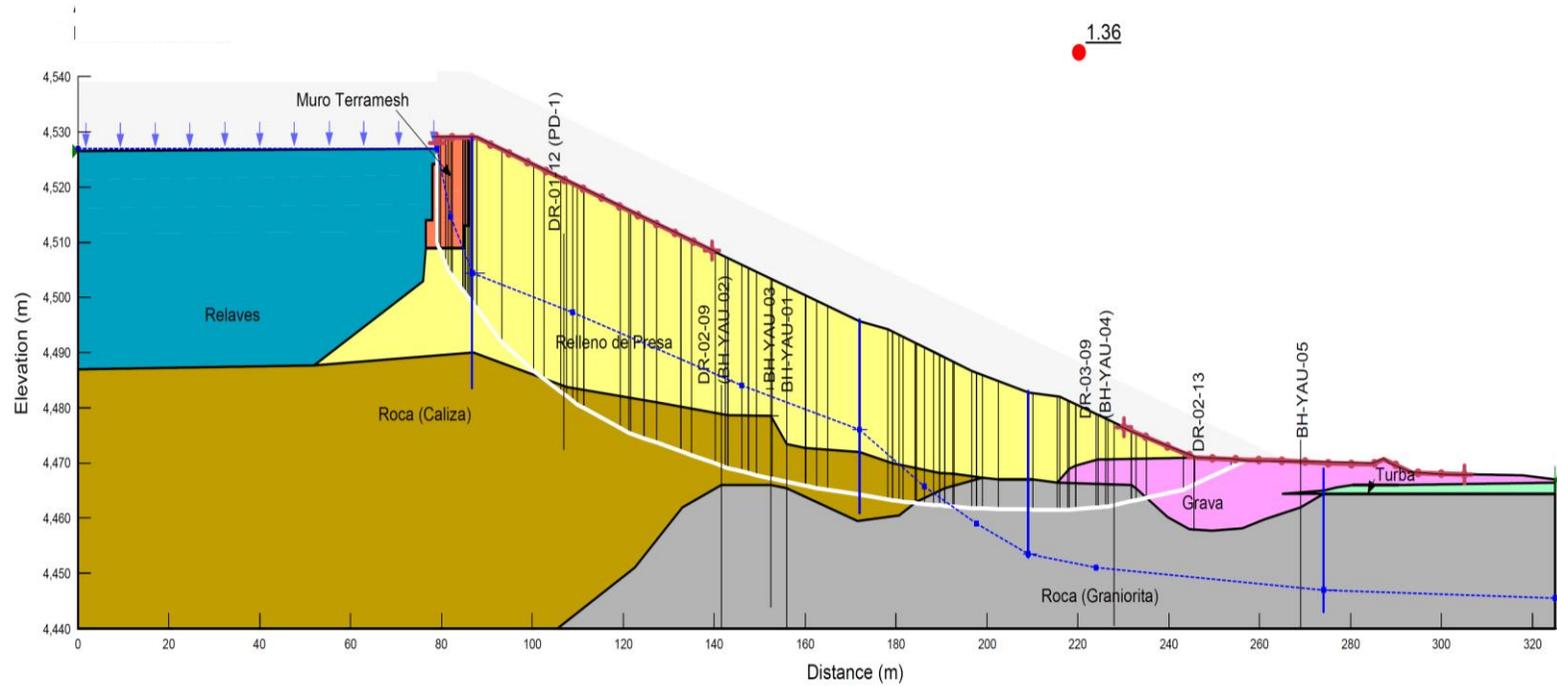
Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 43°

Figura 18. Análisis Estático – Operaciones

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Análisis Pseudoestático – Operaciones
 Horz Seismic Coef.: 0.2



Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi°: 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi°: 40°

Name: Roca (Granodiorita)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi°: 25°

Name: Roca (Caliza)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi°: 25°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi°: 37°

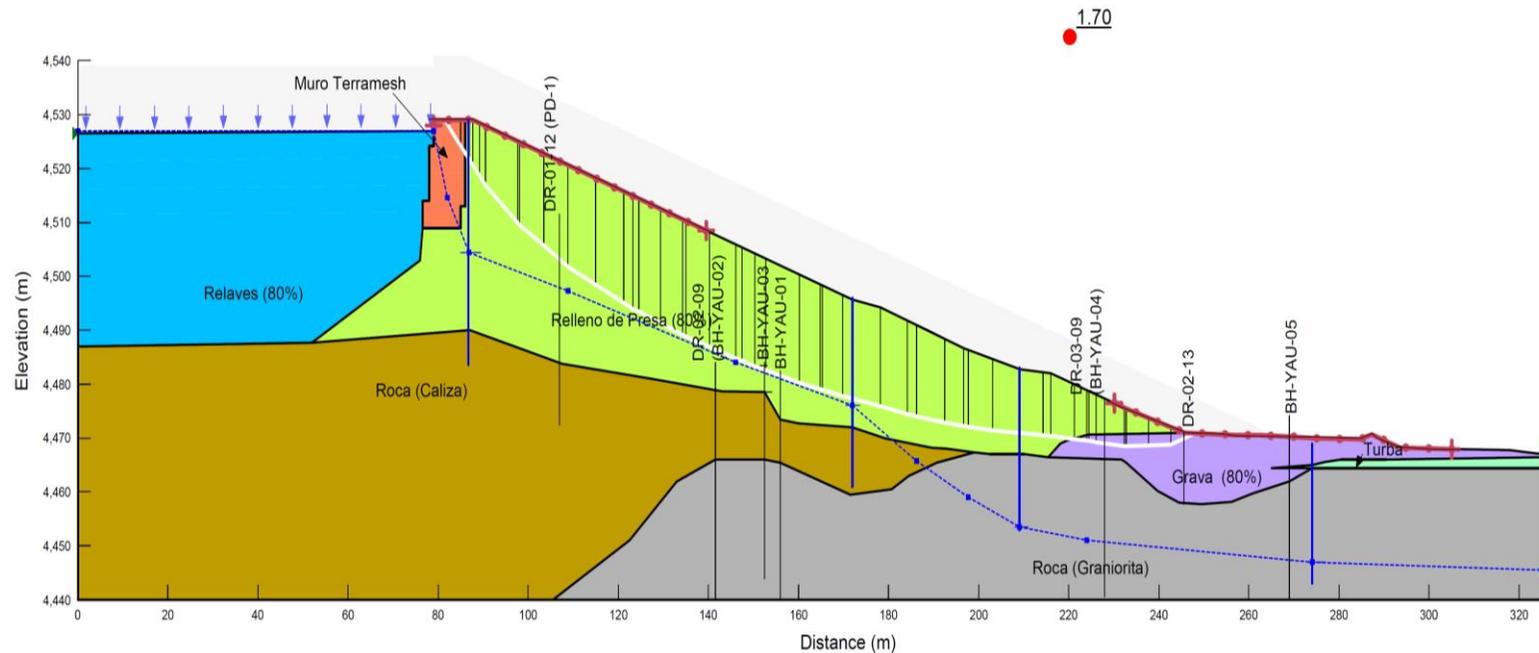
Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi°: 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi°: 43°

Figura 19. Análisis Pseudoestático - Operaciones

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Post Sismo– Operaciones



Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Roca (Granodiorita)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Roca (Caliza)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 23 kN/m³
 Cohesión: 100 kPa
 Phi': 25°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 26.4°

Name: Relleno de Presa(80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 23.04°

Name: Grava (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 34.4°

Figura 20. Análisis Post Sismo – Operaciones

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry and Exit

Análisis Estático – Operaciones

Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 43°

Name: Roca (Caliza) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Name: Roca (Granodiorita) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

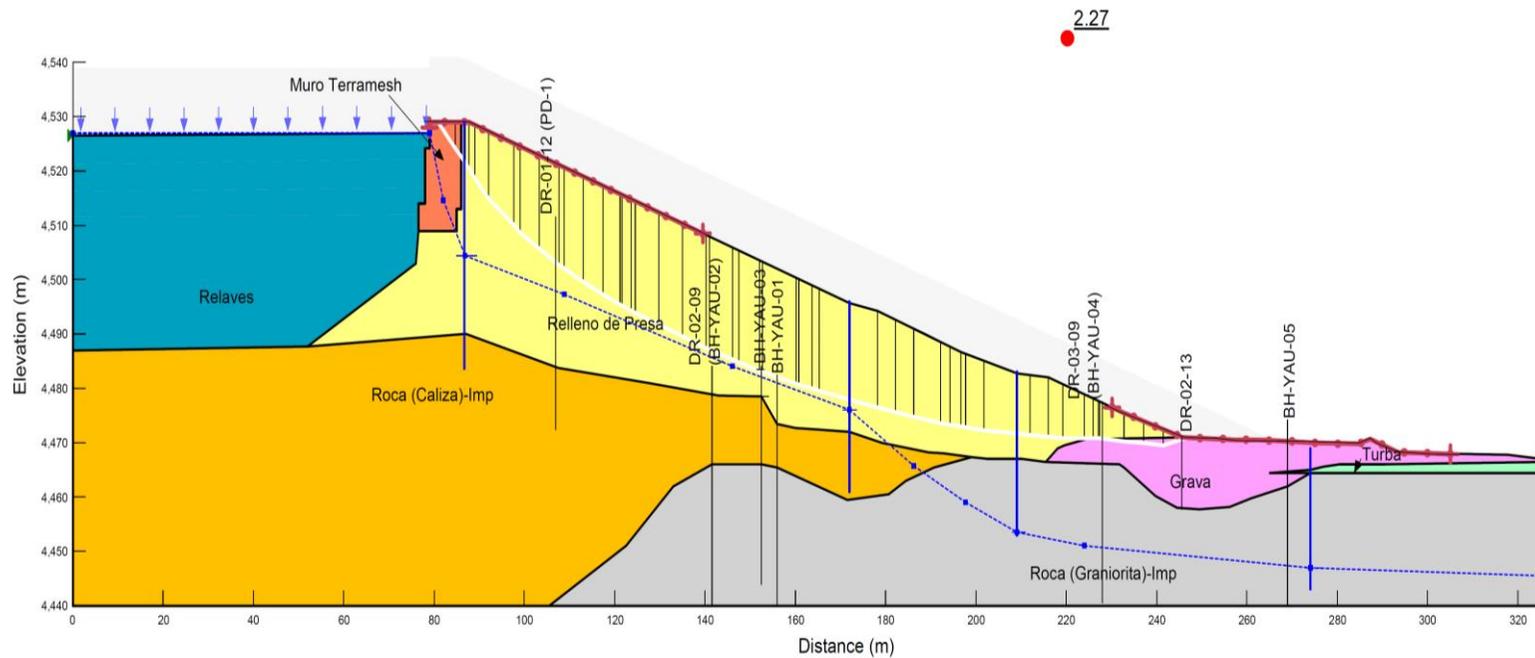


Figura 21. Análisis Estático - Operaciones

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Pseudoestático– Operaciones
 Horz Seismic Coef.: 0.2

Name: Relleno de Presa
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 28.8°

Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 33°

Name: Grava
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 43°

Name: Roca (Caliza) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Name: Roca (Granodiorita) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

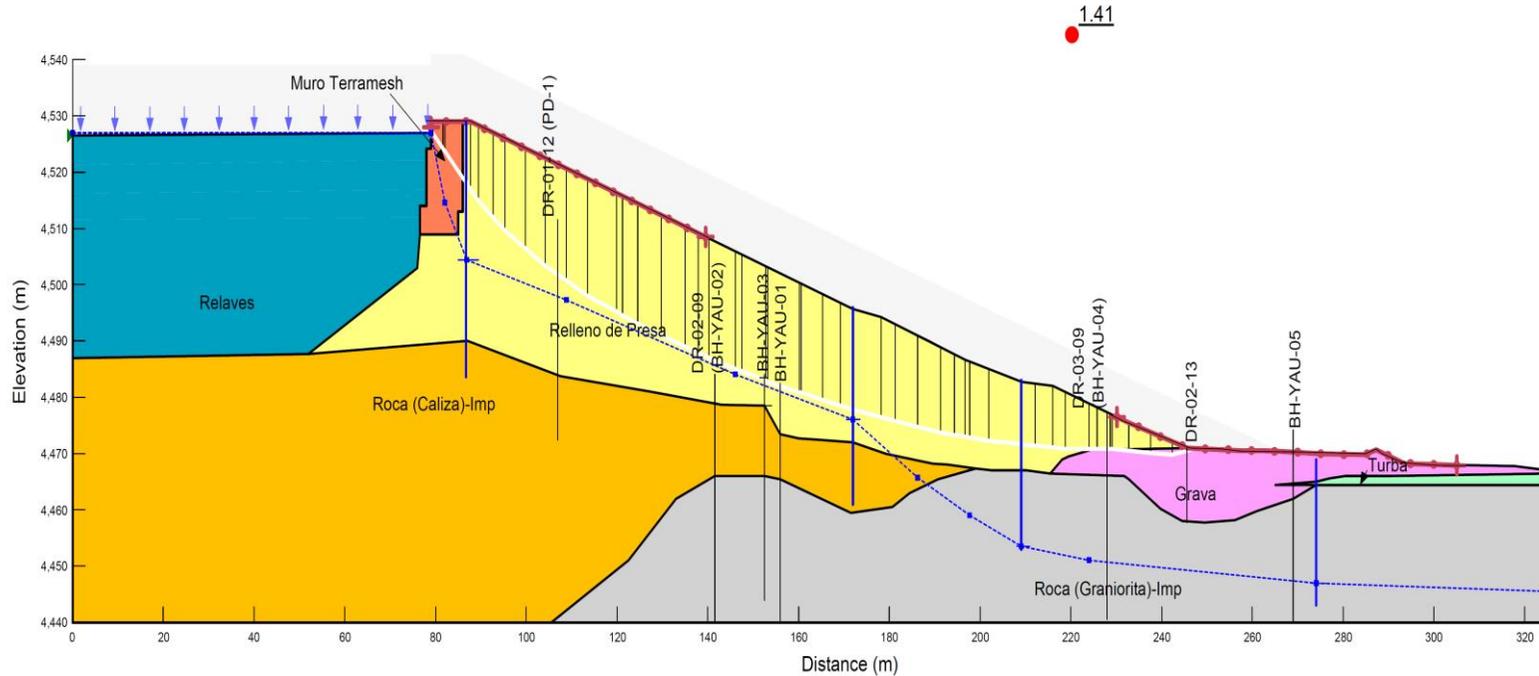
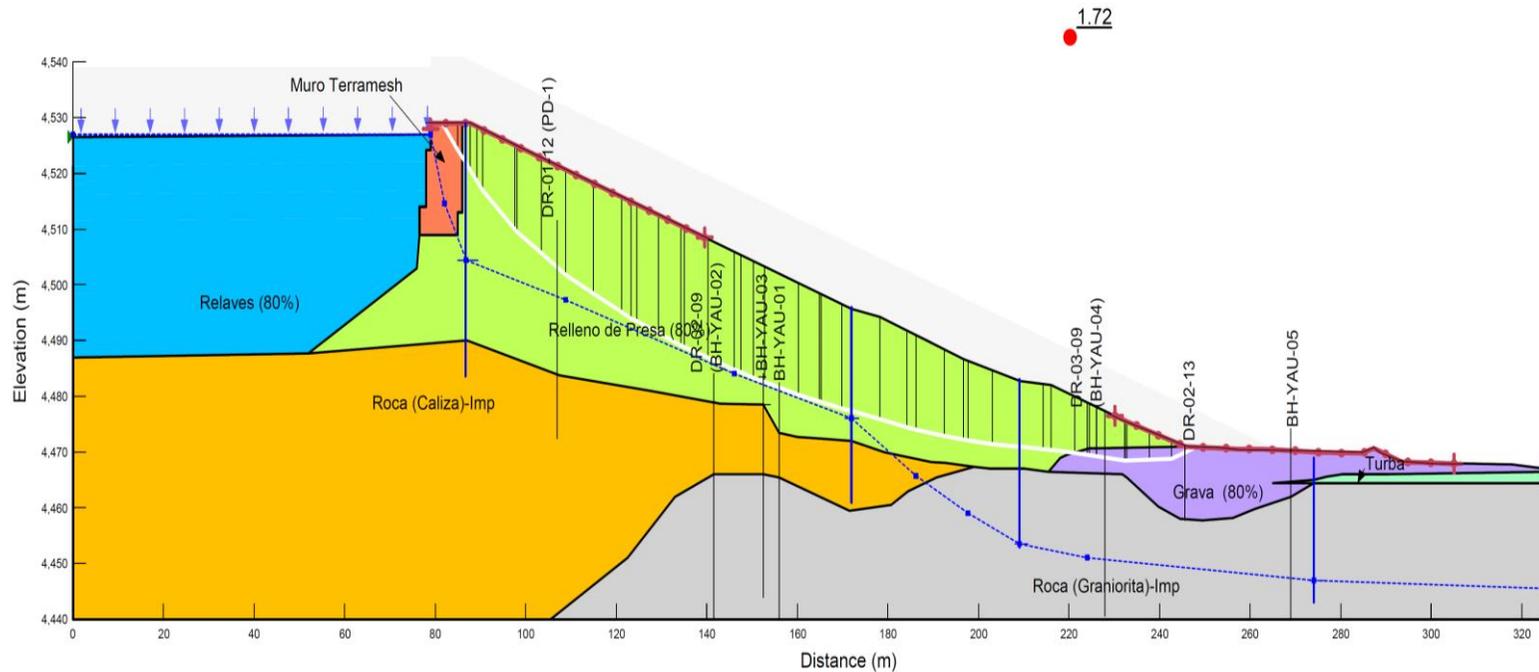


Figura 22. Análisis Pseudoestático – Operaciones

Kind: SLOPE/W
 Method: Morgenstern – Price
 Slip Surface Option: Entry ans Exit

Análisis Post Sismo– Operaciones



Name: Muro Terramesh
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 17.5 kN/m³
 Cohesión: 17.5 kPa
 Phi': 40°

Name: Turba
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 37°

Name: Relaves (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 19.3 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 26.4°

Name: Relleno de Presa (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 21.6 kN/m³
 Cohesión: 53 kPa
 Phi': 23.04°

Name: Grava (80%)
 Model: Mohr – Coulomb
 Unit Weight: 16.7 kN/m³
 Cohesión: 0 kPa
 Phi': 34.4°

Name: Roca (Caliza) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Name: Roca (Granodiorita) – Imp
 Model: Bedrock (Imenetrable)

Figura 23. Análisis Post Sismo – Operaciones

De acuerdo al análisis de estabilidad de la presa de relaves se verifica que cumple los factores de seguridad mínimos requeridos por la normativa del Ministerio de Energía y Minas.

3.8. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO

De acuerdo con las características antes descritas, se realizó la inspección directa de las condiciones actuales de la presa de relaves, para la identificación de problemas que pudieran estar afectando a la estabilidad de la presa de relaves; generalmente esta inspección es a nivel superficial y consiste en observaciones de condiciones tales como:

- Borde libre de la presa de relaves
- Filtración en el talud del dique de la presa de relaves.
- Subsistencia o deformación en la parte superior del dique.
- Aparición de grietas a lo largo de la cresta de la presa, aguas abajo del talud.



Foto 1. Inspección de la presa de relaves – U.M. Yauricocha



Foto 2. Dique de contención de la presa de relaves – U.M. Yauricocha



Foto 3. Talud de la presa de relaves, ángulo 45°– U.M. Yauricocha

Superficialmente no se observó problemas de subsidencia ni se detectó grietas ni filtraciones de agua. Sin embargo, por la misma operación y comportamiento de las rocas y suelos en efectos del tiempo se requiere contar con un sistema de auscultación o monitoreo continuo para el análisis de estabilidad, el mismo que considera:

3.8.1. Objetivos de la implementación del sistema de monitoreo:

- a) Monitorear la estabilidad de la presa de relaves de manera continua.
- b) Predecir algún riesgo asociado al fallamiento y/o rotura de la presa de relaves.
- c) Detectar oportunamente problemas o deficiencias en el comportamiento de la estructura interna del dique de la presa de relaves.
- d) Contar con un plan de contingencia.
- e) Emitir oportunamente los informes referidos al monitoreo de la presa de relaves.

3.8.2. Variables para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves:

Tabla 15. Variables para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves

Variables que influyen en la estabilidad de la presa de relaves	Unidad de medida
1. Movimientos superficiales	
1.1. Desplazamientos	cm
1.2. Velocidad de desplazamiento	cm/día
1.3. Aceleración de desplazamiento	cm/día ²
1.4. Vector de desplazamiento	Puntos cardinales
2. Movimientos en el interior de la estructura del dique	
2.1. Desplazamientos	mm
2.2. Velocidad de desplazamiento	mm/día
2.3. Aceleración de desplazamiento	mm/día ²
3. Nivel freático	
3.1. Nivel freático	m

3.8.3. Valores y estándares de criticidad para monitorear la presa de relaves:

De acuerdo con el monitoreo que se maneja en Sociedad Minera Corona para el análisis de movimientos superficiales, se tiene la siguiente tabla de estándar de criticidad:

Tabla 16. Estándar de criticidad para movimientos superficiales – TM 50

RESPUESTA	CRITERIO (cm/día)		CONDICIÓN	ACCIÓN
	De	A		
Nivel 1	0	≤ 1.0	Tolerable	- Informe a Gerencia de Operaciones, continuar con el monitoreo normal de 24 lecturas al día.
Nivel 2	> 1.0	≤ 2.0	Crítico	- Hacer seguimiento, aumentar frecuencia de monitoreo de 24 lecturas a 48 lecturas al día
Nivel 3	≥ 2.0		Muy crítico	- Paralización inmediata, reunión inmediata con los involucrados, para decidir acciones correctivas a tomar.

Fuente: Modificado de SRK, 2016

Tabla 17. Estándar de criticidad para movimientos internos

RESPUESTA	CRITERIO (mm/día)		CONDICIÓN	ACCIÓN
	De	A		
Nivel 1	0	≤ 0.5	Tolerable	- Continuar con el monitoreo semanal y/o mensual
Nivel 2	> 0.5	≤ 1.5	Crítico	- Hacer seguimiento, aumentar frecuencia de monitoreo de semanal a diario
Nivel 3	≥ 1.5		Muy crítico	- Paralización inmediata, reunión inmediata con los involucrados, para decidir acciones correctivas a tomar.

Fuente: Modificado de SRK, 2016

3.8.4. Selección de equipos para monitoreo

3.8.4.1. Para analizar el comportamiento interno del dique de la presa de relaves

De acuerdo con el análisis en el mercado, se ha evaluado que los equipos más idóneos son los inclinómetros y es recomendado por la norma ASTM D6230-13 (2013): “Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinometers”, para la instrumentación del terreno mediante inclinómetros. Dentro de la variedad de los equipos, se ha optado por el portátil, ya que, por la versatilidad del equipo y ventajas económicas, también se usaría en el monitoreo de estabilidad de otras infraestructuras de Unidad Minera Yauricocha, como son Pique Central y Pique Mascota.

3.8.4.2. Para analizar movimientos superficiales en la presa de relaves

Evaluando la diversidad de equipos e instrumentos para monitorear la magnitud y velocidad de desplazamientos laterales y verticales en superficie, y considerando la precisión, calidad de técnicas de medición y automatización con la que deben contar dichos equipos para el monitoreo de la estructura del dique de la presa de relaves y haciendo hincapié en que Unidad Minera Yauricocha cuenta con un equipo robotizado Leica TM50 para el monitoreo de subsidencia originado por su método de explotación (Sublevel Caving), se ha optado por la implementación de prismas GPR 112, los cuales serán monitoreados de manera diaria por dicho equipo robotizado.

Tabla 18. Prisma de monitoreo de desplazamientos superficiales

N°	Producto	Descripción
01		PRISMA DE MONITOREO: GPR112 Prisa para monitoreo y minería con rosca M8 en la parte posterior para el montaje directo y adaptador de 5/8”.
02		SOPORTE DE PRISMA: GHT112 Juego de montaje para prisma de monitoreo, con los adaptadores internos con rosca de M8 y adaptador de 5/8”.
03		CUBIERTA DE PRISMA: DZ112 La cubierta protege la parte frontal del prisma contra las gotas de lluvia, nieve y polvo.

