



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE EXCAVACIÓN EN ROCA SUPERFICIAL Y SUBMARINA  
PARA LA AMPLIACIÓN DE UN CANAL DE NAVEGACIÓN,  
CANAL VENTANAS, MANZANILLO, COLIMA

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA  
PRESENTAN:  
ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ  
JOSÉ I. IBARRA QUINTERO

DIRECTOR DE TESIS:  
ING. MAURICIO MAZARI HIRIART



MÉXICO D.F.

2005



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Gracias muy especialmente a nuestros padres, que con su gran esfuerzo y apoyo han permitido nuestro desarrollo humano y profesional.

Gracias a todos nuestros profesores de quienes hemos aprendido no solo la teoría, sino también la responsabilidad y dedicación.

Gracias a todas aquellas personas que han enriquecido nuestro camino.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-1378

**SR. JOSÉ ISABEL IBARRA QUINTERO**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Mauricio Mazari Hiriart y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero de Minas y Metalurgista:

**“PROYECTO DE EXCAVACIÓN EN ROCA SUPERFICIAL Y SUBMARINA PARA LA  
AMPLIACIÓN DE UN CANAL DE NAVEGACIÓN, CANAL Y VENTANAS, MANZANILLO,  
COLIMA”**

	<b>INTRODUCCIÓN</b>
	<b>RESUMEN</b>
<b>I</b>	<b>ESTUDIOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS</b>
<b>II</b>	<b>ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</b>
<b>III</b>	<b>MÉTODOS OPCIONALES DE EXCAVACIÓN DEL CANAL DE VENTANAS</b>
<b>IV</b>	<b>SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN</b>
<b>V</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO SELECCIONADO</b>
<b>VI</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>
	<b>ANEXO</b>

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar, en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis, el título de ésta.

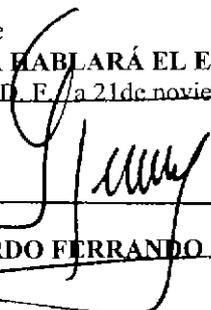
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

Cd. Universitaria, D. F. / a 21 de noviembre de 2005.

**EL DIRECTOR**

  
M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB\*JAGC\*vgc





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-1377

**SRITA. ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ**  
**Presente**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Mauricio Mazari Hiriart y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero de Minas y Metalurgista:

**“PROYECTO DE EXCAVACIÓN EN ROCA SUPERFICIAL Y SUBMARINA PARA LA AMPLIACIÓN DE UN CANAL DE NAVEGACIÓN, CANAL Y VENTANAS, MANZANILLO, COLIMA”**

	<b>INTRODUCCIÓN</b>
	<b>RESUMEN</b>
<b>I</b>	<b>ESTUDIOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS</b>
<b>II</b>	<b>ESTUDIOS GEOTÉCNICOS</b>
<b>III</b>	<b>MÉTODOS OPCIONALES DE EXCAVACIÓN DEL CANAL DE VENTANAS</b>
<b>IV</b>	<b>SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN</b>
<b>V</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO SELECCIONADO</b>
<b>VI</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>
	<b>ANEXO</b>

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar, en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis, el título de ésta.

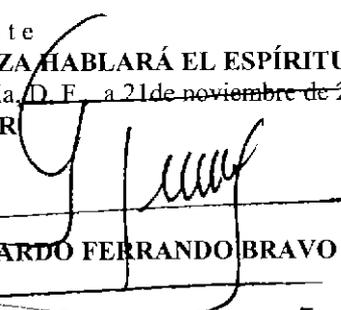
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

Cd. Universitaria, D. F. a 21 de noviembre de 2005.