Fuente: Geopower, 2018

3.8.4.3. Para analizar el comportamiento del agua

Considerando que la presa de relaves, antes de su recrecimiento en la cuarta etapa, contaba con 5 piezómetros distribuidos estratégicamente en la estructura del dique, como se detalla en la tabla 19 y que a la fecha se mantienen operativos, se evaluó el estado de los mismos y después de haberse ejecutado la inspección de observación directa, se ha decidido instalar 3 piezómetros más tipo Casagrande, los mismos que fueron ubicados tácticamente.

Tabla 19. Resumen de piezómetros de tubo abierto, antes de la cuarta etapa del recrecimiento de la presa de relaves

Piezómetro	Ubicación	Prof. Actual (m)	Estado	Fecha de instalación
DR-01-13	Pie de la presa	30.4	Operativo	Octubre 2013
DR-02-13	Pie de la presa	30.3	Operativo	Octubre 2013
DR-01-09	Cresta de la presa	47.8	Operativo	2009
DR-02-09	Talud de la presa	520	Operativo	2009
DR-03-09	Talud de la presa	30.0	Operativo	2009

3.8.5. Instalación de los instrumentos de medición

De acuerdo con la selección de los instrumentos geotécnicos más idóneos y accesibles para el control de la estabilidad de presa de relaves, se procedió a realizar los trabajos para instalar tres piezómetros tipo Casagrande, un inclinómetro y 5 prismas GPR112 con base de concreto.

3.8.5.1. Piezómetros

En el año 2016 se ejecutó la cuarta etapa de recrecimiento de la presa de relaves, manteniendo 5 piezómetros tipo Casagrande, por lo que luego de la inspección en junio del 2018, se decidió instalar 2 piezómetros BH-02-18 y BH-03-18 ubicados en la banqueta intermedia de la presa y un piezómetro BH-04-18 ubicado cerca al pie de la presa de relaves, como se observa en el Anexo N° 3. El objetivo de los piezómetros es de monitorear los niveles de agua que se percolan en el cuerpo y al pie de la presa.

Tabla 20. Resumen de piezómetros instalados después de la cuarta etapa de recrecimiento de la presa de relaves

Piezómetro	Ubicación	Prof. Actual (m)	Coordenadas (WGS 84)	Fecha de instalación
BH-02-18	Banqueta intermedia de la Presa	36.5	Norte: 8638923.5636	Julio 2018
			Este: 423353.1153	
			Cota: 4496.3027	
BH-03-18	Banqueta intermedia de la Presa	30.0	Norte: 8638962.8326	Julio 2018
			Este: 423351.8010	
			Cota: 4483.7307	
BH-04-18	Pie de la Presa	26.1	Norte: 8639006.9736	Julio 2018
			Este: 423386.9196	
			Cota: 4470.8376	

- **Instalación**

Los piezómetros se instalaron usando tubos de PVC de 40 mm de diámetro, se puso un filtro con tubo ranurado en la parte inferior de la cavidad con una longitud de 5 m y rodeado de gravilla y arena. Cada uno de los piezómetros fue sellado por bentonita granulada en la parte superior y concreto en el cuello, además se instaló un protector metálico con llave una vez completada la instalación.

Tabla 21. Resumen de Instalación de los Piezómetros

Piezómetro	Litología predominante	Prof. del Piezómetro	Altura de tubo sobresaliente (m)	Materiales Utilizados
BH-02-18	Caliza/ Granodiorita	36.5	1	2 tubos ranurados, 13 tuberías de PVC, gravilla, arena, bentonita, concreto, tubo protector sólido.
BH-03-18	Caliza/ Granodiorita	30	1	2 tubos ranurados, 11 tuberías de PVC, gravilla, arena, bentonita, concreto, tubo protector sólido.
BH-04-18	Caliza/ Granodiorita	26.1	1	2 tubos ranurados, 9 tuberías de PVC, gravilla, arena, bentonita, concreto, tubo protector sólido.



Foto 4. Máquina perforadora realizando el taladro BH-04-18



Foto 5. Piezómetro BH-02-18



Foto 6. Piezómetro BH-03-18

Para realizar las mediciones, Sociedad Minera Corona adquirió una sonda eléctrica de 250 m, la misma que se muestra en la foto 7.



Foto 7. Sonda eléctrica adquirida por SMCSA

3.8.5.2. Inclinómetro

Se instaló un inclinómetro en la cresta de la presa de relaves con la finalidad de poder determinar posibles movimientos horizontales, como se puede ver en el Anexo 1. Las tuberías sólidas del inclinómetro fueron de 70 mm de diámetro, se utilizó bentonita como relleno de las paredes y concreto como sellante de superficie, además de una tubería sólida protectora en la parte superior.

Tabla 22. Resumen del inclinómetro instalado en la cresta de la presa de relaves

Inclinómetro	Ubicación	Prof. Actual (m)	Coordenadas (WGS 84)	Fecha de instalación
INC-03	Cresta de la Presa	45.5	Norte: 8638837.9736	Julio 2018
			Este: 423345.4172	
			Cota: 4529.6809	

Tabla 23. Resumen de Instalación del Inclinómetro

Inclinómetro	Litología predominante	Prof. del Inclinómetro	Altura de tubo sobresaliente (m)	Materiales Utilizados
INC-03 (BH-01-18)	Caliza	45.5	1	16 tuberías sólidas de inclinómetro, bentonita, lechada de cemento, tubería protectora.



Foto 8. Inclinómetro INC-03 instalado.



Foto 9. Equipo inclinométrico – adquirido de Geokon

Básicamente la metodología para la obtención de resultados inclinométricos es la siguiente:

- Instalación de la tubería inclinométrica.
- Realización de la primera lectura, considerada medida origen o Línea Base. Esta lectura sirve de referencia a las posteriores para conocer los desplazamientos existentes y para obtener el perfil de la tubería instalada.
- Medidas posteriores de seguimiento.

La obtención de cada medida realizada en un sondeo supone descender la sonda inclinométrica por el interior de la tubería inclinométrica hasta el fondo del sondeo y registrar cada 0,5 m las medidas durante el ascenso. Una vez fuera, se le aplica a la sonda un giro de 180° y se repite la operación para compensar los errores que se puedan cometer en cada uno de los puntos de medida.

La inclinación de la sonda en el interior de la tubería es medida por medio de dos acelerómetros estado sólido tipo MEMS (Sistemas Microelectromecánicos). Uno de los acelerómetros mide la inclinación en el plano de las ruedas del inclinómetro que recorren dos de las cuatro acanaladuras longitudinales de la tubería inclinométrica. El otro acelerómetro mide la inclinación en el plano perpendicular al de las ruedas.

Todas las medidas se almacenan digitalmente en la unidad de adquisición de datos. Posteriormente, son transferidas a un ordenador mediante un puerto USB para su posterior procesamiento y análisis.

Las medidas de inclinación son convertidas a desplazamientos laterales. Los cambios en los desplazamientos laterales, determinados por la comparación de los datos actuales con los del control inicial, indican los movimientos del terreno. La representación gráfica de los cambios acumulados en cada intervalo de medida ofrece un perfil de alta resolución del desplazamiento. Los perfiles de desplazamiento permiten determinar la magnitud, profundidad, dirección y velocidad del movimiento del terreno.

Mediante programas comerciales como el Gtilt® Plus Inclinometer Software de Mitre Software Corporation se realiza el procesado y la visualización de las medidas inclinométricas.



Foto 10. Instalación del equipo inclinométrico para dar inicio a las lecturas

El equipo de medida consta básicamente de los siguientes elementos:

- Tubería doblemente acanalada según dos direcciones perpendiculares entre sí, a través de las cuales se guía la sonda inclinométrica durante su descenso.
- Sonda inclinométrica biaxial, esto es, capaz de medir simultáneamente según dos direcciones perpendiculares entre sí.
- Unidad de lectura, apta para sonda biaxial, la cual registra valores cada 0,5 m.

La tubería inclinométrica instalada en el sondeo inclinométricos es el modelo 6400 Glue-Snap del fabricante Geokon, Inc. (USA). Se trata de tubería de ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) con cuatro acanaladuras para guía de la sonda.

Los tubos se acoplan entre sí por medio de unas pestañas de unión y sellado empleando cemento-cola para garantizar su estanqueidad.

La tapa de fondo utilizada es el modelo 6400-2G (Grout adapter) que, junto con la válvula modelo 6400-2G-1 (Female grout) permite la inyección del sondeo con lechada de cemento (grout) mediante una tubería tremie que se introduce por el interior de la tubería inclinométrica.



Figura 24. A la derecha se observa la tubería inclinométrica de ABS y tapa de fondo Grout Adapter (Geokon, 2018)

Transcurrido un tiempo entre 48 y 72 horas desde su instalación se efectúa la medida inicial o Línea Base del inclinómetro, que servirá de referencia para medir con posterioridad los movimientos de la tubería inclinométrica.

3.8.5.3. Prismas de monitoreo

En toda la estructura del dique de contención de la presa de relaves se instalaron 5 prismas de monitoreo ubicados estratégicamente, tal como se observa en el Anexo 1, dicha instalación se concretizó mediante un hito de concreto con altura de 1 m, el cual fue construido por el área de Obras Civiles de Sociedad Minera Corona, sobre dicho hito se ha fijado el soporte de prisma GHT112 que contiene al prisma de monitoreo GPR112, el propósito de dicha implementación es monitorear los posibles desplazamientos verticales a nivel superficial.

Los cinco prismas serán monitoreados mediante el Equipo Robot Leica TM50, el cual ya se encuentra instalado desde el 2015 y es usado para monitoreo de subsidencia superficial por efecto del método de explotación; por lo que el trabajo consistió básicamente en programar los nuevos prismas de monitoreo tanto en el equipo robot como en el Geomos Monitor, esto se realizó con apoyo del personal del departamento de Topografía; quienes

son los únicos autorizados para el manejo del Equipo Robot. Una vez instalado y programado los nuevos puntos, el computador con el software Geomos Monitor está conectado mediante red de internet wifi al computador del departamento de Geomecánica, el mismo que contiene al software Geomos Analyzer, en el cual se van registrando a cada hora las lecturas de las coordenadas levantadas por el equipo; dichas lecturas son descargadas y mediante el Excel, se procesan para el cálculo de desplazamiento, velocidad, aceleración tanto del movimiento relativo como acumulado; asimismo el Geomos Analyzer registra los vectores de desplazamientos, que exportados al software Autocad se determina el ángulo y dirección de desplazamiento.

Tabla 24. Resumen de los prismas GRP112 instalados en la presa de relaves

Prisma de monitoreo	Ubicación	Coordenadas (WGS 84)	Fecha de instalación	Ángulo de instalación con respecto a la horizontal
PR-01	Cresta de la presa, estribo izquierdo, aguas arriba.	Norte: 8638840.8532	Agosto 2018	65°
		Este: 423247.7996		
		Cota: 4530.8910		
PR-02	Cresta de la presa, sector central izquierdo, aguas arriba.	Norte: 8638833.8240	Agosto 2018	59°
		Este: 423300.3014		
		Cota: 4530.6809		
PR-03	Cresta de la presa, sector central, aguas arriba.	Norte: 8638826.7930	Agosto 2018	61°
		Este: 423353.5430		
		Cota: 4531.0513		
PR-04	Cresta de la presa, sector central derecho, aguas arriba.	Norte: 8638819.6430	Agosto 2018	57°
		Este: 423411.4029		
		Cota: 4530.9676		
PR-05	Cresta de la presa, estribo derecho, aguas arriba.	Norte: 8638812.4749	Agosto 2018	59°
		Este: 423469.4222		
		Cota: 4531.1639		



Foto 11. Prismas de monitoreo instalados para registrar movimientos superficiales en la presa de relaves

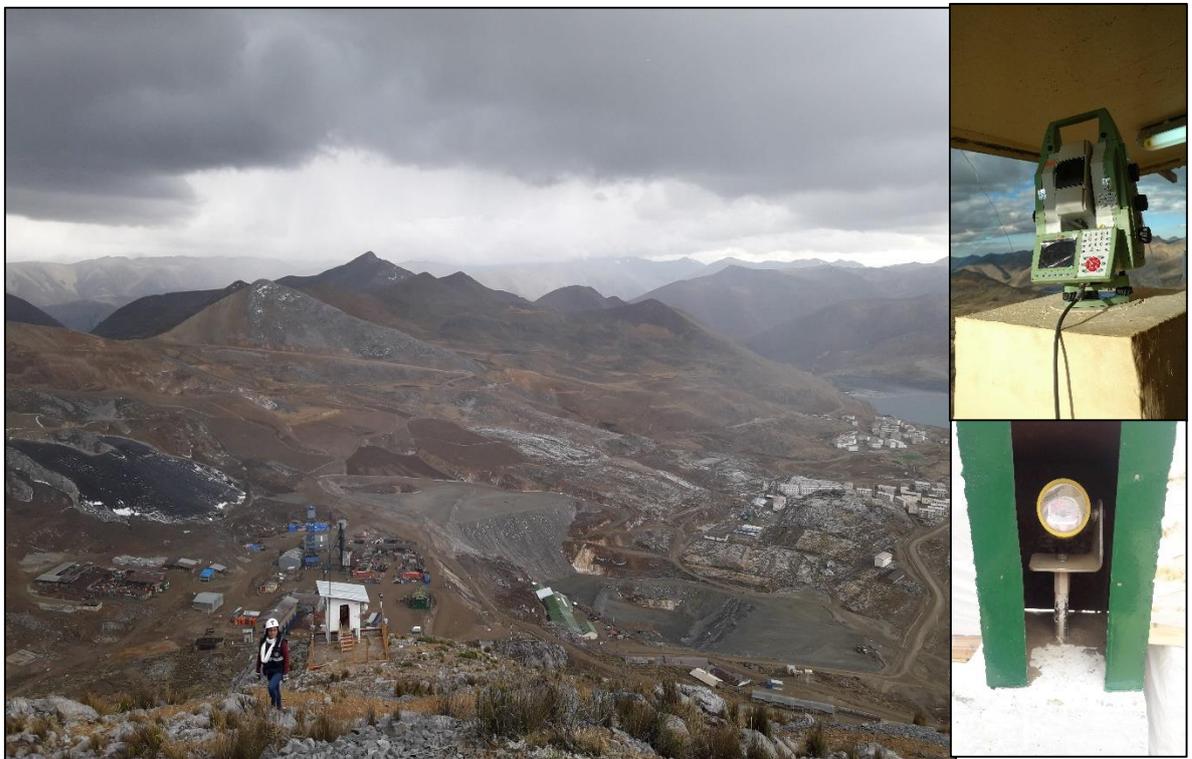


Foto 12. Vista desde la caseta de monitoreo Leica, al lado derecho superior se observa el Equipo Robot Leica TM50 y en la parte inferior derecha el prisma de monitoreo GPR112

3.9. EJECUCIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO

Una vez implementado e instalado la nueva instrumentación geotécnica: 3 piezómetros tipo Casagrande, 1 inclinómetro y 5 prismas de monitoreo para el monitoreo y control de estabilidad de la presa de relaves, se consideró:

Tabla 25. Frecuencia de monitoreo de estabilidad de la presa de relaves

Parámetro monitoreado	Instrumento utilizado	Frecuencia de monitoreo
Movimientos verticales superficiales	Prismas de monitoreo GPR 112	Diario
Movimientos en el interior de la estructura del dique	Inclinómetro	Quincenal
Nivel freático	Piezómetro	Mensual

3.9.1. Resultados obtenidos a partir de la instrumentación geotécnica

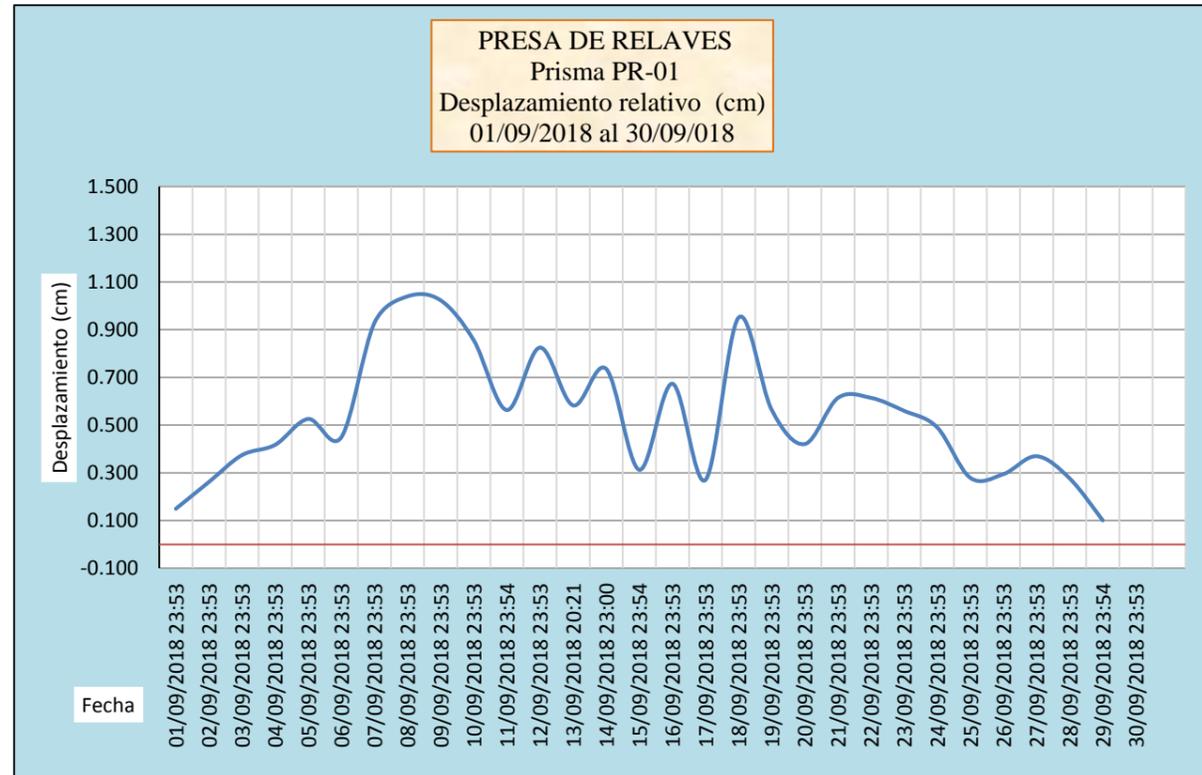
3.9.1.1. Para el monitoreo de movimientos superficiales.

Después de haber implementado los prismas de monitoreo con ayuda del personal del departamento de Obras Civiles y Topografía de la Unidad Minera Yauricocha y haber programado dichos puntos en el Equipo Robot Leica TM50, se realizó el seguimiento diario del comportamiento de dichos puntos a través del análisis e interpretación de las lecturas de coordenadas, tal como se detalla en las siguientes tablas:

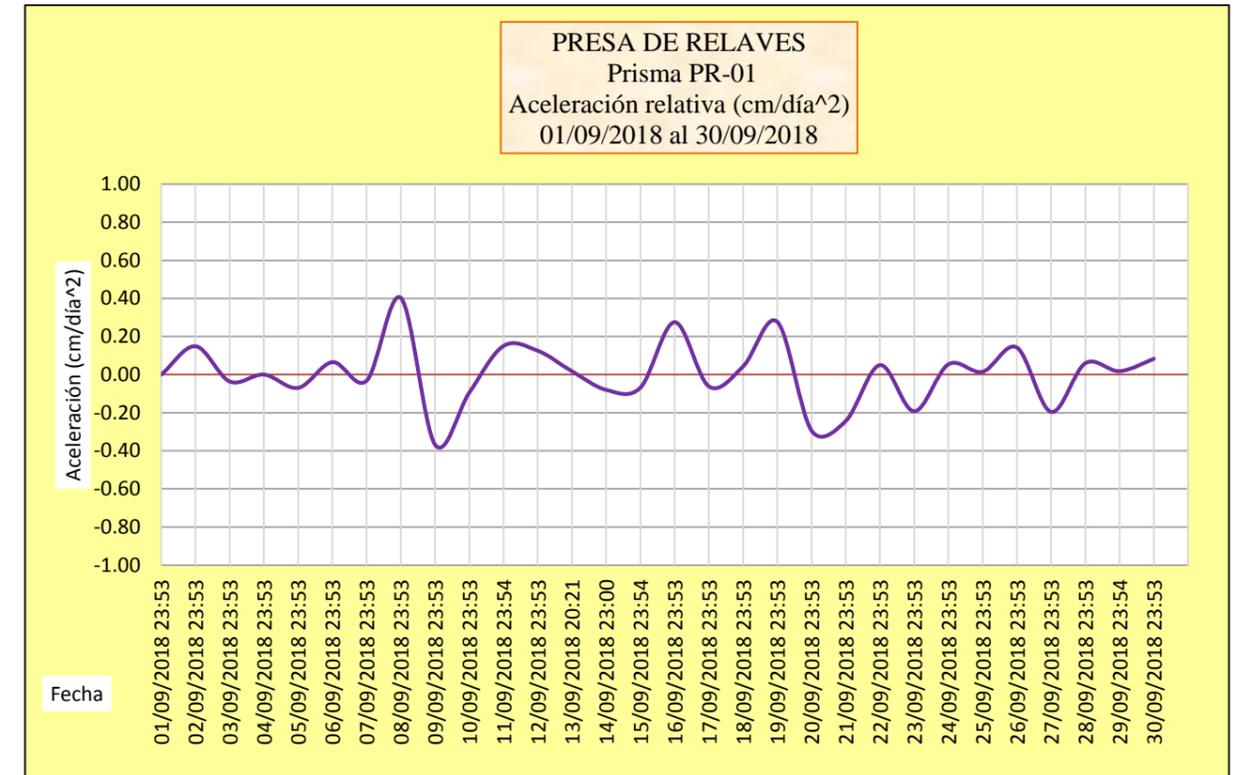
Del punto PR-01:

Tabla 26. Resumen de monitoreo con el punto PR-01

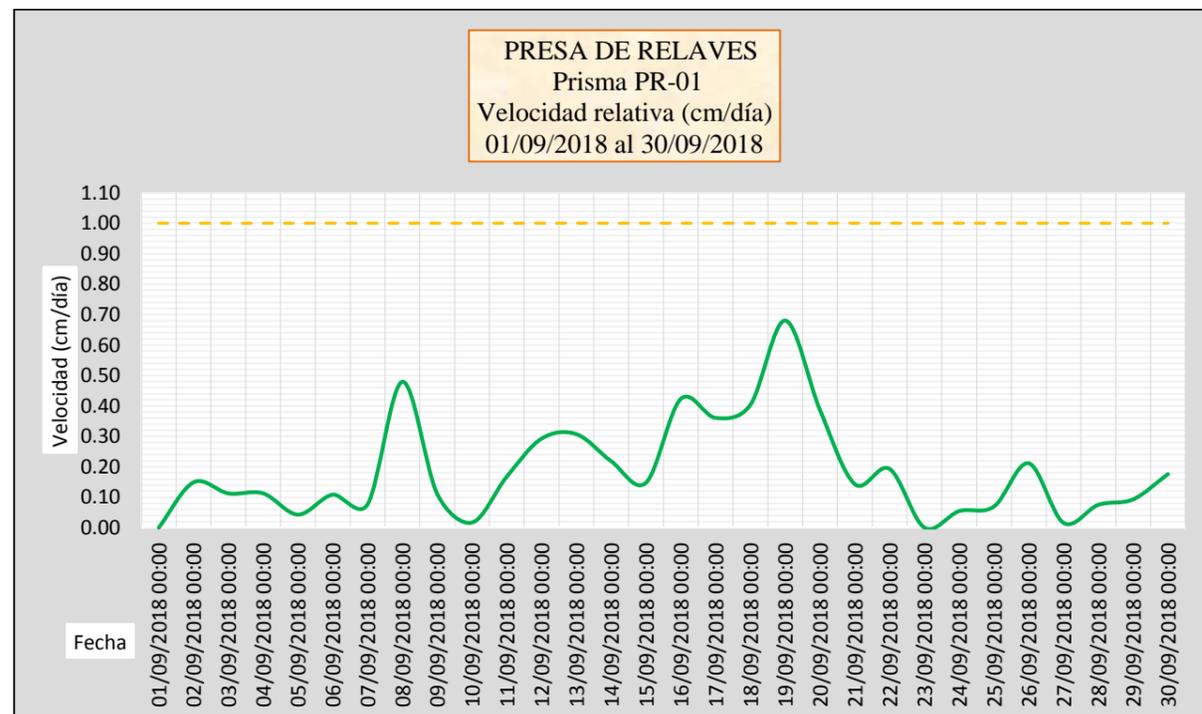
PR-01				ANÁLISIS DE MONITOREO												Nivel de alarma (cm/día)
				RELATIVO						ACUMULADO						
Fechas	NO DATA			N° de días	Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantánea (cm/día)	Aceleración (cm/día^2)	N° de días acumulados	Desplazamientos Acumulados (cm)			Velocidad acumulada (cm/día)	Aceleración acumulada	
	E	N	C		Dxy	Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)				Dxy	Dz	Dxyz			
01/09/2018 23:53	423247.800	8638840.000	4530.891	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0000	0.00
02/09/2018 23:53	423247.800	8638840.001	4530.892	1.000	0.110	-0.100	0.149	0.15	0.15	1.000	0.1	0.1	0.15	0.15	0.1490	0.15
03/09/2018 23:53	423247.797	8638840.003	4530.892	1.000	0.261	-0.020	0.262	0.11	-0.04	2.000	0.3	0.1	0.36	0.18	0.0901	0.11
04/09/2018 23:53	423247.795	8638840.004	4530.890	1.000	0.279	0.250	0.374	0.11	0.00	3.000	0.6	-0.1	0.62	0.21	0.0684	0.11
05/09/2018 23:53	423247.793	8638840.006	4530.893	1.000	0.300	-0.290	0.417	0.04	-0.07	4.000	0.9	0.2	0.91	0.23	0.0567	0.04
06/09/2018 23:53	423247.796	8638840.003	4530.890	1.000	0.432	0.300	0.526	0.11	0.07	5.000	0.5	-0.1	0.48	0.10	0.0193	0.11
07/09/2018 23:53	423247.797	8638840.004	4530.894	1.000	0.184	-0.410	0.449	0.08	-0.03	6.000	0.5	0.3	0.55	0.09	0.0154	0.08
08/09/2018 23:53	423247.804	8638839.999	4530.889	1.000	0.823	0.430	0.929	0.48	0.40	7.000	0.4	-0.2	0.45	0.06	0.0092	0.48
09/09/2018 23:53	423247.795	8638840.002	4530.884	1.000	0.889	0.540	1.040	0.11	-0.37	8.000	0.5	-0.7	0.84	0.11	0.0132	0.11
10/09/2018 23:53	423247.802	8638840.002	4530.892	1.000	0.650	-0.790	1.023	0.02	-0.09	9.000	0.3	0.1	0.29	0.03	0.0036	0.02
11/09/2018 23:54	423247.795	8638840.003	4530.887	1.000	0.672	0.530	0.856	0.17	0.15	10.000	0.5	-0.4	0.70	0.07	0.0070	0.17
12/09/2018 23:53	423247.798	8638840.000	4530.883	1.000	0.386	0.410	0.563	0.29	0.13	11.000	0.2	-0.8	0.87	0.08	0.0072	0.29
13/09/2018 20:21	423247.792	8638840.005	4530.885	0.853	0.780	-0.270	0.825	0.31	0.02	11.853	1.0	-0.6	1.12	0.09	0.0080	0.31
14/09/2018 23:00	423247.795	8638840.006	4530.890	1.110	0.370	-0.450	0.583	0.22	-0.08	12.963	0.7	-0.1	0.70	0.05	0.0042	0.22
15/09/2018 23:54	423247.801	8638840.001	4530.887	1.037	0.692	0.250	0.736	0.15	-0.07	14.000	0.2	-0.4	0.42	0.03	0.0022	0.15
16/09/2018 23:53	423247.799	8638840.002	4530.885	1.000	0.240	0.200	0.313	0.42	0.28	15.000	0.2	-0.6	0.62	0.04	0.0028	0.42
17/09/2018 23:53	423247.795	8638840.006	4530.889	1.000	0.542	-0.400	0.674	0.36	-0.06	16.000	0.8	-0.2	0.78	0.05	0.0031	0.36
18/09/2018 23:53	423247.798	8638840.005	4530.889	1.000	0.269	-0.020	0.270	0.40	0.04	17.000	0.5	-0.2	0.55	0.03	0.0019	0.40
19/09/2018 23:53	423247.801	8638840.000	4530.882	1.000	0.571	0.760	0.951	0.68	0.28	18.000	0.1	-0.9	0.93	0.05	0.0029	0.68
20/09/2018 23:53	423247.801	8638840.003	4530.887	1.000	0.261	-0.500	0.564	0.39	-0.29	19.000	0.3	-0.4	0.52	0.03	0.0014	0.39
21/09/2018 23:53	423247.798	8638840.004	4530.884	1.000	0.345	0.240	0.421	0.14	-0.24	20.000	0.4	-0.7	0.79	0.04	0.0020	0.14
22/09/2018 23:53	423247.800	8638840.001	4530.880	1.000	0.383	0.480	0.614	0.19	0.05	21.000	0.1	-1.1	1.14	0.05	0.0026	0.19
23/09/2018 23:53	423247.800	8638840.004	4530.885	1.000	0.293	-0.540	0.614	0.00	-0.19	22.000	0.4	-0.6	0.71	0.03	0.0015	0.00
24/09/2018 23:53	423247.798	8638840.003	4530.880	1.000	0.231	0.510	0.560	0.05	0.05	23.000	0.3	-1.1	1.16	0.05	0.0022	0.05
25/09/2018 23:53	423247.802	8638840.003	4530.883	1.000	0.380	-0.310	0.491	0.07	0.01	24.000	0.4	-0.8	0.88	0.04	0.0015	0.07
26/09/2018 23:53	423247.800	8638840.005	4530.882	1.000	0.264	0.090	0.279	0.21	0.14	25.000	0.5	-0.9	1.02	0.04	0.0016	0.21
27/09/2018 23:53	423247.799	8638840.006	4530.885	1.000	0.156	-0.250	0.294	0.02	-0.20	26.000	0.6	-0.6	0.89	0.03	0.0013	0.02
28/09/2018 23:53	423247.801	8638840.004	4530.882	1.000	0.252	0.270	0.370	0.08	0.06	27.000	0.4	-0.9	1.00	0.04	0.0014	0.08
29/09/2018 23:54	423247.803	8638840.003	4530.882	1.000	0.272	-0.050	0.277	0.09	0.02	28.000	0.5	-0.9	0.98	0.04	0.0013	0.09
30/09/2018 23:53	423247.804	8638840.003	4530.882	1.000	0.061	0.080	0.100	0.18	0.08	29.000	0.5	-0.9	1.07	0.04	0.0013	0.18



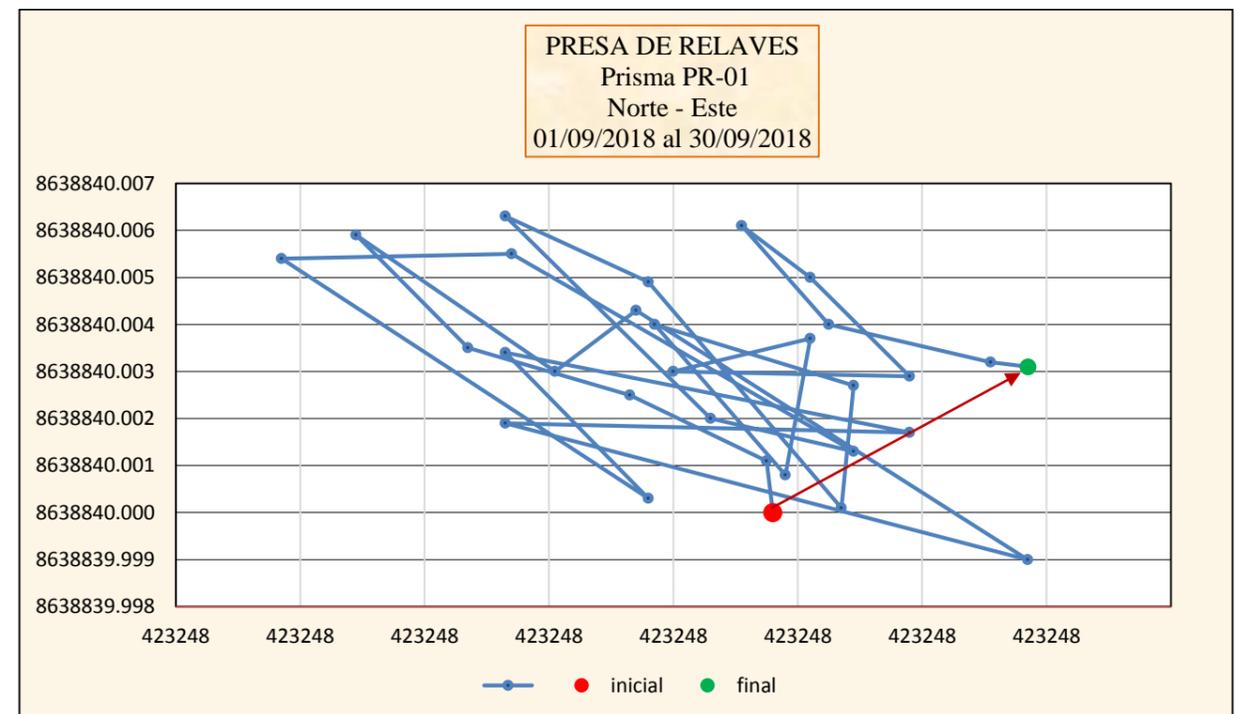
Gráfica 1: Desplazamiento relativo PR-01



Gráfica 3: Aceleración del punto PR-01



Gráfica 2: Velocidad de desplazamiento PR-01

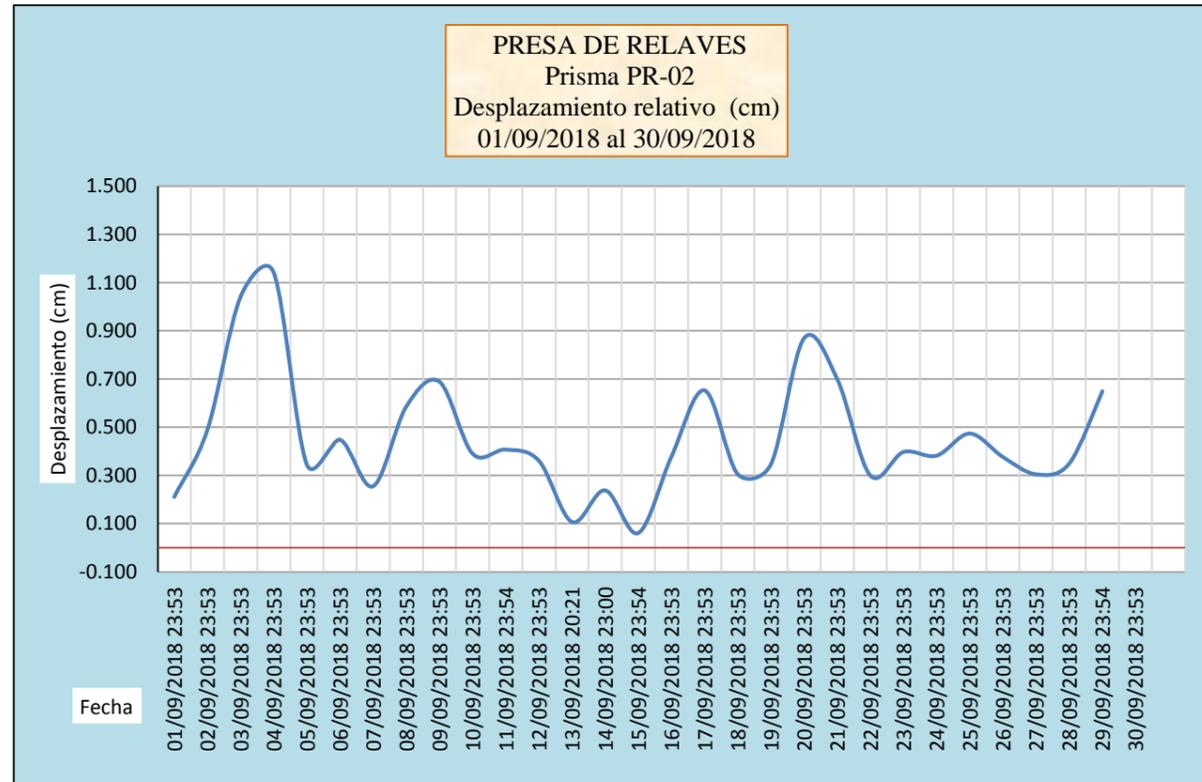


Gráfica 4: Vector de desplazamiento PR-01

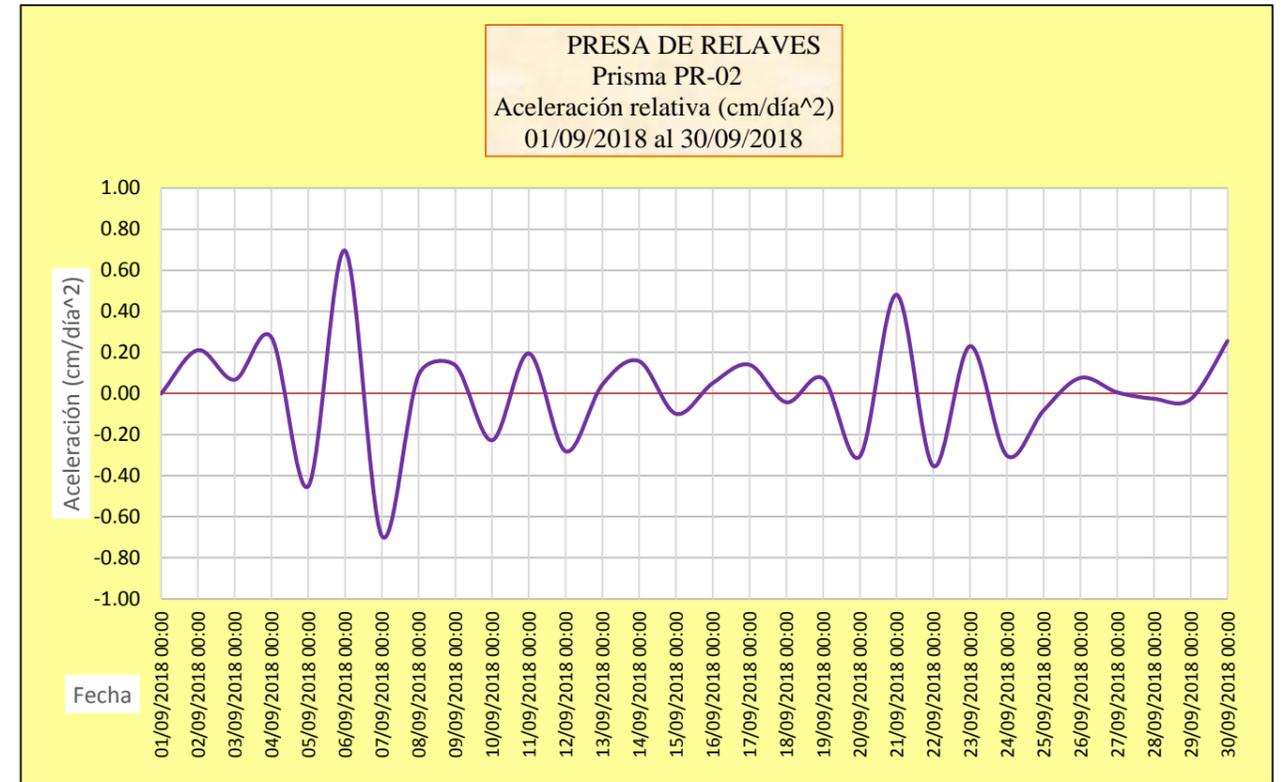
Del punto PR-02:

Tabla 27. Resumen de monitoreo con el punto PR-02

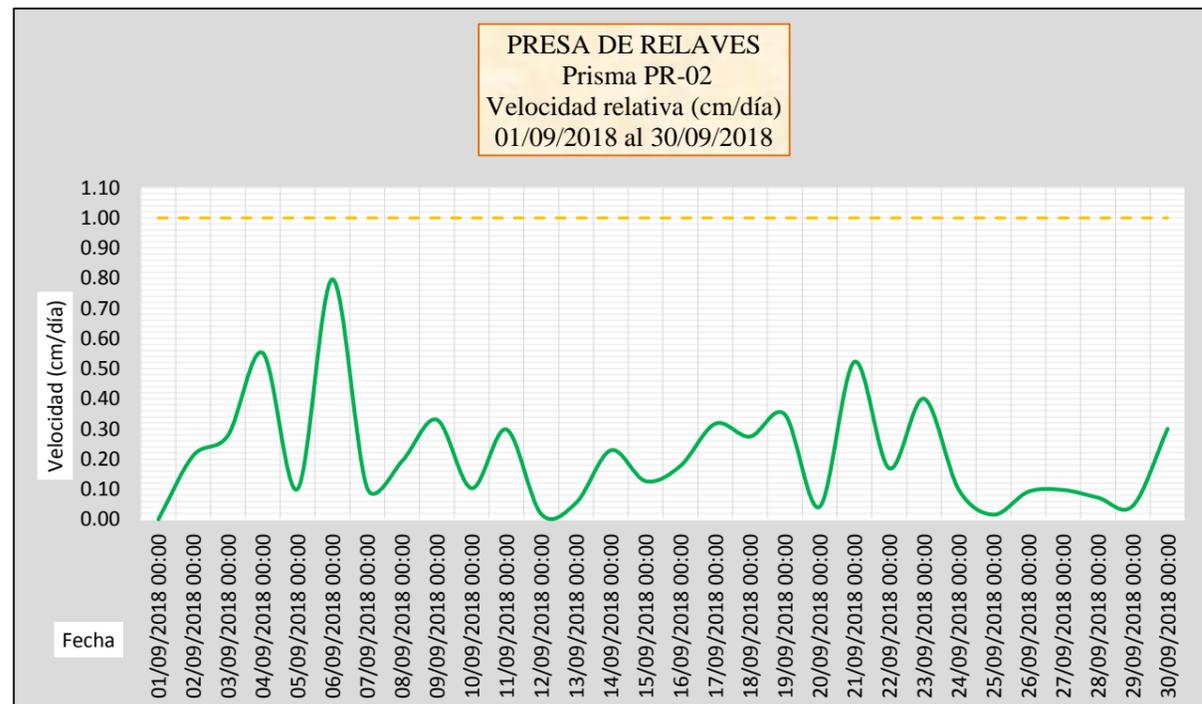
PR-02				ANÁLISIS DE MONITOREO												Nivel de alarma (cm/día)
				RELATIVO						ACUMULADO						
				N° de días	Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantánea (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	N° de días acumulados	Desplazamientos Acumulados (cm)			Velocidad acumulada (cm/día)	Aceleración acumulada	
E	N	C	Dxy		Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)	Dxy				Dz	Dxyz				
01/09/2018 23:53	423300.301	8638833.824	4530.681	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0000	0.00
02/09/2018 23:53	423300.300	8638833.825	4530.680	1.000	0.205	0.050	0.211	0.21	0.21	1.000	0.2	-0.1	0.21	0.21	0.2112	0.21
03/09/2018 23:53	423300.301	8638833.827	4530.685	1.000	0.193	-0.450	0.490	0.28	0.07	2.000	0.3	0.4	0.52	0.26	0.1296	0.28
04/09/2018 23:53	423300.310	8638833.823	4530.688	1.000	0.997	-0.300	1.041	0.55	0.27	3.000	0.8	0.7	1.08	0.36	0.1198	0.55
05/09/2018 23:53	423300.302	8638833.826	4530.680	1.000	0.843	0.770	1.142	0.10	-0.45	4.000	0.2	-0.1	0.20	0.05	0.0128	0.10
06/09/2018 23:53	423300.304	8638833.824	4530.679	1.000	0.336	0.080	0.345	0.80	0.70	5.000	0.3	-0.1	0.34	0.07	0.0134	0.80
07/09/2018 23:53	423300.301	8638833.827	4530.679	1.000	0.447	0.040	0.449	0.10	-0.69	6.000	0.3	-0.2	0.34	0.06	0.0095	0.10
08/09/2018 23:53	423300.303	8638833.825	4530.678	1.000	0.220	0.130	0.256	0.19	0.09	7.000	0.2	-0.3	0.37	0.05	0.0076	0.19
09/09/2018 23:53	423300.300	8638833.830	4530.681	1.000	0.470	-0.350	0.586	0.33	0.14	8.000	0.6	0.0	0.56	0.07	0.0087	0.33
10/09/2018 23:53	423300.304	8638833.825	4530.677	1.000	0.530	0.440	0.689	0.10	-0.23	9.000	0.2	-0.4	0.48	0.05	0.0059	0.10
11/09/2018 23:54	423300.307	8638833.825	4530.679	1.001	0.335	-0.200	0.391	0.30	0.20	10.001	0.5	-0.2	0.58	0.06	0.0058	0.30
12/09/2018 23:53	423300.304	8638833.827	4530.679	0.999	0.403	-0.060	0.408	0.02	-0.28	11.000	0.4	-0.1	0.45	0.04	0.0037	0.02
13/09/2018 20:21	423300.302	8638833.829	4530.677	0.853	0.294	0.210	0.361	0.05	0.04	11.853	0.5	-0.4	0.62	0.05	0.0044	0.05
14/09/2018 23:00	423300.302	8638833.829	4530.678	1.110	0.103	-0.030	0.107	0.23	0.16	12.963	0.5	-0.3	0.57	0.04	0.0034	0.23
15/09/2018 23:54	423300.305	8638833.828	4530.678	1.037	0.228	-0.070	0.239	0.13	-0.10	14.001	0.5	-0.3	0.57	0.04	0.0029	0.13
16/09/2018 23:53	423300.305	8638833.829	4530.678	0.999	0.061	-0.010	0.062	0.18	0.05	15.000	0.6	-0.2	0.61	0.04	0.0027	0.18
17/09/2018 23:53	423300.302	8638833.830	4530.677	1.000	0.328	0.190	0.379	0.32	0.14	16.000	0.6	-0.4	0.77	0.05	0.0030	0.32
18/09/2018 23:53	423300.307	8638833.827	4530.676	1.000	0.652	0.040	0.653	0.27	-0.04	17.000	0.6	-0.5	0.80	0.05	0.0028	0.27
19/09/2018 23:53	423300.305	8638833.828	4530.675	1.000	0.288	0.100	0.305	0.35	0.07	18.000	0.6	-0.6	0.80	0.04	0.0025	0.35
20/09/2018 23:53	423300.302	8638833.831	4530.676	1.000	0.339	-0.070	0.347	0.04	-0.31	19.000	0.7	-0.5	0.86	0.05	0.0024	0.04
21/09/2018 23:53	423300.309	8638833.826	4530.674	1.000	0.848	0.190	0.869	0.52	0.48	20.000	0.8	-0.7	1.05	0.05	0.0026	0.52
22/09/2018 23:53	423300.305	8638833.830	4530.677	1.000	0.637	-0.290	0.700	0.17	-0.35	21.000	0.7	-0.4	0.82	0.04	0.0019	0.17
23/09/2018 23:53	423300.306	8638833.829	4530.674	1.000	0.130	0.270	0.300	0.40	0.23	22.000	0.7	-0.7	0.95	0.04	0.0020	0.40
24/09/2018 23:53	423300.309	8638833.828	4530.672	1.000	0.349	0.190	0.398	0.10	-0.30	23.000	0.9	-0.9	1.23	0.05	0.0023	0.10
25/09/2018 23:53	423300.308	8638833.827	4530.669	1.000	0.193	0.330	0.382	0.02	-0.08	24.000	0.7	-1.2	1.40	0.06	0.0024	0.02
26/09/2018 23:53	423300.309	8638833.828	4530.674	1.000	0.114	-0.460	0.474	0.09	0.08	25.000	0.8	-0.7	1.09	0.04	0.0017	0.09
27/09/2018 23:53	423300.312	8638833.827	4530.675	1.000	0.354	-0.130	0.377	0.10	0.01	26.000	1.1	-0.6	1.26	0.05	0.0019	0.10
28/09/2018 23:53	423300.310	8638833.829	4530.673	1.000	0.239	0.190	0.305	0.07	-0.03	27.000	1.0	-0.8	1.26	0.05	0.0017	0.07
29/09/2018 23:54	423300.311	8638833.830	4530.676	1.001	0.161	-0.310	0.349	0.04	-0.03	28.001	1.1	-0.5	1.21	0.04	0.0015	0.04
30/09/2018 23:53	423300.305	8638833.833	4530.675	0.999	0.638	0.120	0.649	0.30	0.26	29.000	1.0	-0.6	1.18	0.04	0.0014	0.30