**EL DIRECTOR**

  
**M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO**

GFR\*JAGC\*vgc

# INDICE

## Introduccion

## Resumen

### I. Estudios Geologicos - Geofísicos

- I.1 Geologia de Detalle del Canal Ventanas
- I.2 Geología Estructural del Canal Ventanas
- I.3 Exploracion Directa Barrenos a Diamante
- I.4 Integracion Geologico - Geofísica

### II. Estudios Geotecnicos

- II.1 Caracterizacion Geomecanica
- II.2 Pruebas de Corte Directo
- II.3 Analisis de Estabilidad

### III. Metodos Opcionales De Excavacion Del Canal Ventanas

- III.1 Excavacion Convencional en Tierra Firme por Arriba del Nivel del Mar
- III.2 Excavacion Bajo El Mar en Seco
- III.3 Excavación Submarina sobre Barcazas o Plataformas
- II.4 Excavación Con Plataforma de Relleno

#### **IV. Selección Del Metodo De Excavacion**

- IV.1 Excavacion Bajo el Nivel +0.00 en Seco**
- IV.2 Excavacion Empleando Equipo sobre Barcazas o Plataforma**
- IV.3 Plataforma de Relleno**
- IV.4 Selección del Metodo**

#### **V. Descripción Del Metodo Seleccionado**

- V.1 Ciclo de Explotacion**
- V.2 Efecto de las Explosivos Submarinas**

#### **Conclusiones Y Recomendaciones**

- 1 Estabilidad**
- 2 Metodos de Excavacion**

#### **Bibliografia**

#### **Anexo**

**Planos**

## INTRODUCCIÓN

El proyecto se encuentra en la ciudad de Manzanillo Colima, en las inmediaciones de la Punta Campos, al Norte de Manzanillo y al pie del cerro El Faro, en el lugar llamado Canal Ventanas, el cual actualmente conecta al Océano Pacífico con la laguna Cuyutlán (Figura 1).



Figura 1. Localización del sitio de estudio

La llegada al Canal Ventanas se efectúa por el camino que parte del centro de la ciudad de Manzanillo hacia la Central Termoeléctrica o a Laguna de Cuyutlán, habiendo de transitar 3 km.

La Laguna de Cuyutlán y el Canal Ventanas conforman la zona de estudio prevista para la construcción de un Puerto y Canal de navegación que permitan el acceso de buques tanque que transportarán gas licuado, a la Terminal de la Central Termoeléctrica de CFE.

Debido al gran tamaño de los buques se requiere profundizar la Laguna de Cuyutlán y el Canal Ventanas, así como ampliar también sus dimensiones, a continuación se describen las modificaciones en las dimensiones de ambos sitios necesarias para permitir la navegación de los buques:

a) La Laguna de Cuyutlán requiere una superficie mínima de 300m de radio para permitir la maniobra de giro y llegada a puerto, en lo que respecta al fondo de la laguna es necesario bajar de la elevación actual de -5.00 msnm a la elevación -15.00 msnm (Ver plano 1).

b) El Canal Ventanas conecta a la Laguna de Cuyutlán con el Océano Pacífico y para acondicionarlo como Canal de Navegación es necesario ampliarlo en tierra firme y bajo el nivel del mar, de un ancho actual de 17.00 m hasta 175.00 m y de una elevación promedio de -5.0 msnm de profundidad hasta la elevación -17.00 msnm (Plano 1).

Un estudio de oceanografía propone la geometría de la excavación como se indica en el Plano 1. El proyecto de Canal de navegación presenta un rumbo de 85° al noroeste y su talud sur alineado con el canal actual.

Durante la excavación de ampliación se requerirá que permanezca abierto el canal que suministra agua para la operación de la central.

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar y seleccionar el método de excavación en roca bajo el nivel del mar más adecuado para el proyecto de ampliación del canal de navegación ubicado en el Canal Ventanas en Manzanillo Colima, desde el punto de vista técnico, para lo cual fueron requeridos estudios de geología, geofísica y mecánica de rocas.

Mediante los estudios Geológico-Geofísico se define el marco litológico del sitio Canal Ventanas y se caracteriza la calidad de la masa de roca hasta la elevación -17 msnm; Con los estudios geotécnicos se realizó un modelo para garantizar la estabilidad de los taludes finales del proyecto y también se caracterizaron las propiedades mecánica de las rocas a explotar para su posible uso en la construcción de las escolleras.