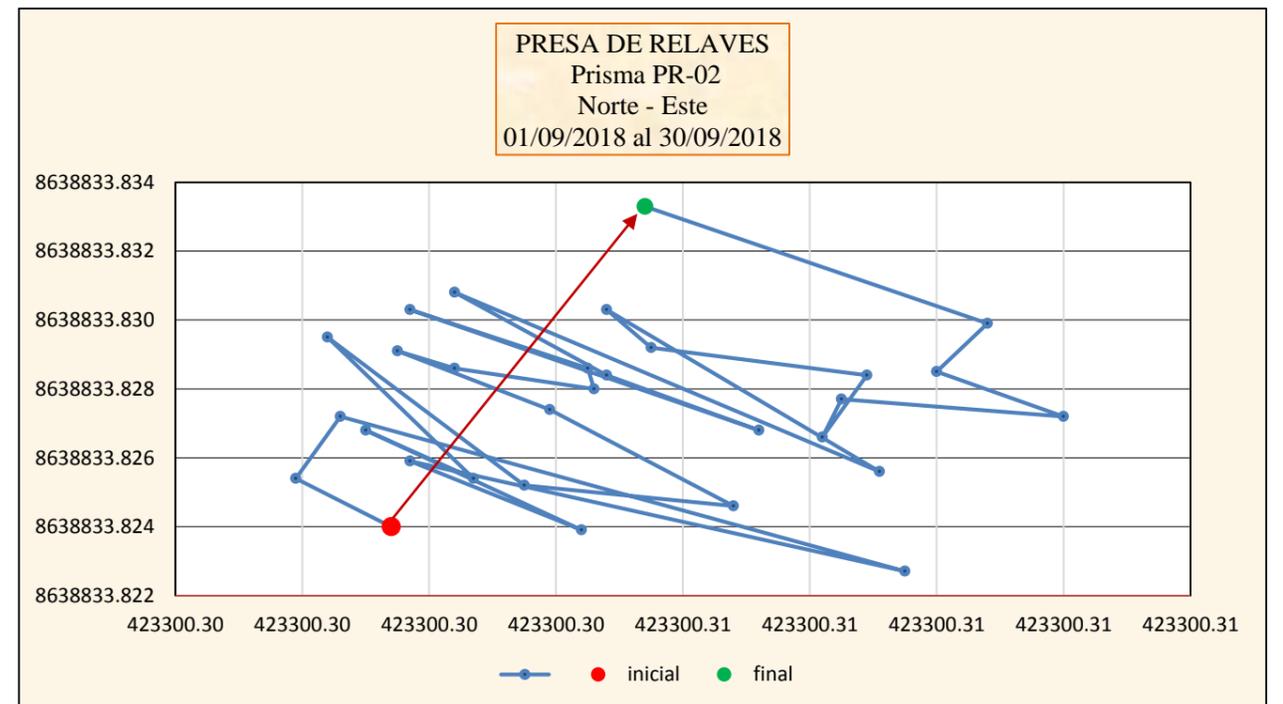
Gráfica 5: Desplazamiento relativo PR-02



Gráfica 7: Aceleración del punto PR-02



Gráfica 6: Velocidad de desplazamiento PR-02

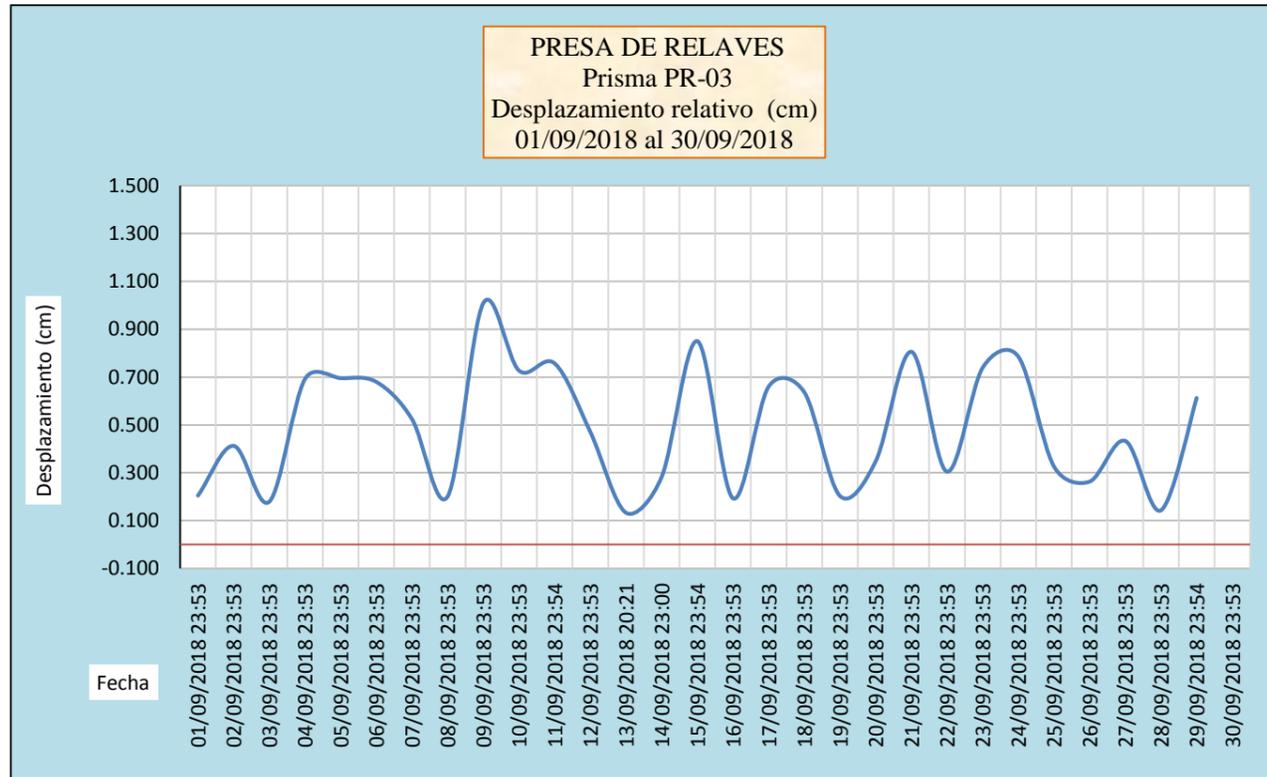


Gráfica 8: Vector de desplazamiento PR-02

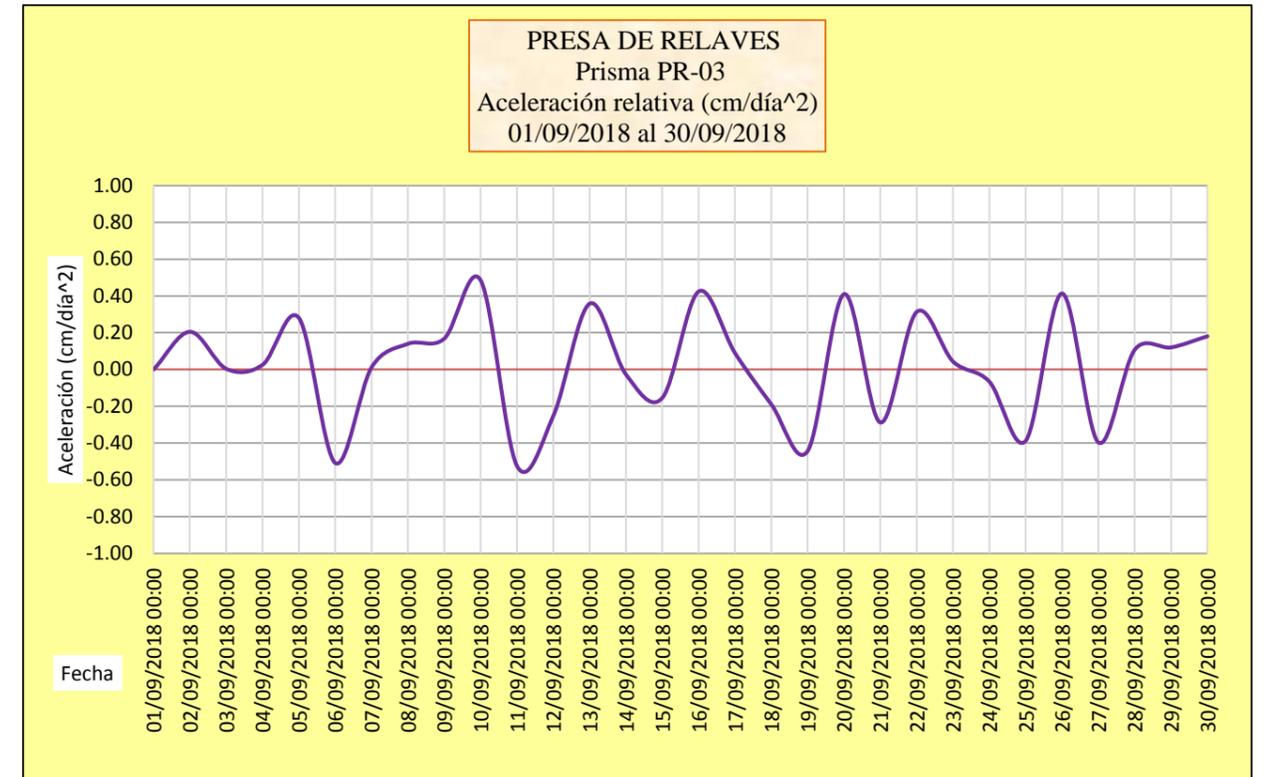
Del punto PR-03:

Tabla 28. Resumen de monitoreo con el Punto PR-03

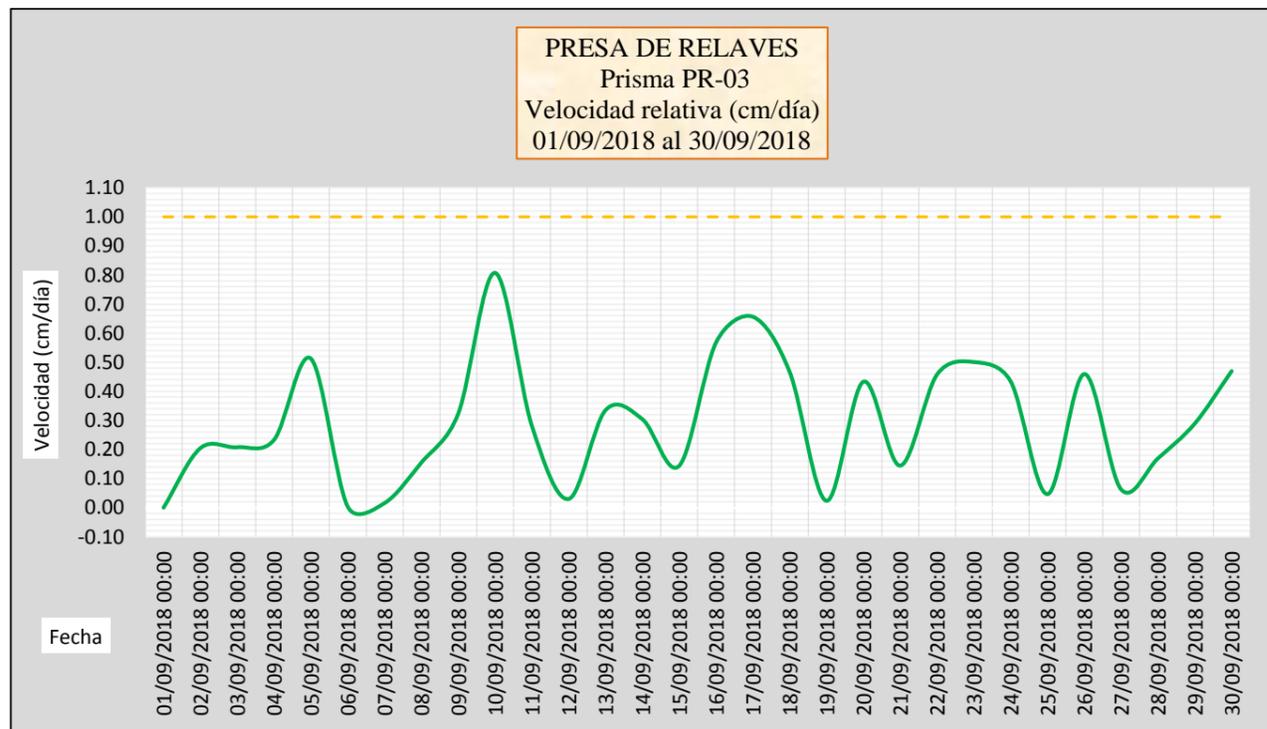
PR-03				ANÁLISIS DE MONITOREO												Nivel de alarma (cm/día)
				RELATIVO						ACUMULADO						
				N° de días	Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantánea (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	N° de días acumulados	Desplazamientos Acumulados (cm)			Velocidad acumulada (cm/día)	Aceleración acumulada	
Fecha	E	N	C		Dxy	Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)				Dxy	Dz	Dxyz			
01/09/2018 23:53	423353.543	8638826.793	4531.051	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0000	0.00
02/09/2018 23:53	423353.542	8638826.794	4531.052	1.000	0.198	-0.050	0.205	0.20	0.20	1.000	0.2	0.1	0.20	0.20	0.2047	0.20
03/09/2018 23:53	423353.545	8638826.793	4531.050	1.000	0.376	0.170	0.413	0.21	0.00	2.000	0.2	-0.1	0.22	0.11	0.0555	0.21
04/09/2018 23:53	423353.544	8638826.794	4531.051	1.000	0.149	-0.100	0.179	0.23	0.03	3.000	0.1	0.0	0.10	0.03	0.0113	0.23
05/09/2018 23:53	423353.550	8638826.791	4531.050	1.000	0.675	0.150	0.692	0.51	0.28	4.000	0.7	-0.2	0.74	0.19	0.0465	0.51
06/09/2018 23:53	423353.544	8638826.793	4531.047	1.000	0.622	0.310	0.695	0.00	-0.51	5.000	0.1	-0.5	0.49	0.10	0.0197	0.00
07/09/2018 23:53	423353.550	8638826.791	4531.047	1.000	0.678	-0.050	0.680	0.02	0.01	6.000	0.8	-0.4	0.89	0.15	0.0248	0.02
08/09/2018 23:53	423353.546	8638826.793	4531.048	1.000	0.520	-0.070	0.524	0.16	0.14	7.000	0.3	-0.4	0.46	0.07	0.0094	0.16
09/09/2018 23:53	423353.547	8638826.793	4531.046	1.000	0.134	0.150	0.201	0.32	0.17	8.000	0.4	-0.5	0.66	0.08	0.0103	0.32
10/09/2018 23:53	423353.539	8638826.798	4531.047	1.000	1.002	-0.120	1.009	0.81	0.48	9.000	0.7	-0.4	0.76	0.08	0.0094	0.81
11/09/2018 23:54	423353.544	8638826.794	4531.045	1.001	0.699	0.200	0.727	0.28	-0.53	10.001	0.2	-0.6	0.61	0.06	0.0061	0.28
12/09/2018 23:53	423353.551	8638826.792	4531.043	0.999	0.718	0.240	0.757	0.03	-0.25	11.000	0.8	-0.8	1.18	0.11	0.0097	0.03
13/09/2018 20:21	423353.547	8638826.793	4531.041	0.853	0.422	0.210	0.471	0.34	0.36	11.853	0.4	-1.0	1.13	0.09	0.0080	0.34
14/09/2018 23:00	423353.547	8638826.794	4531.040	1.110	0.106	0.080	0.133	0.30	-0.03	12.963	0.4	-1.1	1.18	0.09	0.0070	0.30
15/09/2018 23:54	423353.544	8638826.795	4531.040	1.037	0.282	-0.020	0.282	0.14	-0.15	14.001	0.2	-1.1	1.13	0.08	0.0057	0.14
16/09/2018 23:53	423353.552	8638826.792	4531.040	0.999	0.850	-0.010	0.850	0.57	0.42	15.000	0.9	-1.1	1.40	0.09	0.0062	0.57
17/09/2018 23:53	423353.550	8638826.792	4531.039	1.000	0.143	0.130	0.193	0.66	0.09	16.000	0.7	-1.2	1.43	0.09	0.0056	0.66
18/09/2018 23:53	423353.546	8638826.793	4531.035	1.000	0.483	0.450	0.660	0.47	-0.19	17.000	0.3	-1.7	1.69	0.10	0.0059	0.47
19/09/2018 23:53	423353.550	8638826.793	4531.039	1.000	0.450	-0.450	0.636	0.02	-0.44	18.000	0.7	-1.2	1.42	0.08	0.0044	0.02
20/09/2018 23:53	423353.548	8638826.794	4531.039	1.000	0.197	0.050	0.203	0.43	0.41	19.000	0.6	-1.3	1.38	0.07	0.0038	0.43
21/09/2018 23:53	423353.546	8638826.795	4531.037	1.000	0.314	0.150	0.348	0.14	-0.29	20.000	0.3	-1.4	1.46	0.07	0.0037	0.14
22/09/2018 23:53	423353.553	8638826.793	4531.040	1.000	0.735	-0.330	0.806	0.46	0.31	21.000	1.0	-1.1	1.45	0.07	0.0033	0.46
23/09/2018 23:53	423353.551	8638826.794	4531.038	1.000	0.141	0.270	0.305	0.50	0.04	22.000	0.8	-1.4	1.59	0.07	0.0033	0.50
24/09/2018 23:53	423353.548	8638826.798	4531.043	1.000	0.553	-0.490	0.739	0.43	-0.07	23.000	0.7	-0.9	1.09	0.05	0.0021	0.43
25/09/2018 23:53	423353.553	8638826.795	4531.038	1.000	0.622	0.480	0.785	0.05	-0.39	24.000	1.0	-1.4	1.70	0.07	0.0029	0.05
26/09/2018 23:53	423353.550	8638826.795	4531.037	1.000	0.310	0.100	0.326	0.46	0.41	25.000	0.7	-1.5	1.62	0.06	0.0026	0.46
27/09/2018 23:53	423353.552	8638826.795	4531.039	1.000	0.201	-0.170	0.263	0.06	-0.40	26.000	0.9	-1.3	1.58	0.06	0.0023	0.06
28/09/2018 23:53	423353.556	8638826.793	4531.037	1.000	0.398	0.170	0.433	0.17	0.11	27.000	1.3	-1.5	1.91	0.07	0.0026	0.17
29/09/2018 23:54	423353.555	8638826.793	4531.036	1.001	0.078	0.120	0.143	0.29	0.12	28.001	1.2	-1.6	1.97	0.07	0.0025	0.29
30/09/2018 23:53	423353.558	8638826.798	4531.039	0.999	0.528	-0.310	0.613	0.47	0.18	29.000	1.5	-1.3	1.98	0.07	0.0024	0.47



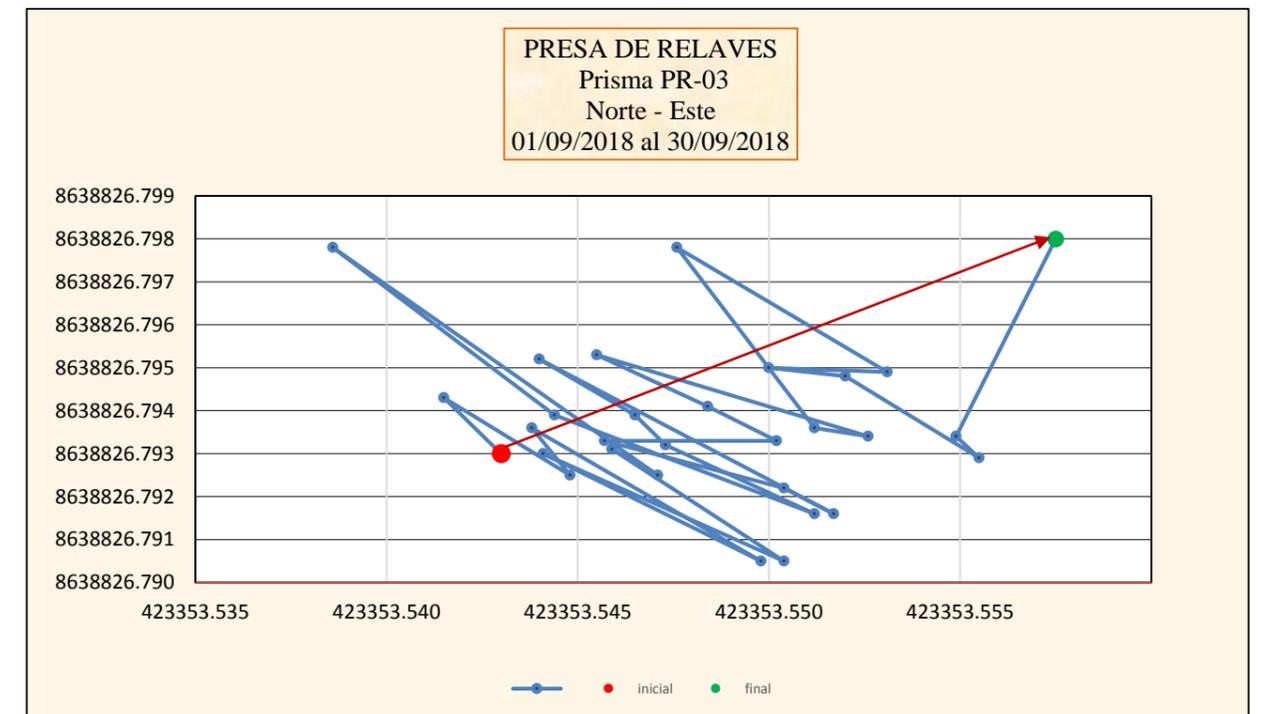
Gráfica 9: Desplazamiento relativo PR-03