Se determinó dividir la región de excavación en dos etapas: Excavación por arriba del nivel del mar denominada "Excavación Superficial" y Excavación por abajo del nivel del mar denominada "Excavación Submarina".

Para la excavación superficial se define como único método aplicable, considerando las condiciones geológico-geofísicas, la explotación convencional en tierra firme con el ciclo de perforación, cargado, rezagado y acarreo.

Para la excavación submarina se proponen tres métodos, el primero consta de una explotación mixta combinando la excavación en seco bajo el nivel del mar y excavación empleando equipo montado sobre barcasas o plataformas, la segunda opción propone la posibilidad de realizar toda la excavación submarina con equipo montado sobre barcasas o plataformas, y en la tercera opción se propone la construcción de una plataforma de relleno a lo largo de toda el área del proyecto de canal, que provea de un piso firme para iniciar la explotación.

La selección del método se realiza tomando en cuenta las ventajas y desventajas que presenta cada método al desarrollar la excavación en la zona de estudio.

Las consideraciones financieras quedan fuera del presente trabajo, y deberán desarrollarse para sustentar la decisión final.

## I. ESTUDIOS GEOLÓGICOS-GEOFÍSICOS

De acuerdo a las necesidades del proyecto se efectuaron los estudios de Geología alrededor de la Laguna de Cuyutlán, la zona de estudio denominada Canal Ventanas, que se ubica en la subprovincia de la Sierras de la Costa de Jalisco y Colima comprendida en el cuadrángulo con las coordenadas UTM en el sistema WGS 84 (Figura 2).