Gráfica 11: Aceleración del punto PR-03



Gráfica 10: Velocidad de desplazamiento PR-03

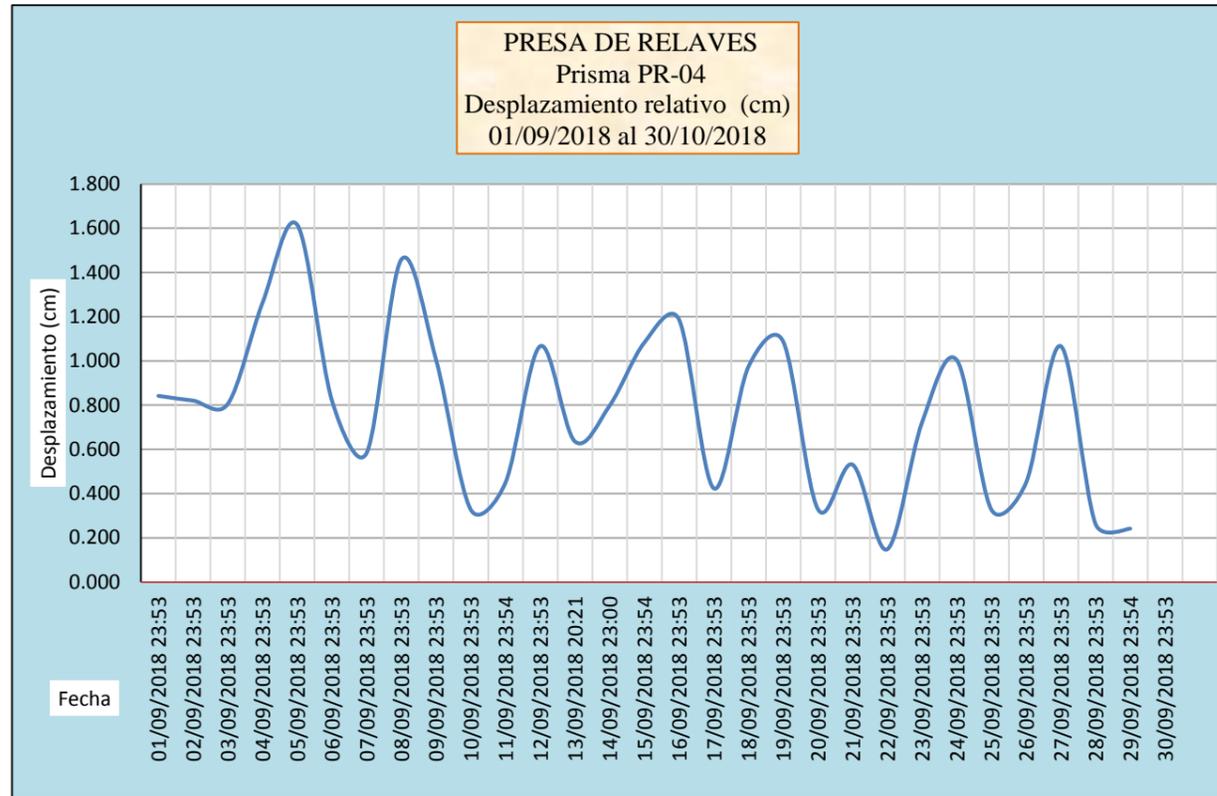


Gráfica 12: Vector de desplazamiento PR-03

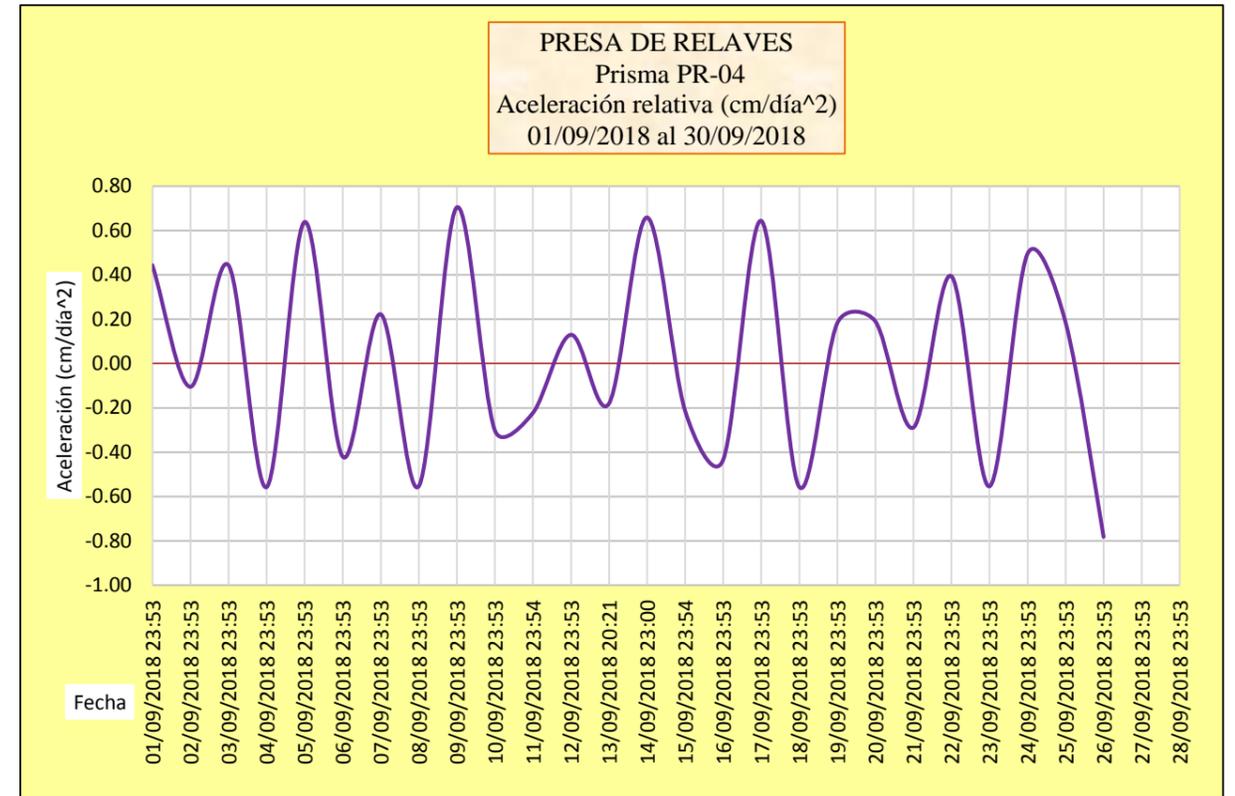
Del punto PR-04:

Tabla 29. Resumen de monitoreo con el Punto PR-04

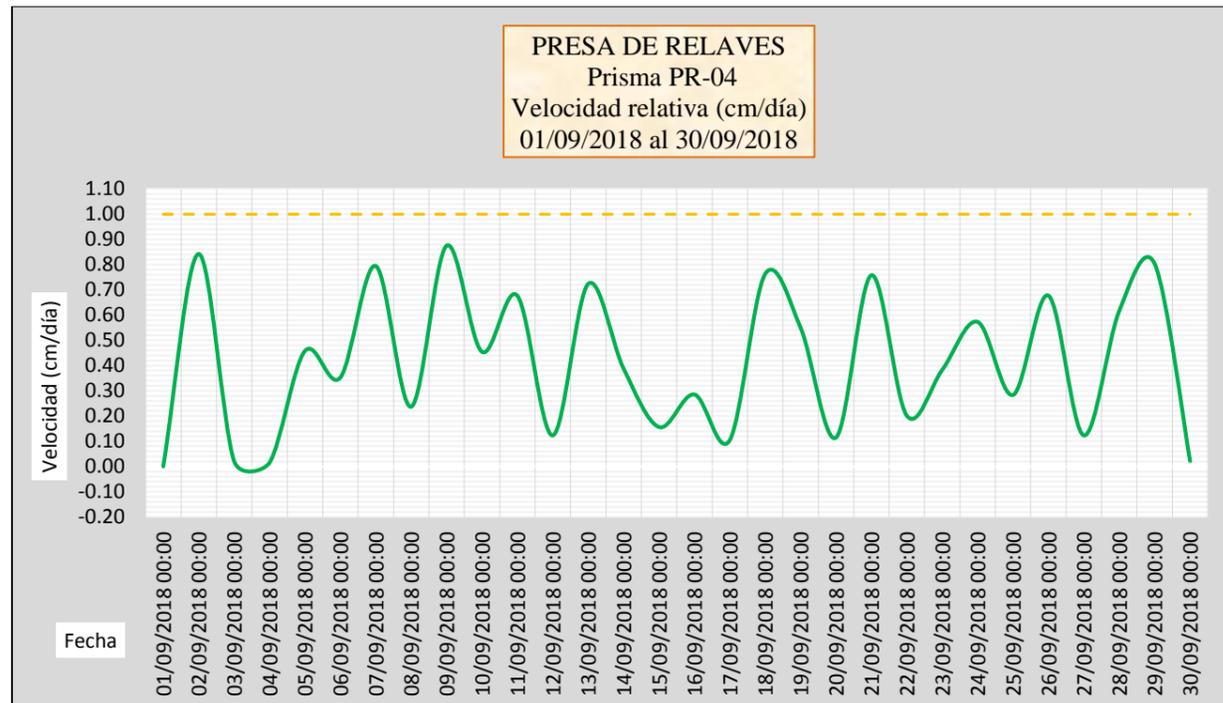
PR-04				ANÁLISIS DE MONITOREO												Nivel de alarma (cm/día)
				RELATIVO						ACUMULADO						
				N° de días	Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantanea (cm/día)	Aceleración (cm/día^2)	N° de días acumulados	Desplazamientos Acumulados (cm)			Velocidad acumulada (cm/día)	Aceleración acumulada	
Fecha	E	N	C		Dxy	Dz	Diferencia del espacio Dxyz(cm)				Dxy	Dz	Dxyz			
01/09/2018 23:53	423411.403	8638819.643	4530.968	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0000	0.00
02/09/2018 23:53	423411.3984	8638819.6501	4530.9681	1.000	0.841	-0.050	0.842	0.84	0.84	1.000	0.8	0.0	0.84	0.84	0.8421	0.84
03/09/2018 23:53	423411.4058	8638819.6474	4530.9704	1.000	0.788	-0.230	0.821	0.02	-0.82	2.000	0.5	0.3	0.60	0.30	0.1492	0.02
04/09/2018 23:53	423411.3988	8638819.6495	4530.9670	1.000	0.731	0.340	0.806	0.01	-0.01	3.000	0.8	-0.1	0.77	0.26	0.0856	0.01
05/09/2018 23:53	423411.4063	8638819.6431	4530.9591	1.000	0.986	0.790	1.263	0.46	0.44	4.000	0.3	-0.8	0.92	0.23	0.0572	0.46
06/09/2018 23:53	423411.3918	8638819.6502	4530.9596	1.000	1.614	-0.050	1.615	0.35	-0.11	5.000	1.3	-0.8	1.55	0.31	0.0618	0.35
07/09/2018 23:53	423411.3992	8638819.6475	4530.9619	1.000	0.788	-0.230	0.821	0.79	0.44	6.000	0.6	-0.6	0.82	0.14	0.0226	0.79
08/09/2018 23:53	423411.4029	8638819.6449	4530.9582	1.000	0.452	0.370	0.584	0.24	-0.56	7.000	0.2	-0.9	0.96	0.14	0.0196	0.24
09/09/2018 23:53	423411.4051	8638819.6497	4530.9718	1.000	0.528	-1.360	1.459	0.87	0.64	8.000	0.7	0.4	0.82	0.10	0.0128	0.87
10/09/2018 23:53	423411.4002	8638819.6486	4530.9631	1.000	0.502	0.870	1.005	0.45	-0.42	9.000	0.6	-0.5	0.77	0.09	0.0095	0.45
11/09/2018 23:54	423411.4031	8638819.6472	4530.9625	1.001	0.322	0.060	0.328	0.68	0.22	10.001	0.4	-0.5	0.66	0.07	0.0066	0.68
12/09/2018 23:53	423411.4050	8638819.6451	4530.9590	0.999	0.283	0.350	0.450	0.12	-0.55	11.000	0.3	-0.9	0.91	0.08	0.0075	0.12
13/09/2018 20:21	423411.4105	8638819.6467	4530.9680	0.853	0.573	-0.900	1.067	0.72	0.70	11.853	0.8	0.0	0.85	0.07	0.0060	0.72
14/09/2018 23:00	423411.4067	8638819.6466	4530.9629	1.110	0.380	0.510	0.636	0.39	-0.30	12.963	0.5	-0.5	0.70	0.05	0.0042	0.39
15/09/2018 23:54	423411.4005	8638819.6507	4530.9658	1.037	0.743	-0.290	0.798	0.16	-0.22	14.001	0.8	-0.2	0.83	0.06	0.0042	0.16
16/09/2018 23:53	423411.4079	8638819.6510	4530.9737	0.999	0.741	-0.790	1.083	0.29	0.13	15.000	0.9	0.6	1.12	0.07	0.0050	0.29
17/09/2018 23:53	423411.4049	8638819.6477	4530.9627	1.000	0.446	1.100	1.187	0.10	-0.18	16.000	0.5	-0.5	0.71	0.04	0.0028	0.10
18/09/2018 23:53	423411.4087	8638819.6467	4530.9643	1.000	0.393	-0.160	0.424	0.76	0.66	17.000	0.7	-0.3	0.76	0.04	0.0026	0.76
19/09/2018 23:53	423411.4057	8638819.6517	4530.9721	1.000	0.583	-0.780	0.974	0.55	-0.21	18.000	0.9	0.5	1.02	0.06	0.0031	0.55
20/09/2018 23:53	423411.4091	8638819.6468	4530.9630	1.000	0.596	0.910	1.088	0.11	-0.44	19.000	0.7	-0.5	0.86	0.05	0.0024	0.11
21/09/2018 23:53	423411.4124	8638819.6467	4530.9631	1.000	0.330	-0.010	0.330	0.76	0.64	20.000	1.0	-0.5	1.11	0.06	0.0028	0.76
22/09/2018 23:53	423411.4072	8638819.6476	4530.9625	1.000	0.528	0.060	0.531	0.20	-0.56	21.000	0.6	-0.5	0.81	0.04	0.0018	0.20
23/09/2018 23:53	423411.4078	8638819.6487	4530.9617	1.000	0.125	0.080	0.149	0.38	0.18	22.000	0.8	-0.6	0.96	0.04	0.0020	0.38
24/09/2018 23:53	423411.4098	8638819.6535	4530.9667	1.000	0.520	-0.500	0.721	0.57	0.19	23.000	1.3	-0.1	1.26	0.05	0.0024	0.57
25/09/2018 23:53	423411.4049	8638819.6524	4530.9580	1.000	0.502	0.870	1.005	0.28	-0.29	24.000	1.0	-1.0	1.36	0.06	0.0024	0.28
26/09/2018 23:53	423411.4078	8638819.6510	4530.9574	1.000	0.322	0.060	0.328	0.68	0.39	25.000	0.9	-1.0	1.39	0.06	0.0022	0.68
27/09/2018 23:53	423411.4097	8638819.6489	4530.9539	1.000	0.283	0.350	0.450	0.12	-0.55	26.000	0.9	-1.4	1.64	0.06	0.0024	0.12
28/09/2018 23:53	423411.4152	8638819.6505	4530.9629	1.000	0.573	-0.900	1.067	0.62	0.49	27.000	1.4	-0.5	1.52	0.06	0.0021	0.62
29/09/2018 23:54	423411.4164	8638819.6523	4530.9614	1.001	0.216	0.150	0.263	0.80	0.19	28.001	1.6	-0.6	1.75	0.06	0.0022	0.80
30/09/2018 23:53	423411.4178	8638819.6540	4530.9604	0.999	0.220	0.100	0.242	0.02	-0.78	29.000	1.9	-0.7	1.99	0.07	0.0024	0.02



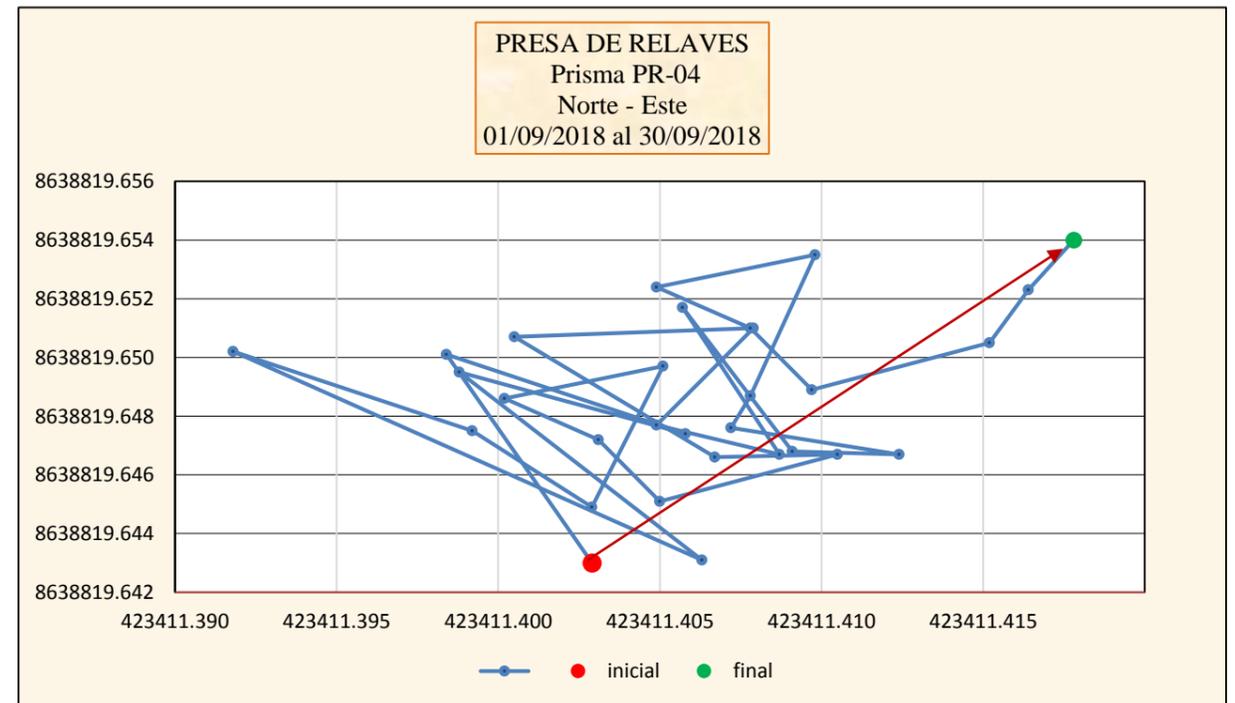
Gráfica 13: Desplazamiento relativo PR-04



Gráfica 15: Aceleración del punto PR-04



Gráfica 14: Velocidad de desplazamiento PR-04

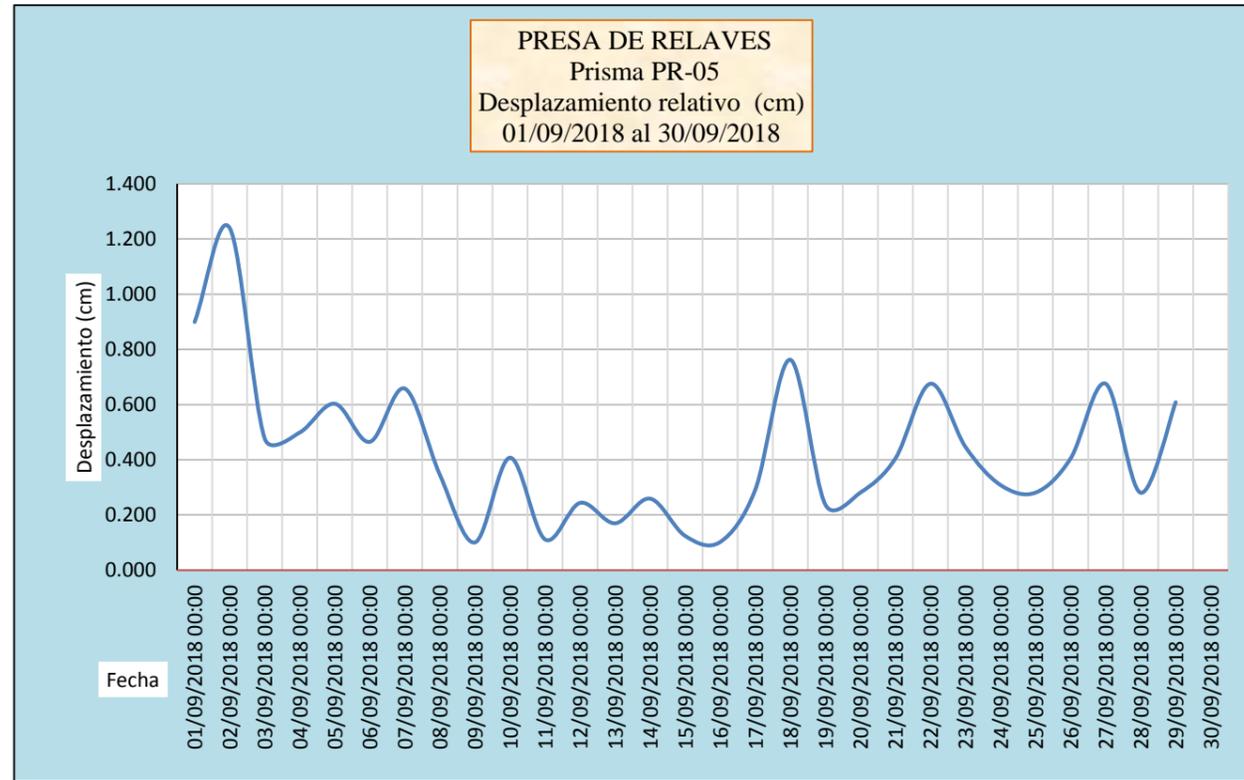


Gráfica 16: Vector de desplazamiento PR-04

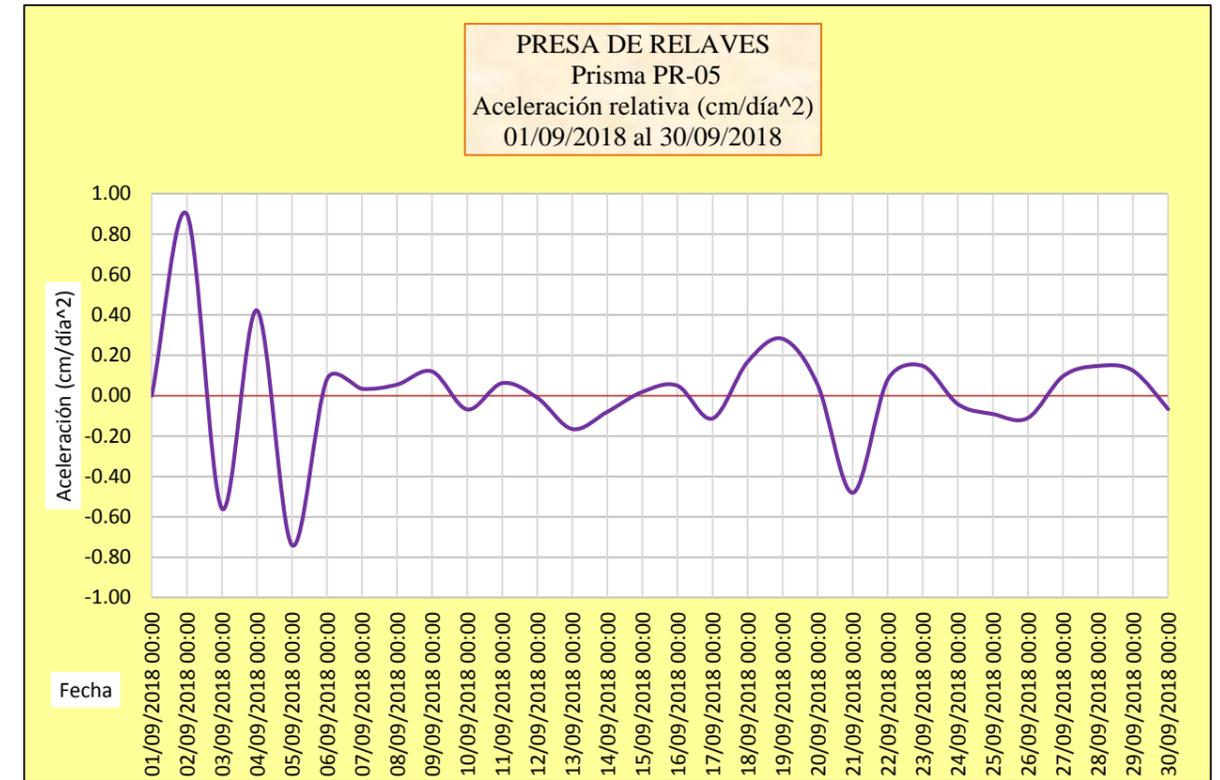
Del punto PR-05:

Tabla 30. Resumen de monitoreo con el punto PR-05

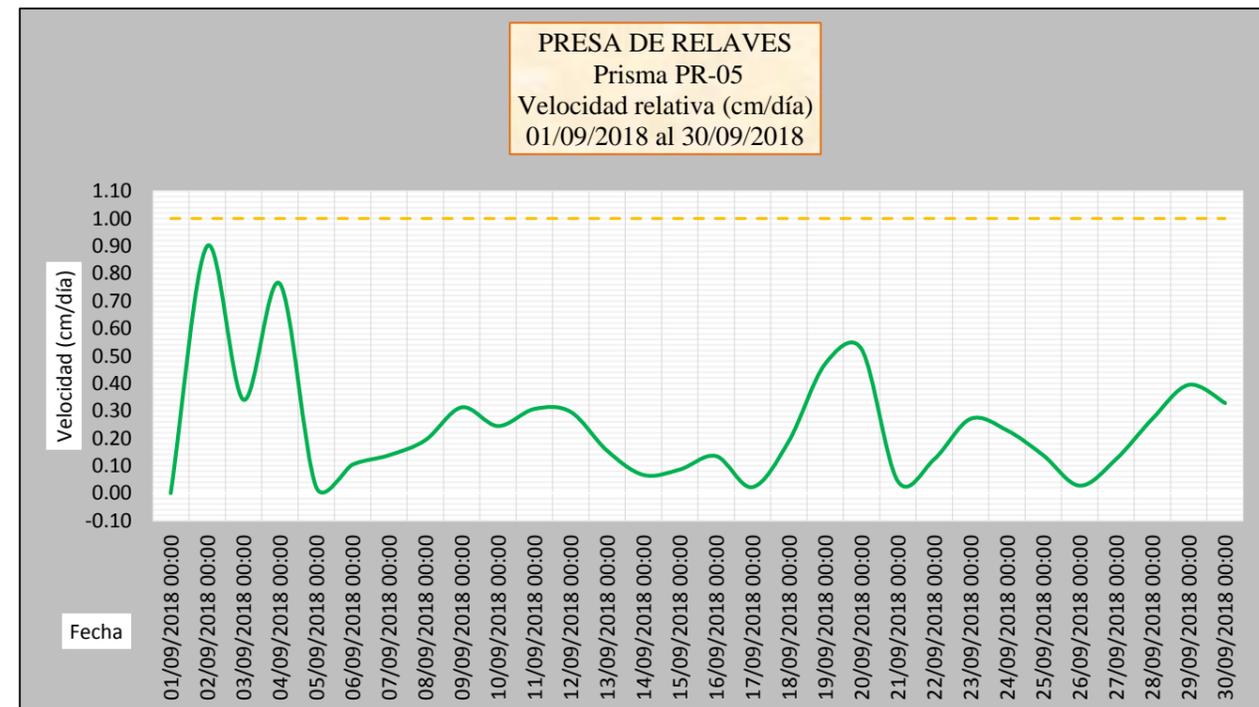
PR-05				ANÁLISIS DE MONITOREO												Nivel de alarma (cm/día)
				RELATIVO						ACUMULADO						
				N° de días	Desplazamientos relativos (cm)			Velocidad instantánea (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	N° de días acumulados	Desplazamientos Acumulados (cm)			Velocidad acumulada (cm/día)	Aceleración acumulada	
Fecha	E	N	C		Dxy	Dz	Dxyz									
01/09/2018 23:53	423469.422	8638812.475	4531.164	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0000	0.00
02/09/2018 23:53	423469.431	8638812.472	4531.166	1.000	0.879	-0.190	0.900	0.90	0.90	1.000	0.9	0.2	0.90	0.90	0.8996	0.90
03/09/2018 23:53	423469.420	8638812.475	4531.160	1.000	1.106	0.560	1.240	0.34	-0.56	2.000	0.2	-0.4	0.44	0.22	0.1104	0.34
04/09/2018 23:53	423469.424	8638812.473	4531.161	1.000	0.470	-0.080	0.477	0.76	0.42	3.000	0.3	-0.3	0.41	0.14	0.0450	0.76
05/09/2018 23:53	423469.420	8638812.474	4531.160	1.000	0.487	0.110	0.499	0.02	-0.74	4.000	0.3	-0.4	0.49	0.12	0.0303	0.02
06/09/2018 23:53	423469.425	8638812.473	4531.161	1.000	0.591	-0.120	0.603	0.10	0.08	5.000	0.4	-0.3	0.47	0.09	0.0188	0.10
07/09/2018 23:53	423469.422	8638812.475	4531.163	1.000	0.440	-0.150	0.465	0.14	0.03	6.000	0.1	-0.1	0.14	0.02	0.0040	0.14
08/09/2018 23:53	423469.427	8638812.472	4531.162	1.000	0.652	0.090	0.658	0.19	0.05	7.000	0.6	-0.2	0.63	0.09	0.0128	0.19
09/09/2018 23:53	423469.430	8638812.471	4531.163	1.000	0.328	-0.110	0.346	0.31	0.12	8.000	0.9	-0.1	0.91	0.11	0.0142	0.31
10/09/2018 23:53	423469.430	8638812.471	4531.162	1.000	0.014	0.100	0.101	0.24	-0.07	9.000	0.9	-0.2	0.92	0.10	0.0114	0.24
11/09/2018 23:54	423469.428	8638812.472	4531.159	1.001	0.253	0.320	0.408	0.31	0.06	10.001	0.6	-0.5	0.84	0.08	0.0084	0.31
12/09/2018 23:53	423469.428	8638812.472	4531.160	0.999	0.050	-0.100	0.112	0.30	-0.01	11.000	0.7	-0.4	0.79	0.07	0.0065	0.30
13/09/2018 20:21	423469.430	8638812.472	4531.161	0.853	0.165	-0.180	0.244	0.16	-0.17	11.853	0.8	-0.3	0.86	0.07	0.0061	0.16
14/09/2018 23:00	423469.429	8638812.473	4531.161	1.110	0.170	0.000	0.170	0.07	-0.08	12.963	0.7	-0.3	0.71	0.05	0.0042	0.07
15/09/2018 23:54	423469.430	8638812.472	4531.160	1.037	0.230	0.120	0.260	0.09	0.02	14.001	0.9	-0.4	0.96	0.07	0.0049	0.09
16/09/2018 23:53	423469.430	8638812.472	4531.160	0.999	0.114	0.050	0.124	0.14	0.05	15.000	0.8	-0.4	0.88	0.06	0.0039	0.14
17/09/2018 23:53	423469.431	8638812.472	4531.160	1.000	0.100	0.020	0.102	0.02	-0.11	16.000	0.9	-0.4	0.98	0.06	0.0038	0.02
18/09/2018 23:53	423469.429	8638812.475	4531.159	1.000	0.292	0.010	0.292	0.19	0.17	17.000	0.7	-0.5	0.82	0.05	0.0028	0.19
19/09/2018 23:53	423469.435	8638812.470	4531.159	1.000	0.763	0.000	0.763	0.47	0.28	18.000	1.4	-0.5	1.46	0.08	0.0045	0.47
20/09/2018 23:53	423469.434	8638812.470	4531.157	1.000	0.112	0.210	0.238	0.52	0.05	19.000	1.3	-0.7	1.47	0.08	0.0041	0.52
21/09/2018 23:53	423469.433	8638812.472	4531.159	1.000	0.244	-0.140	0.281	0.04	-0.48	20.000	1.1	-0.5	1.23	0.06	0.0031	0.04
22/09/2018 23:53	423469.429	8638812.474	4531.158	1.000	0.403	0.040	0.405	0.12	0.08	21.000	0.7	-0.6	0.92	0.04	0.0021	0.12
23/09/2018 23:53	423469.436	8638812.471	4531.159	1.000	0.669	-0.100	0.676	0.27	0.15	22.000	1.4	-0.5	1.46	0.07	0.0030	0.27
24/09/2018 23:53	423469.432	8638812.474	4531.161	1.000	0.424	-0.140	0.447	0.23	-0.04	23.000	1.0	-0.3	1.05	0.05	0.0020	0.23
25/09/2018 23:53	423469.431	8638812.474	4531.158	1.000	0.130	0.280	0.309	0.14	-0.09	24.000	0.9	-0.6	1.06	0.04	0.0018	0.14
26/09/2018 23:53	423469.429	8638812.476	4531.159	1.000	0.244	-0.140	0.281	0.03	-0.11	25.000	0.7	-0.5	0.86	0.03	0.0014	0.03
27/09/2018 23:53	423469.426	8638812.478	4531.159	1.000	0.403	0.040	0.405	0.12	0.10	26.000	0.5	-0.5	0.68	0.03	0.0010	0.12
28/09/2018 23:53	423469.432	8638812.475	4531.160	1.000	0.669	-0.100	0.676	0.27	0.15	27.000	1.0	-0.4	1.07	0.04	0.0015	0.27
29/09/2018 23:54	423469.434	8638812.474	4531.159	1.001	0.262	0.100	0.281	0.39	0.12	28.001	1.2	-0.5	1.30	0.05	0.0017	0.39
30/09/2018 23:53	423469.429	8638812.477	4531.160	0.999	0.602	-0.090	0.609	0.33	-0.07	29.000	0.7	-0.4	0.84	0.03	0.0010	0.33



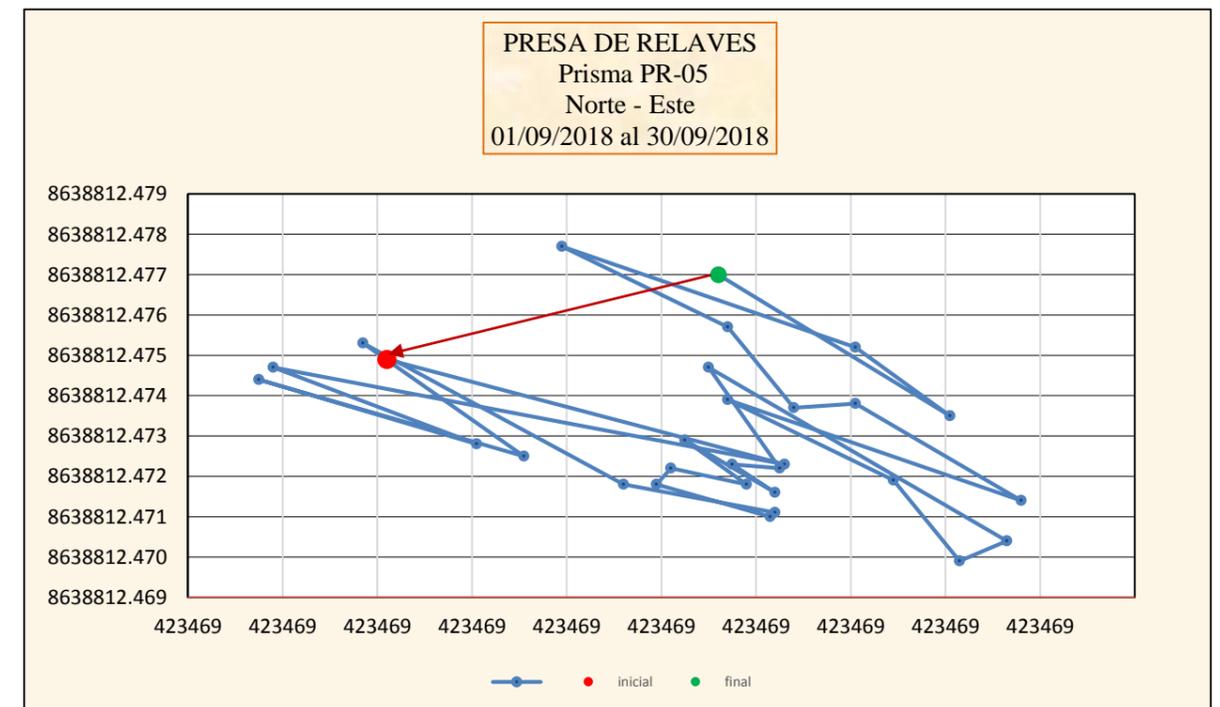
Gráfica 17: Desplazamiento relativo PR-05



Gráfica 19: Aceleración Del punto PR-05



Gráfica 18: Velocidad de desplazamiento PR-05



Gráfica 20: Vector de desplazamiento PR-05

3.9.1.2. Para el monitoreo de movimientos internos en la estructura del dique de la presa de relaves

Culminado los trabajos de instalación del inclinómetro, se recibió la capacitación por parte del personal del proveedor GEOKON sobre el uso y cuidado del inclinómetro, a partir de lo cual se realizó la primera lectura el 25/07/2018 y así se empezó a monitorear de manera quincenal, registrando los datos en campo, tal como se muestra en el Anexo 4 y analizándolos en gabinete con soporte del software Gtilt Plus, tal como se detalla a continuación:

Main Header -

Installation No.

Location

Client

Project

Readings depth interval (include units, e.g. 2.0 ft or 0.5 m)

Shallowest rdg Depth as per cable marks, same units as above

Casing Stickup above reference elevation

Adjustment re: Cable clamp

Adjustment re: Cable Marks

No. of readings (used to calculate total depth)

Output in English or Metric units? (E or M) M

Reference Elevation (show units, ft or m)

Skew angle degrees.

Probe Sensitivity units for a 30-degree tilt.

Skew

+5

+1

-1

-5

Close

Figura 25. Entrada inicial de datos al software Gtilt Plus

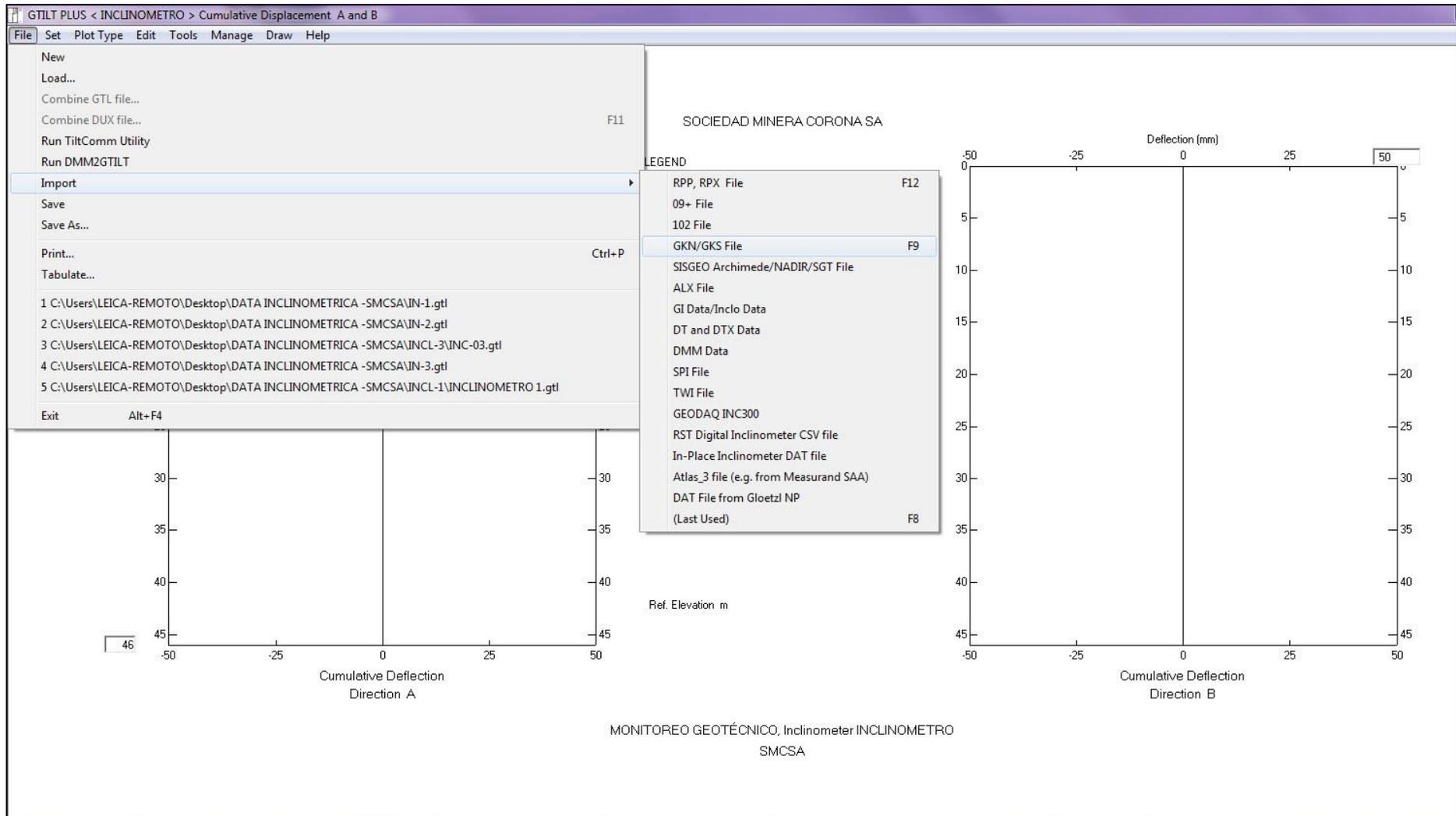


Figura 26. Interfaz del programa Gtil Plus para importar cada medición realizada en campo, en formato GKN.

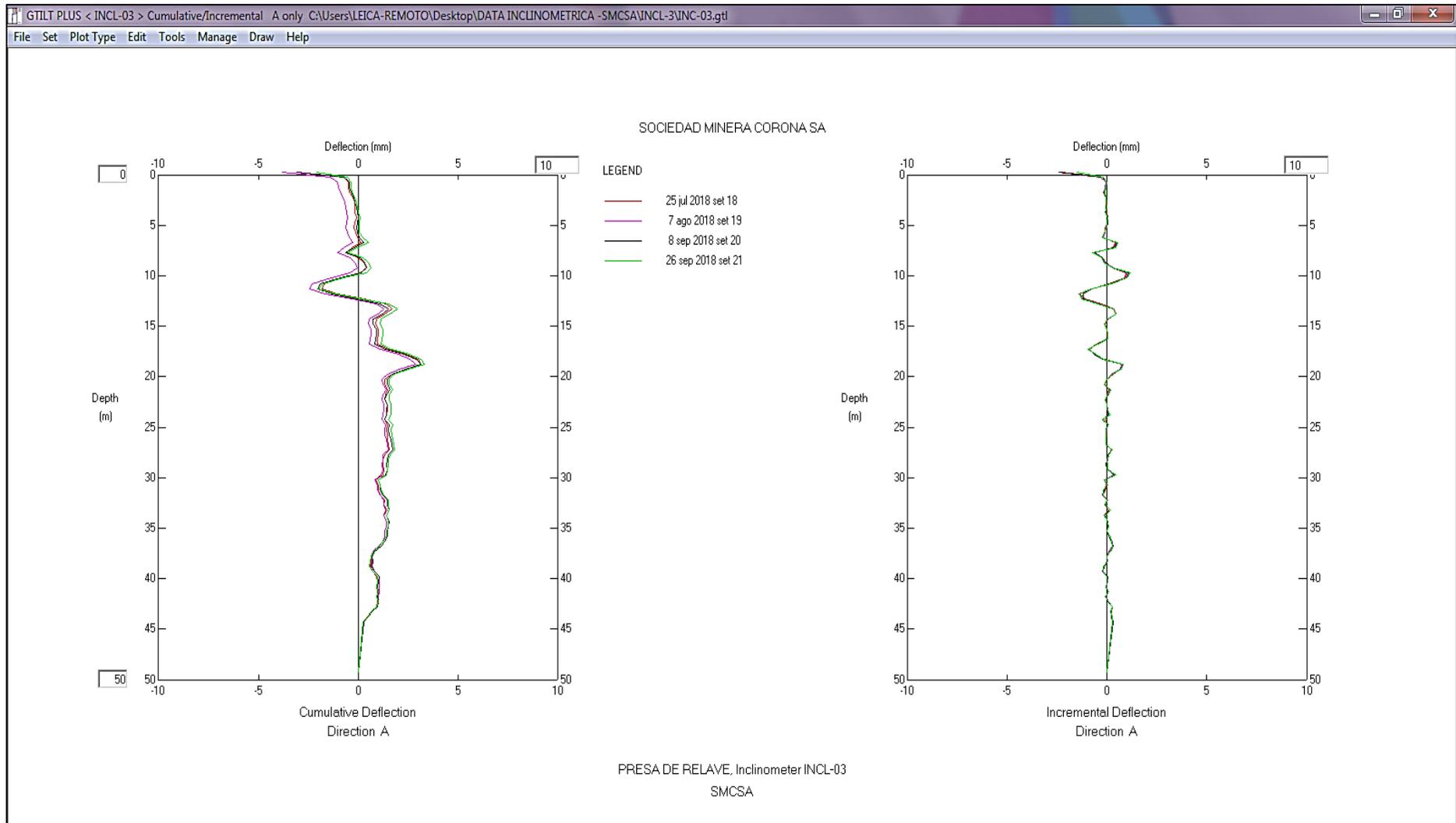


Figura 27. Deflexión en el eje A del inclinómetro instalado en la presa de relaves

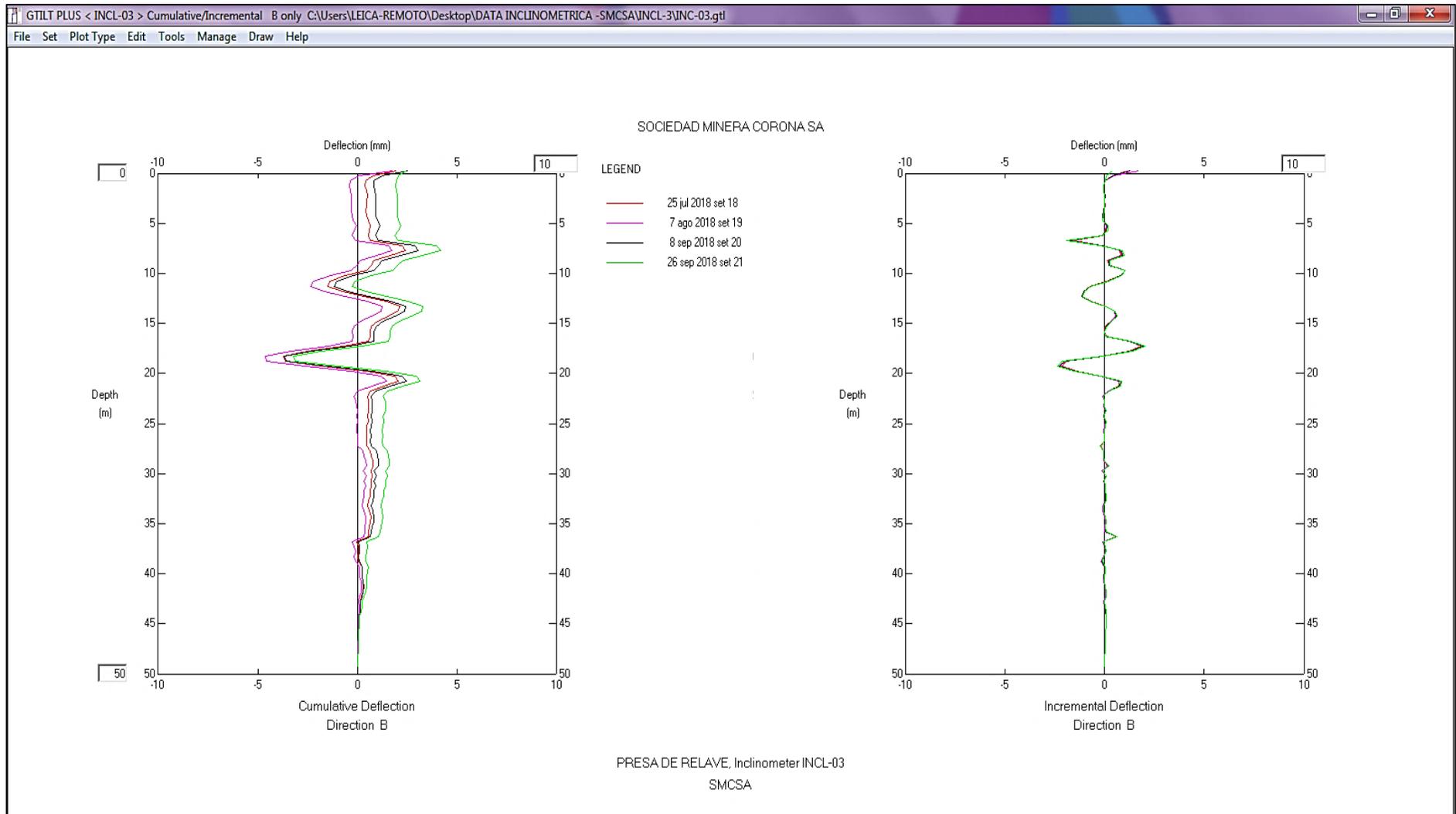


Figura 28. Deflexión en el eje B del inclinómetro instalado en la presa de relaves

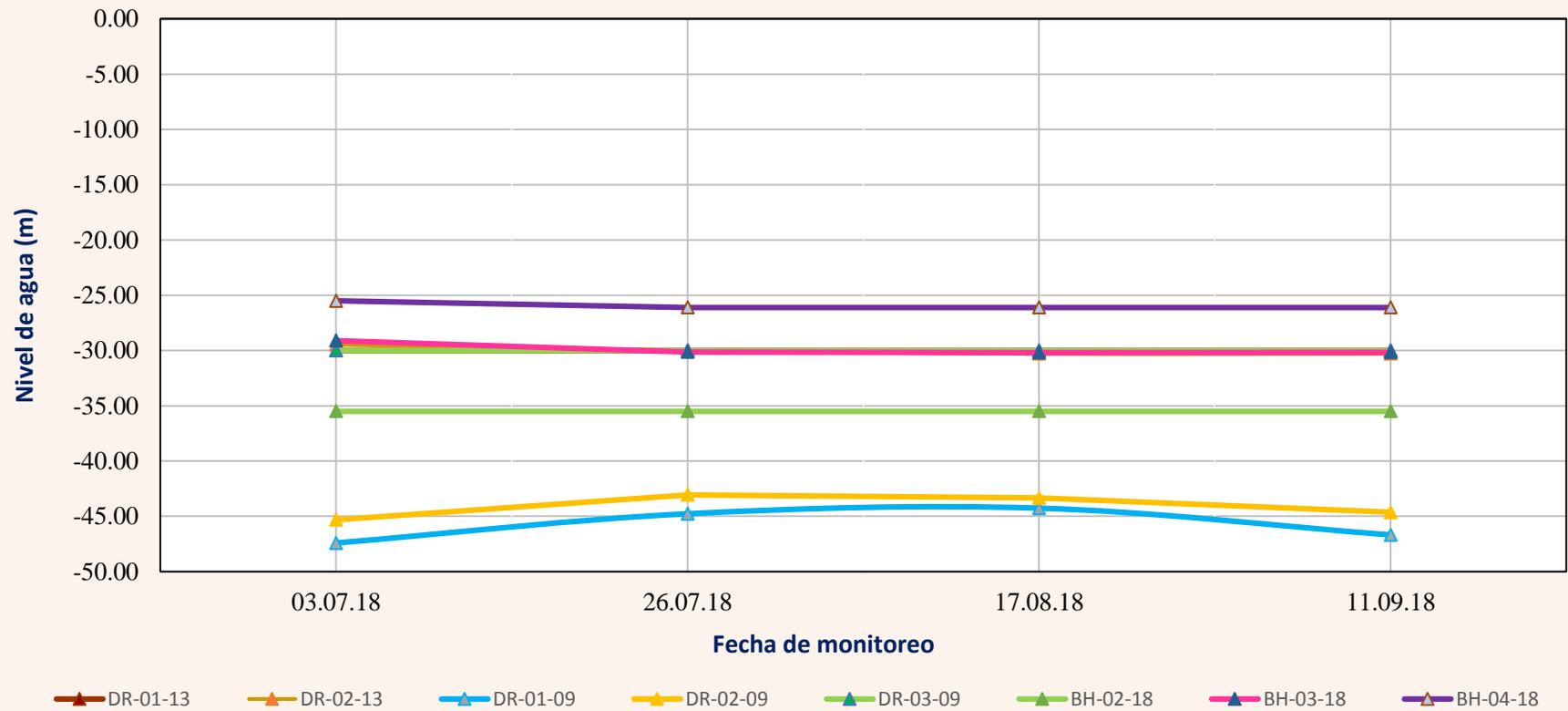
3.9.1.3 Para analizar el comportamiento del agua

Implementado los 3 piezómetros tipo Casagrande, se empezó a monitorear mensualmente el comportamiento del nivel del agua y se realizó en conjunto con los 5 piezómetros que datan de años y etapas de recrecimiento anteriores a fin de tener una data más representativa del comportamiento del agua y su afectación en la presa de relaves, dichos puntos monitoreados son registrados en la Tabla 31 y analizados en diferentes gráficas para su mejor interpretación, tal como se detalla a continuación:

Tabla 31. Datos del monitoreo piezométrico hasta el mes de Setiembre -2018

PRESA DE RELAVES MONITOREO DE PIEZÓMETROS 2018					
DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	03.07.18	26.07.18	17.08.18	11.09.18
N°1 - Aguas abajo del dique del depósito de relaves	DR-01-13	30.00	30.00	30.00	30.00
N°2 - Aguas abajo del dique del depósito de relaves	DR-02-13	29.48	30.00	30.30	30.30
Parte superior del dique (cresta)	DR-01-09	47.43	44.78	44.27	46.70
Talud del dique parte media inferior (20 m debajo de la cresta)	DR-02-09	45.32	43.06	43.34	44.64
Pie del dique	DR-03-09	30.00	30.00	30.00	30.00
Talud del dique parte media (33 m debajo de la cresta)	BH-02-18	35.50	35.14	35.08	35.16
Talud del dique parte inferior (46 m debajo de la cresta)	BH-03-18	29.10	30.14	30.19	30.16
Aguas abajo del dique del depósito de relaves	BH-04-18	25.50	26.10	26.10	26.10

**PRESA DE RELAVES
MONITOREO DE PIEZÓMETROS
2018**



Gráfica 21. Comportamiento del nivel del agua en el talud de la presa de relaves

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con la investigación, considerando los parámetros y condiciones de estabilidad actuales de la presa de relaves de la Unidad Minera Yauricocha, se evaluó y determinó que la manera de mantener un control de estabilidad de manera continua es a través de la implementación de un sistema de auscultación o monitoreo, el que a la vez se rige en la instrumentación geotécnica y los parámetros a monitorear.

Tabla 32. Instrumentación geotécnica implementada para el monitoreo de estabilidad de la presa de relaves

Parámetro monitoreado	Instrumento utilizado	Objetivo
Movimientos verticales superficiales	Prismas de monitoreo GPR 112	Evaluar los datos registrados por el Equipo Robot Leica TM50 y analizar de manera diaria los desplazamientos acumulados en el dique de contención de la presa de relaves, asimismo calcular la velocidad y tendencia de desplazamiento; así como la dirección de desplazamiento.
Movimientos en el interior de la estructura del dique	Inclinómetro	Observar el comportamiento de la estructura interna del dique de contención de la presa de relaves con respecto al eje principal, a la vez calcular la deformación con respecto a la lectura inicial y la velocidad de la misma.
Nivel freático	Piezómetro tipo Casagrande	Medir con precisión el nivel de agua en los 3 nuevos piezómetros instalados en el talud de la presa de relaves, a fin de representar y analizar el nivel freático y/o alguna infiltración en la presa de relaves.

4.2. ANÁLISIS DEL MONITOREO DE ESTABILIDAD

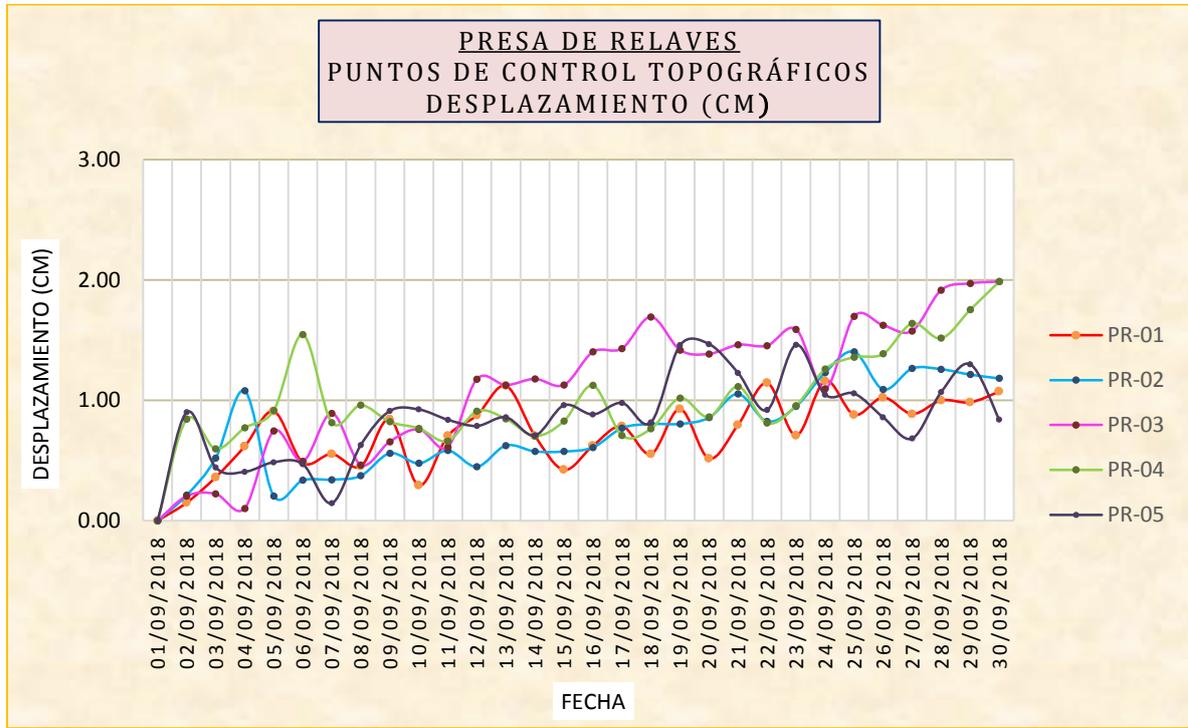
4.2.1. Análisis de movimientos superficiales

Tabla 33. Resumen consolidado del monitoreo con prismas GPR112

FECHAS	PR-01				PR-02				PR-03				PR-04				PR-05				RESUMEN				
	Despl. Acumulado (cm)	Nivel de alarma (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	Despl. Acumulado en Z (cm)	Despl. Acumulado (cm)	Nivel de alarma (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	Despl. Acumulado en Z (cm)	Despl. Acumulado (cm)	Nivel de alarma (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	Despl. Acumulado en Z (cm)	Despl. Acumulado (cm)	Nivel de alarma (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	Despl. Acumulado en Z (cm)	Despl. Acumulado (cm)	Nivel de alarma (cm/día)	Aceleración (cm/día ²)	Despl. Acumulado en Z (cm)	Despl. Acumulado (cm)	Aceleración (cm/día ²)	Nivel de alarma (cm/día)	PRISMAS	
01/09/2018	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	PR-01
02/09/2018	0.15	0.15	0.15	0.10	0.21	0.21	0.21	-0.05	0.20	0.20	0.20	0.05	0.84	0.84	0.84	0.05	0.90	0.90	0.90	0.19	0.15	0.15	0.90	0.90	PR-01
03/09/2018	0.36	0.11	-0.04	0.12	0.52	0.28	0.07	0.40	0.22	0.21	0.00	-0.12	0.60	0.02	-0.82	0.28	0.44	0.34	-0.56	-0.37	0.52	0.07	0.34	0.34	PR-02
04/09/2018	0.62	0.11	0.00	-0.13	1.08	0.55	0.27	0.70	0.10	0.23	0.03	-0.02	0.77	0.01	-0.01	-0.06	0.41	0.76	0.42	-0.29	0.62	0.00	0.76	0.76	PR-01
05/09/2018	0.91	0.04	-0.07	0.16	0.20	0.10	-0.45	-0.07	0.74	0.51	0.28	-0.17	0.92	0.46	0.44	-0.85	0.49	0.02	-0.74	-0.40	0.91	-0.07	0.51	0.51	PR-01
06/09/2018	0.48	0.11	0.07	-0.14	0.34	0.80	0.70	-0.15	0.49	0.00	-0.51	-0.48	1.55	0.35	-0.11	-0.80	0.47	0.10	0.08	-0.28	0.34	0.70	0.80	0.80	PR-02
07/09/2018	0.55	0.08	-0.03	0.27	0.34	0.10	-0.69	-0.19	0.89	0.02	0.01	-0.43	0.82	0.79	0.44	-0.57	0.14	0.14	0.03	-0.13	0.34	-0.69	0.79	0.79	PR-02
08/09/2018	0.45	0.48	0.40	-0.16	0.37	0.19	0.09	-0.32	0.46	0.16	0.14	-0.36	0.96	0.24	-0.56	-0.94	0.63	0.19	0.05	-0.22	0.46	-0.36	0.48	0.48	PR-03
09/09/2018	0.84	0.11	-0.37	-0.70	0.56	0.33	0.14	0.03	0.66	0.32	0.17	-0.51	0.82	0.87	0.64	0.42	0.91	0.31	0.12	-0.11	0.56	0.14	0.87	0.87	PR-02
10/09/2018	0.29	0.02	-0.09	0.09	0.48	0.10	-0.23	-0.41	0.76	0.81	0.48	-0.39	0.77	0.45	-0.42	-0.45	0.92	0.24	-0.07	-0.21	0.48	-0.23	0.81	0.81	PR-02
11/09/2018	0.70	0.17	0.15	-0.44	0.58	0.30	0.20	-0.21	0.61	0.28	-0.53	-0.59	0.66	0.68	0.22	-0.51	0.84	0.31	0.06	-0.53	0.58	0.20	0.68	0.68	PR-02
12/09/2018	0.87	0.29	0.13	-0.85	0.45	0.02	-0.28	-0.15	1.18	0.03	-0.25	-0.83	0.91	0.12	-0.55	-0.86	0.79	0.30	-0.01	-0.43	0.87	0.13	0.30	0.30	PR-01
13/09/2018	1.12	0.31	0.02	-0.58	0.62	0.05	0.04	-0.36	1.13	0.34	0.36	-1.04	0.85	0.72	0.70	0.04	0.86	0.16	-0.17	-0.25	0.62	0.04	0.72	0.72	PR-02
14/09/2018	0.70	0.22	-0.08	-0.13	0.57	0.23	0.16	-0.33	1.18	0.30	-0.03	-1.12	0.70	0.39	-0.30	-0.47	0.71	0.07	-0.08	-0.25	0.57	0.16	0.39	0.39	PR-02
15/09/2018	0.42	0.15	-0.07	-0.38	0.57	0.13	-0.10	-0.26	1.13	0.14	-0.15	-1.10	0.83	0.16	-0.22	-0.18	0.96	0.09	0.02	-0.37	0.57	-0.10	0.16	0.16	PR-02
16/09/2018	0.62	0.42	0.28	-0.58	0.61	0.18	0.05	-0.25	1.40	0.57	0.42	-1.09	1.12	0.29	0.13	0.61	0.88	0.14	0.05	-0.42	0.61	0.05	0.57	0.57	PR-02
17/09/2018	0.78	0.36	-0.06	-0.18	0.77	0.32	0.14	-0.44	1.43	0.66	0.09	-1.22	0.71	0.10	-0.18	-0.49	0.98	0.02	-0.11	-0.44	0.77	0.14	0.66	0.66	PR-02
18/09/2018	0.55	0.40	0.04	-0.16	0.80	0.27	-0.04	-0.48	1.69	0.47	-0.19	-1.67	0.76	0.76	0.66	-0.33	0.82	0.19	0.17	-0.45	0.80	-0.04	0.76	0.76	PR-02
19/09/2018	0.93	0.68	0.28	-0.92	0.80	0.35	0.07	-0.58	1.42	0.02	-0.44	-1.22	1.02	0.55	-0.21	0.45	1.46	0.47	0.28	-0.45	0.80	0.07	0.68	0.68	PR-02
20/09/2018	0.52	0.39	-0.29	-0.42	0.86	0.04	-0.31	-0.51	1.38	0.43	0.41	-1.27	0.86	0.11	-0.44	-0.46	1.47	0.52	0.05	-0.66	0.86	-0.31	0.52	0.52	PR-02
21/09/2018	0.79	0.14	-0.24	-0.66	1.05	0.52	0.48	-0.70	1.46	0.14	-0.29	-1.42	1.11	0.76	0.64	-0.45	1.23	0.04	-0.48	-0.52	1.05	0.48	0.76	0.76	PR-02
22/09/2018	1.14	0.19	0.05	-1.14	0.82	0.17	-0.35	-0.41	1.45	0.46	0.31	-1.09	0.81	0.20	-0.56	-0.51	0.92	0.12	0.08	-0.56	0.82	-0.35	0.46	0.46	PR-02
23/09/2018	0.71	0.00	-0.19	-0.60	0.95	0.40	0.23	-0.68	1.59	0.50	0.04	-1.36	0.96	0.38	0.18	-0.59	1.46	0.27	0.15	-0.46	0.95	0.23	0.50	0.50	PR-02
24/09/2018	1.16	0.05	0.05	-1.11	1.23	0.10	-0.30	-0.87	1.09	0.43	-0.07	-0.87	1.26	0.57	0.19	-0.09	1.05	0.23	-0.04	-0.32	1.23	-0.30	0.57	0.57	PR-02
25/09/2018	0.88	0.07	0.01	-0.80	1.40	0.02	-0.08	-1.20	1.70	0.05	-0.39	-1.35	1.36	0.28	-0.29	-0.96	1.06	0.14	-0.09	-0.60	1.40	-0.08	0.28	0.28	PR-02
26/09/2018	1.02	0.21	0.14	-0.89	1.09	0.09	0.08	-0.74	1.62	0.46	0.41	-1.45	1.39	0.68	0.39	-1.02	0.86	0.03	-0.11	-0.46	1.62	0.41	0.68	0.68	PR-03
27/09/2018	0.89	0.02	-0.20	-0.64	1.26	0.10	0.01	-0.61	1.58	0.06	-0.40	-1.28	1.64	0.12	-0.55	-1.37	0.68	0.12	0.10	-0.50	1.26	0.01	0.12	0.12	PR-02
28/09/2018	1.00	0.08	0.06	-0.91	1.26	0.07	-0.03	-0.80	1.91	0.17	0.11	-1.45	1.52	0.62	0.49	-0.47	1.07	0.27	0.15	-0.40	1.26	-0.03	0.62	0.62	PR-02
29/09/2018	0.98	0.09	0.02	-0.86	1.21	0.04	-0.03	-0.49	1.97	0.29	0.12	-1.57	1.75	0.80	0.19	-0.62	1.30	0.39	0.12	-0.50	1.21	-0.03	0.80	0.80	PR-02
30/09/2018	1.07	0.18	0.08	-0.94	1.18	0.30	0.26	-0.61	1.98	0.47	0.18	-1.26	1.99	0.02	-0.78	-0.72	0.84	0.33	-0.07	-0.41	1.98	0.18	0.47	0.47	PR-03

Con respecto al desplazamiento acumulado:

De los prismas de monitoreo monitoreados, el mayor desplazamiento acumulado es de 1.99 cm al 30-09-2018, tal como se muestra en el grafico siguiente:

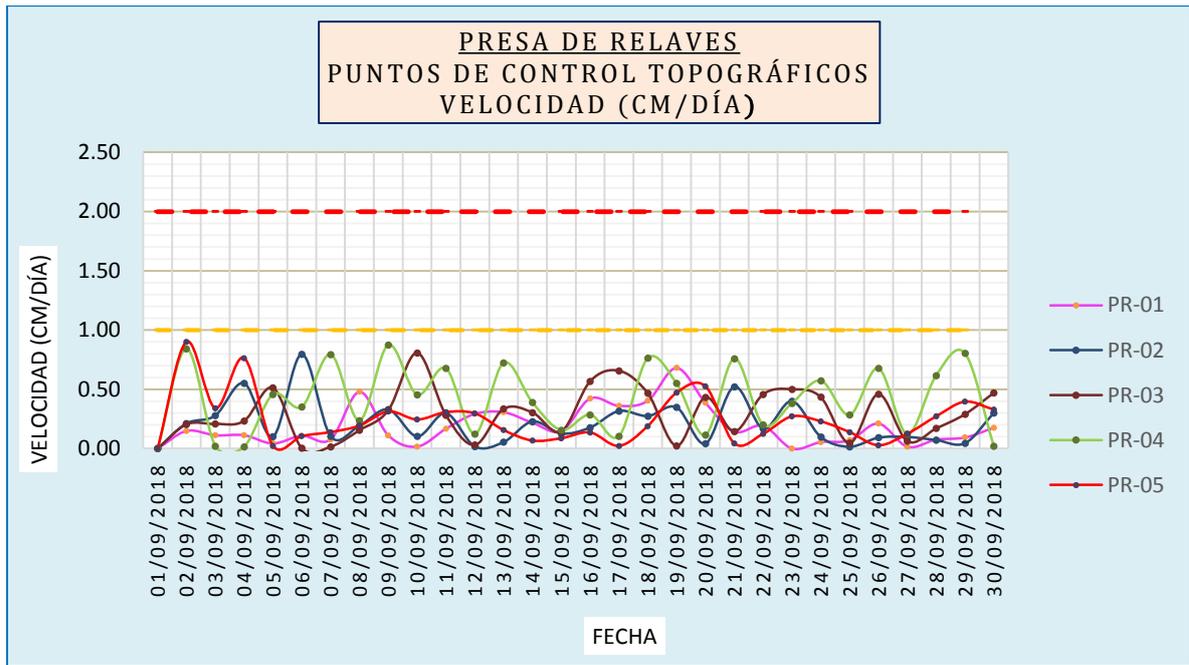


Gráfica 23. Análisis de desplazamiento acumulado

Con respecto a la velocidad:

Analizando la velocidad de desplazamiento, observamos que el punto PR-03 presenta mayor velocidad de desplazamiento equivalente a 0.47 cm/día el 30-09-18; sin embargo, fechas anteriores de monitoreo 29-09-2018 y 28-09-2018 registraron una velocidad de 0.29 cm/día y 0.17 cm/día; por lo que se puede sustentar que dicha variación se debe a márgenes de errores debidos a la interferencia y bruscos cambios climáticos a la hora que el Equipo Robot Leica realiza el registro de datos.

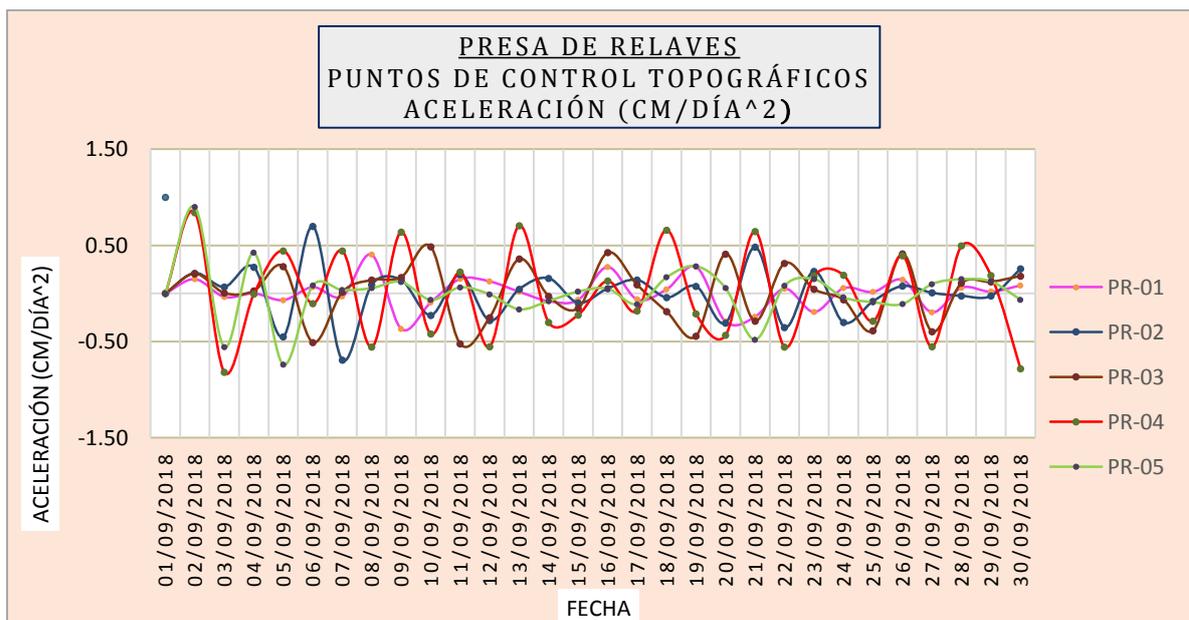
Es importante indicar que los 5 puntos de monitoreo muestran velocidades de desplazamiento, de acuerdo al cuadro de estándar de criticidad y de Nivel 1, Condición Tolerable(≤ 1 cm/día); por lo que se afirma que la presa es superficialmente estable. El comportamiento de la velocidad de desplazamiento de los puntos monitoreados se presenta en el siguiente gráfico:



Gráfica 24. Análisis de la velocidad relativa de desplazamiento

Con respecto a la aceleración:

Analizando la aceleración de desplazamiento determinamos que el punto PR-02 presentó mayor magnitud (0.26 cm/día^2) el 30-09-2018; sin embargo, fechas anteriores como el 29-09-2018 y 28-09-2018 se observa una desaceleración de -0.03 cm/día^2 . En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la aceleración de los puntos monitoreados:



Gráfica 25. Análisis de aceleración relativa de desplazamiento

Con respecto a los vectores de deformación:

Analizando los vectores de desplazamiento resultante determinamos que el punto PR-01, de acuerdo a la Gráfica 4; el punto PR-02, de acuerdo a la Gráfica 8; el punto PR-03, de acuerdo a la Gráfica 12; el punto PR-04, de acuerdo a la Gráfica 16 y el punto PR-05, de acuerdo a la Gráfica 20 presentan una dirección de desplazamiento hacia el NE (hacia la cara libre de la presa), tal como se obtuvo de los vectores resultantes de los desplazamiento obtenidos del software Geomos Analyzer, los mismos que en plano han sido plasmados teniendo como base el estándar de criticidad.

4.2.2. Análisis de movimientos en el interior del dique de la presa de relaves

Para determinar el comportamiento interno de la presa de relave se utilizó un inclinómetro de 45.5 m de profundidad, el cual de acuerdo al comportamiento mostrado en la Tabla 34 y datos mostrados en el Anexo 4, se observa que el inclinómetro presenta mayor deformación entre los 7-19 m de profundidad; sin embargo, no representa riesgo alguno ni se evidencia que haya una tendencia clara de deformación hacia la cara del talud; no obstante, se debe continuar con el monitoreo para el control de estabilidad de la presa de relaves, a continuación se muestra en la Tabla 34 los resultados del análisis del monitoreo:

Tabla 34. Resumen de deformaciones de acuerdo al inclinómetro 3

<u>PRESA DE RELAVES: ANÁLISIS DEL INCLINÓMETRO 3 - SETIEMBRE 2018</u>								
	Con dirección a la cara del talud		Con dirección opuesta a la cara del talud		Con respecto al eje paralelo a la presa con dirección al flanco SE		Con dirección al flanco NO	
Fecha de monitoreo	A+		A-		B+		B-	
	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura	Profundidad	Lectura
25/07/2018 Inicio de monitoreo	18.62 m	0.0000 mm	11.03 m	0.0000 mm	7.69 m	0.0000 mm	18.40 m	0.0000 mm
08/09/2018 Fecha anterior de monitoreo		0.4477 mm		0.4058 mm		2.4638 mm		1.3876 mm
26/09/2018 Fecha último monitoreo		0.2046 mm		1.2202 mm		4.1599 mm		1.6087 mm
N° de días	18.62 m	18	11.03 m	18	7.69 m	18	18.4 m	18
Deformación relativa		-0.2431 mm		0.8144 mm		1.6961 mm		0.2211 mm
Velocidad relativa		0.0135 mm/día		0.0452 mm/día		0.0942 mm/día		0.0123 mm/día
N° de días acumulados		63		63		63		63
Deformación acumulada		0.2046 mm		1.2202 mm		4.1599 mm		1.6087 mm
Velocidad acumulada		0.0032 mm/día		0.0194 mm/día		0.0660 mm/día		0.0255 mm/día

4.2.3. Análisis del comportamiento del agua

Con referencia a la variación del nivel freático, los niveles de agua leídos en los diferentes piezómetros muestran cierta variación que de acuerdo a la Tabla 31 y Gráfica 21 fue el piezómetro DR-01-09 el que presentó mayor descenso de agua 2.43 m referente a la medición anterior (17/08/2018), asimismo; con referencia al nivel freático inicial (4ta etapa de recrecimiento en el 2016) y de acuerdo al Anexo 6 se evidencia un descenso de agua de 22.78 m ; lo que indica que el comportamiento del agua es favorable para la estabilidad de la presa; sin embargo, se debe continuar con el monitoreo.

4.2.4. Plan y medidas de contingencia

Ante un eventual riesgo de fallamiento o ruptura de la presa de relaves, se debe contar con un plan de contingencia que contenga y evalúe el posible evento a suceder, las medidas de contingencia y las actividades a realizar después de ocurrido el evento, por lo que en trabajo conjunto con los responsables del área de Hidrogeología y Medio Ambiente de Sociedad Minera Corona se propuso, elaboró y aprobó el plan de contingencia para la presa de relaves; tal como se contempla en la Tabla 35 y Tabla 36:

Tabla 35. Plan de contingencia para la presa de relaves -1

PLAN DE CONTINGENCIA PARA LA PRESA DE RELAVES – U.M. YAURICOCHA				
Evento	Descripción	Tipo de Evento	Medida de Contingencia	Actividades post -evento
Erosión de taludes				
ET-1	Erosión de taludes del depósito de relaves	Eventual, puede ocurrir durante ocurrencia de precipitaciones	Evitar la acumulación de agua de lluvia a nivel de la plataforma de la presa, y evacuar las aguas	El material erosionado de los taludes, deben ser acondicionadas en el mismo talud o retiradas
Inestabilidad de los taludes				
IT-1	Inestabilidad de taludes del depósito de relaves	Eventual, puede ocurrir durante ocurrencia de precipitaciones significativas y sismos fuertes	Personal o maquinaria debe alejarse, hacia la ladera izquierda y alejarse al menos 20 m del coronamiento del talud.	Verificar la magnitud de la inestabilidad del talud, verificar y caracterizar la presencia de agrietamiento, realizar monitoreo continuo.
Agrietamiento de taludes				
AT-1	Agrietamiento de taludes de la presa del depósito de relaves	Eventual, puede ocurrir durante ocurrencia de precipitaciones significativas y sismos fuertes.	Verificar y caracterizar extensión y ancho del agrietamiento y proceder al sellado de la grieta	Solicitar la evaluación del diseñador de la presa para la aplicación de la medida correctiva de mediano y largo plazo.
Eventos Hidrológicos				
H-1	Lluvias normales. Eventos de precipitación con período de retorno menor a 10 años-24 horas equivalente a 35mm	Eventual-ocurre en época de lluvias diciembre a abril	Las aguas colectadas serán descargadas mediante bombas portátiles y tuberías HDPE de 4".	Reconocimiento de la plataforma de la presa de relaves y zona de descarga del agua de lluvia.
H-2	Lluvias moderadas a fuertes. Eventos de precipitación con período de retorno menor a 100 años-24 horas equivalente a 35 a 52 mm	Eventual puede ocurrir en épocas de lluvias: diciembre a abril	Las aguas colectadas serán descargadas mediante bombas portátiles y tuberías HDPE de 4".	Reconocimiento de la plataforma de la presa de relaves y zona de descarga del agua de lluvia, verificación de erosión del talud y plataformas
H-3	Lluvias extraordinarias. Eventos de precipitación con período de retorno mayor a 100 años-24 horas equivalente a 52mm hasta 67 mm	Eventual-puede ocurrir en época de lluvias: diciembre a abril	Las aguas colectadas serán descargadas mediante bombas portátiles y tuberías HDPE de 4".	Reconocimiento de la plataforma de la presa de relaves y zona de descarga del agua de lluvia, verificación de erosión del talud y plataformas

Tabla 36: Plan de contingencia para la presa de relaves -2

PLAN DE CONTINGENCIA PARA LA PRESA DE RELAVES – U.M. YAURICOCHA				
Eventos sísmicos				
S-1	Sismos moderados a leves. Sismos de intensidad VI o inferior en la escala de Mercalli Modificado	Eventual, ocurre en cualquier momento	Evacuación de personal y maquinaria fuera del área del depósito de relaves por un período de tiempo de 1 hora luego de ocurrido el sismo	Reconocimiento de la plataforma de desecado de relaves en las zonas del coronamiento del talud, reconocimiento del área de la presa y toma de datos de la instrumentación geotécnica de la presa de relaves.
S-2	Sismos fuertes a terremotos. Sismos de intensidad VII o mayor en la escala de Mercalli Modificado	Eventual - ocurre en cualquier momento	Evacuación de personal y maquinaria fuera del área del depósito de relaves por un período de tiempo de 12 horas luego de ocurrido el sismo	Reconocimiento del depósito de relaves, dique de contención, talud y caminos de acceso. Toma de datos de la instrumentación geotécnica de la presa de relaves y visita de inspección de personal especializado antes de las 24 horas de ocurrido el evento sísmico.
Monitoreo Geotécnico - Área Presa de Relaves				
MG-1	Nivel freático a una altura mayor a 1 m sobre el nivel del terreno de cimentación al pie de la presa de relaves Yauricocha	Eventual, evento no esperado que ocurra durante la operación del depósito de relaves	Verificar la operación del drenaje y el comportamiento de las filtraciones en el talud de la presa	Medición de las filtraciones al pie de la presa y del nivel de agua de la instrumentación. Las mediciones deben ser interdiarias.
MG-2	Variaciones bruscas del nivel freático (mayores a 1 m en un período de tiempo de 15 días o menor)	Eventual, evento no esperado.	Verificación de la instrumentación geotécnica y verificar si es una medición errática que sube y baja en valores. La verificación debe ser interdiaria y por 15 días calendarios. Se deberá verificar al mismo tiempo las variaciones del nivel del embalse.	Verificación del comportamiento del agua y de la estructura mediante los piezómetros y el inclinómetro, de mantenerse las variaciones bruscas del nivel freático, programar la visita de inspección de personal especializado.
MG-3	Desplazamientos superficiales mayores a 2 cm/día.	Eventual, evento no esperado	Verificación de los equipos y prismas de monitoreo GPR112 utilizados para el monitoreo. Se verificará el dique de la presa de relaves para ver algún agrietamiento o deformación.	Realizar un levantamiento topográfico con teodolito para la correlación de datos y determinar la veracidad de los desplazamientos u observar posibles errores que se estén dando en los equipos de medición.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Se demostró que para el control y monitoreo de estabilidad de la presa de relaves de Unidad Minera Yauricocha, fue necesario e imprescindible implementar un sistema de monitoreo basado en la instrumentación geotécnica, el mismo que se consolidó con la instalación de prismas de monitoreo GPR112, un inclinómetro portátil y piezómetros tipos Casagrande, que sirvieron para evaluar y analizar los posibles movimientos superficiales, movimientos en el interior del dique de la presa de relaves, evaluar el comportamiento del nivel del agua y su afectación en la presa de relaves, comprobándose y garantizándose la estabilidad de la presa de relaves.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ☞ Los factores geotécnicos que influyen en la estabilidad de la presa de relaves son las condiciones del talud, características hidrológicas, borde libre mínimo, granulometría de los materiales, movimientos superficiales e internos en el talud del dique de contención de la presa de relaves y filtraciones de agua.

- ☞ El sistema de auscultación o monitoreo implementado en la presa de relaves de Unidad Minera Yauricocha se basó en los objetivos de monitoreo, en la evaluación de parámetros a monitorear, y en la selección de la instrumentación geotécnica idónea, por lo que se instaló prismas de monitoreo automatizados GPR112, un inclinómetro portátil y 3 piezómetros tipo Casagrande con transductor eléctrico.

- ☞ Los trabajos de implementación e instalación de los instrumentos geotécnicos fueron ejecutados de manera óptima, logrando a través del registro de datos y análisis de los mismos la evaluación de movimientos superficiales y velocidades de desplazamiento que son menores a 1 cm/día, movimientos en el interior del dique de la presa de relaves y velocidad de deformación que es menor a 0.5 cm/día y análisis del comportamiento del agua que con respecto al último registro del 2016, el nivel del agua ha descendido 22.78 m; por lo que partir de dicho monitoreo geotécnico y de acuerdo a los estándares de criticidad, se determinó que la presa de relaves es estable.

5.2. RECOMENDACIONES

- ☞ Se recomienda mantener el sistema de monitoreo implementado para así llevar un control continuo de la estabilidad de la presa de relaves.
- ☞ Uso y manipuleo adecuado de los diferentes instrumentos utilizados para el monitoreo y control geotécnico de la presa de relaves para evitar errores en las mediciones y deterioro de los instrumentos.
- ☞ Al realizar el monitoreo y registro de datos con el inclinómetro ser minuciosos a la hora de tomar los datos con el inclinómetro; para tener un margen de error mínimo en los datos.
- ☞ Considerar que los equipos de monitoreo, deben estar en constante revisión para su eficiente funcionalidad; a la vez, dichos equipos deben enviarse a su calibración de manera anual.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson et al. 1999. Slope Stability and Stabilization Methods. (en línea). New York, EE.UU. 736 p. Consultado 01 jun. 2018. Disponible en https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=cOI02OqUCdMC&oi=fnd&pg=IA2&dq=Slope+Stability+and+Stabilization+Methods.+libro&ots=ZS_1w16Igg&sig=60ufEjxuFKA7RMV5LMZ4FRta7T8#v=onepage&q=Slope%20Stability%20and%20Stabilization%20Methods.%20libro&f=false
- Abramson, L. 2002. Slope Stability and Stabilization Methods. (en línea). New York, EE. UU. 712 p. Consultado 06 jun. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/255222923_Slope_Stability_and_Stabilization_Methods
- Alegría, V. 2009. Procesamiento y presentación de datos de instrumentación de la presa del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís. Tesis Lic. Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 98 p.
- Alonso, E. 1989. Estabilidad de taludes. Barcelona, España. Universidad Politécnica de Catalunya. 61p.
- Alva y Escalaya. 2011. Instrumentación geotécnica de la Presa Pillones. Tesis Lic. Lima, Perú, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. 97 p.
- ASCE (American Society of Civil Engineers). 2000. Metodología para el diseño por confiabilidad de presas de relaves construidas en arena por el método aguas abajo. (en línea). Virginia, EE.UU. 143 p. Disponible en <https://repository.javeriana.edu.co:8443/bitstream/handle/10554/16808/RiveroGalvisNatyVanesa2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barrios, G. 2012. Análisis Sísmico 2D de una presa de relaves espesados considerando la existencia de grietas por desecación. Tesis Mag. Santiago de Chile, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. 143 p.

- CDA (Canadian Dam Association). 2014. Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams. (en línea). Edmonton, Alberta, Canadá. 27 p. Consultado 17 de jun. 2018. Disponible en https://www.mountpolleyreviewpanel.ca/sites/default/files/SUB00015_2014-12-07_CDA.pdf
- Cesel. 2006. Estudio Peligro Sísmico Plan de Cierre UP Yauricocha. Reporte preparado para Sociedad Minera Corona, Agosto 2006. Lima, Perú. 68 p.
- Cesel. 2007. Ingeniería de Detalle para el nuevo Recrecimiento del Dique de Relaves de la Unidad de Yauricocha. Lima, Perú. 102 p.
- Cornforth, D. 2005. Landslides in Practice. (en línea). EE.UU. 622 p. Consultado 08 de jun. 2018. Disponible en <https://es.scribd.com/doc/181341560/Landslides-in-practice-pdf>
- Corominas, J. 2000. Ingeniería del terreno: Tipos de rotura en laderas y taludes. (en línea). Cataluña, España. 213 p. Consultado 11 de jun. 2018. Disponible en http://www.academia.edu/12392886/TIPOS_DE_ROTURA_EN_LADERAS_Y_TALUDES
- DCR Ingenieros S.R.L. 2012. Evaluación Geomecánica Mina Yauricocha. Informe técnico. Lima, Perú. 54 p.
- Dunnicliff, J.1993. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Ed. Green GE. Massachusetts, EE.UU. 600 p.
- Durham.2004. Monitoreo del terreno mediante instrumentación geotécnica (en línea). 114 p. Consultado el 15 de jun. 2018. Disponible en <https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/1224/6MarcoTeorico.pdf;sequence=6>
- Espejo y Véliz. 2013. Aplicación de la Extensión para la Construcción de la Guía del Pmbok - Tercera Edición, en la Gerencia de Proyecto de una Presa de Relaves en la Unidad Operativa Arcata-Arequipa. Tesis. Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú. 111 P.

- Espinace, R. 2015. Depósito de relaves: Consideraciones en su manejo. Tesis Dr. Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 74 p.
- Garzón, J. 2011. Evaluación de asentamientos por consolidación generada por descenso del nivel freático. Tesis Mag. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 120 p.
- Geoinstruments. 2017. Geotecnia aplicada (en línea, sitio web). Consultado 19 de jun. 2018. Disponible en <http://www.geoinstrumentsinternational.com/#!>
- Geoservice Ingenieria S.A.C.2014. Estudio Definitivo de la Sobreelevación del Depósito de Relaves Yauricocha. Reporte preparado para Sociedad Minera Corona S.A. Lima, Perú. 151p.
- Hanna, T. 1985. Field instrumentation in geotechnical engineering. (en línea). Massachusetts, EE.UU. 843 p. Consultado 03 de jun. 2018. Disponible en <http://www.worldcat.org/title/field-instrumentation-in-geotechnical-engineering/oclc/12190502>
- Herrera y Rivas. 2000. Auscultación e instrumentación Geotécnica de Taludes. Resumen de Jornadas Técnicas sobre Taludes y Laderas Inestables. Madrid. España. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. 20 p.
- Hoek y Bray. 1981. Rock slope engineering. Civil and Mining. (en línea). London, Reino Unido. 456 p. Consultado 06 de jun. 2018. Disponible en https://civilengineering.files.wordpress.com/2014/10/rock_slope_engineering_civil_and_mining.pdf
- Hoyos, F. 2012. Suelos Residuales Tropicales. (en línea). Medellín, Colombia. 235 p. Consultado 29 de may. 2018. Disponible en http://www.academia.edu/1441081/SUELOS_RESIDUALES_TROPICALES_-_GEOLOGICAL_SOCIETY
- Hynes-Griffin, M. y Franklin, A.1984. Rationalizing the seismic coefficient method (en línea). Mississippi, USA. 41 p. Consultado 11 de jun. 2018. Disponible en http://acwc.sdp.sirsi.net/client/en_US/default/index.assetbox.assetactionicon.view/1003264

- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Geotecnia en ingeniería de presas. (en línea). México. 583 p. Consultado 11 de jun. 2018. Disponible en <https://es.scribd.com/doc/307251648/GEOTECNIA-EN-INGENIERIA-DE-PRESAS-pdf>
- Klohn Crippen Berger S.A. 2007. Estudio de Alternativas de Recrecimiento del Dique del Depósito de Relaves Yauricocha. Lima, Perú. 199 p.
- Linares, E. 2007. Diseño de Presa de Relaves. Tesis Mag. Lima, Perú, Universidad Nacional de Ingeniería. 119 p.
- Media et al. 2017. Instrumentación Geotécnica de presas (en línea). Lima, Perú. Consultado 22 ago. 2017. Disponible en <https://docplayer.es/54266400-Instrumentacion-geotecnica-de-presas-dam-geotechnical-instrumentation.html>
- Melentijevic, S. 2005. Estabilidad de Taludes en Macizos Rocosos con Criterios de Rotura No Lineales y Leyes de Fluencia No Asociada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Mendoza et al. 2002. Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento. Informes Técnicos. CENAPRED. México. 80 p.
- Mikkelsen, P. 1996. Field instrumentation. Chapter 11 in Landslides investigation and mitigation (en línea). EE.UU. 316 p. Consultado 11 de jun. 2018. Disponible en https://books.google.com.pe/books?id=V40gBCU53nMC&pg=PA567&dq=Mikkelsen,+P.E.,+1996.+Field+instrumentation.&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjz7uGW_bveAhUMkJAKHSi4CHsQ6AEIJzAA#v=onepage&q=Mikkelsen%2C%20P.E.%2C%201996.%20Field%20instrumentation.&f=false
- Ministerio de Energía y Minas (MEM, 1997). Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina. Lima, Perú. 191 p.
- Oliva, A. 2015. Instrumentación y Control de Taludes y Laderas (en línea). Grupo ITEICO Euroamericano. 23 p. Consultado 11 de jun. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/324507431_Instrumentacion_y_control_de_taludes_y_laderas

- Obando, E. 2009. Sistemas de Monitoreo y Control de la Estabilidad de Taludes Rocosos y Suelo. Resumen ejecutivo. Huelva, España. 9 p.
- Osinermin. 2017. Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas. Lima, Perú. 268 p.
- Rico et al. 2008. Geotecnia y vías terrestres (en línea). México. 532. Consultado 06 de jun. 2018. Disponible en <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/Libro/lb6.pdf>
- Rodríguez y Oldecop. 2011. Humedad y Estabilidad Geotécnica de Presa de Relaves. Curso de capacitación profesional en Aspectos relacionados a la hidrología e hidroquímicas en zonas mineras del sur del Ecuador. Quito, Ecuador. 44 p.
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). 2018. Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanetes (en línea). Valparaíso, Chile. 161 p. Consultado 01 de jul. del 2018. Disponible en http://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/04/Guia_Metodologica_E_Fisica.pdf
- SRK Consulting. 2016. Modelo Geotécnico (Versión 1) Mina Yauricocha Provincia Yauyos, Perú. 175 p.
- Suarez, J. 1998. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander. 541 p.
- Suarez, J. 2009. Deslizamientos: Análisis geotécnico. (en línea). Bucaramanga, Colombia. 725 p. Consultado 08 de jun. 2018. Disponible en <https://civilgeeks.com/2013/03/08/deslizamientos-analisis-geotecnico-libro/>
- SVS Ingenieros S.A.C., 2012. Verificación de la Estabilidad Física del Depósito de Relaves Yauricocha. Reporte preparado para Sociedad Minera Corona S.A. Lima, Perú. 85 p.
- Tavera, H., 2012. Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Lima, Perú. 92 p. Consultado el 11 de jun. 2018. Disponible en http://www.datosabiertos.gob.pe/sites/default/files/recursos/2017/06/Zonificacion_Sismica_Geotecnica_IGP_Huaycan.pdf

Tierra Group. 2016a. Criterios de Diseño del Proyecto. Memorándum Técnico preparado para Sociedad Minera Corona S.A. Lima, Perú. 46 p.

Tierra Group. 2016b. Reporte de Investigaciones Geotécnicas. Memorándum Técnico preparado para Sociedad Minera Corona S.A. Lima, Perú. 78 p.

Tierra Group. 2016. Yauricocha Stability. Memorándum técnico. Lima, Perú. 9 p.

ANEXOS

ANEXO 1: Resumen del estudio de estabilidad de la presa de relaves - SMCSA

ANEXO 2: Plano de la geología local de U.M. Yauricocha

ANEXO 3: Plano general de Instrumentación geotécnica

ANEXO 4: Data inclinométrica del monitoreo de la presa de relaves

ANEXO 5: Plano de la dirección y criticidad de los desplazamientos superficiales y Lisp creado para dibujar en autocad los vectores de desplazamiento.

ANEXO 6: Sección geológica – geotécnica de la presa de relaves

ANEXO 7: Fichas técnicas de los instrumentos geotécnicos implementados

- Prisma de monitoreo GPR 112
- Sistema de inclinómetro digital GK-604D
- Medidor de Nivel de agua 101 P7