N (Y) de	2 104 200 m	a	2 104 750 m
E(X) de	570 000	a	570 750 m

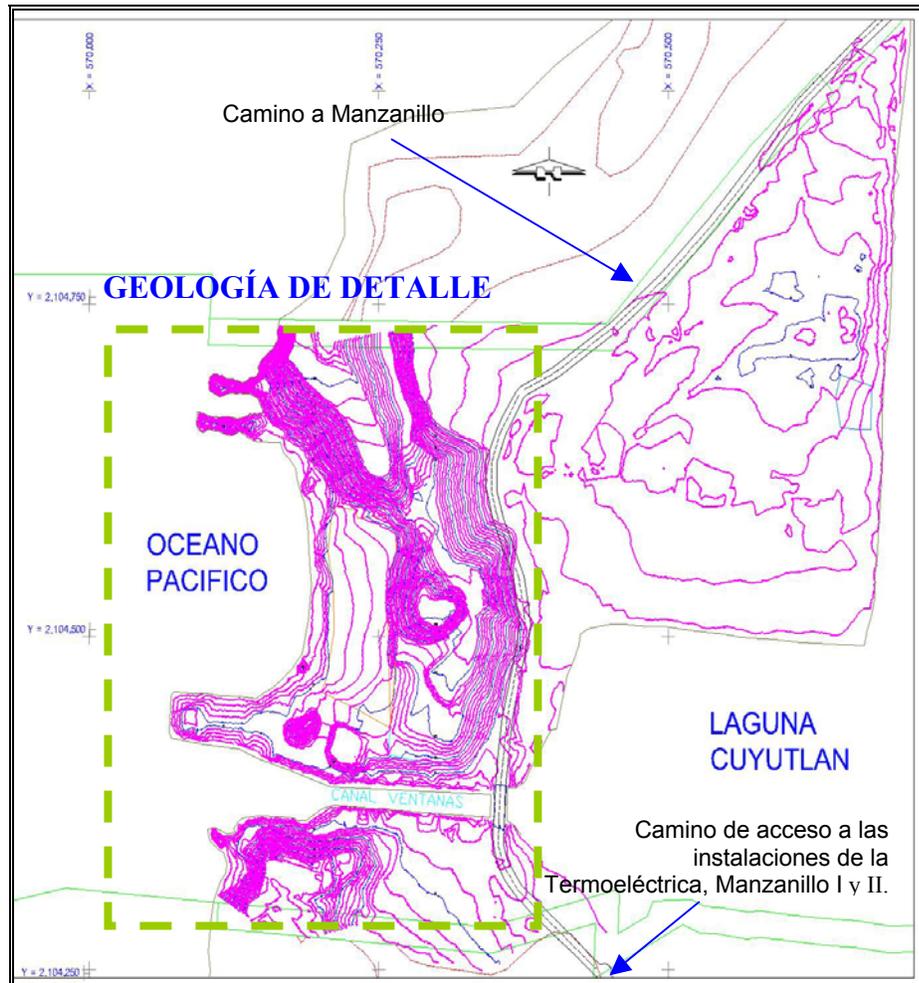


Figura 2. Área de estudio geológico de detalle.

## I.1 GEOLOGÍA DE DETALLE (CANAL VENTANAS)

El estudio de geología de detalle en el Sitio Canal Ventanas, abarca un área de 20 hectáreas, para facilitar el estudio se divide en dos partes tomando el eje del Canal Ventanas con una orientación casi E-W como línea de separación, así la margen Sur está ubicada en la parte donde queda el cerro con mayor altura, y la margen Norte se ubica donde están las instalaciones del Instituto de Investigación Pesquera, (Fotografía 1).



Fotografía 1. Vista de las márgenes Sur y Norte

Las unidades litológicas que se reconocieron en el sitio Canal Ventanas, fueron cartografiadas en el plano de Geología de Detalle (Plano 2), las cuales son andesitas(Tsvan), brecha andesítica(Tsvbran) y en menor proporción tobas cristalinas andesíticas(Tsvtc). Las andesitas son las de mayor extensión hacia ambas márgenes del Canal Ventanas, llegan a formar crestones de roca a lo largo de la línea de costa. En la parte central del canal se encuentra una brecha andesítica y en menor proporción una unidad de tobas cristalinas andesíticas, esta última con una área de exposición reducida, por lo que no se detalla en el plano.

### I.1.1 ESTUDIO DE LA MARGEN SUR

Hacia el sur podemos encontrar un paquete de roca andesítica, se considera que fue originada en el Terciario (Paleoceno al Eoceno, en CRM, 1994) durante el evento volcánico conocido regionalmente como Complejo Volcánico Inferior, en donde se

manifiestan las andesitas (Tsvan), brecha andesítica (Tsvbran) y toba cristalina andesítica (Tsvtc) (Fotografía 2).



Fotografía 2. Vista frontal de la margen Sur, viendo desde la margen Norte.

La andesita en estado sano es dura y compacta al golpe del martillo, de color gris oscura, verdosa y púrpura; intemperizada es de color amarillo ocre, verdosa y rojiza, y deleznable, esto depende del grado del fracturamiento y del intemperismo de la roca. La andesita está afectada por procesos hidrotermales como son: hematización, cloritización, epidotización, sericitización.

Entre las superficies de los flujos andesíticos, se encuentra material triturado que llega a formar bandas de color amarillo ocre y blanquecino por procesos hidrotermales, y llegan a encontrarse silicificadas, con presencia de vetillas de calcita, sulfuros diseminados (pirita y calcopirita) y óxidos de hierro (especularita)

Las brechas andesíticas se consideran como un evento volcánico que ocurrió de forma contemporánea a los derrames andesíticos, los afloramientos que existen en el área de estudio, son de menor extensión que los derrames andesíticos, las brechas andesíticas y los derrames de andesíticos se encuentran en contacto directo por una falla normal (Fotografía 3).



Fotografía 3. Detalle del contacto-directo por falla normal entre la brecha

La brecha andesítica es una roca muy dura y compacta, tiene una textura afanítica a piroclástica, y de epiclástica a samítica, presenta una matriz de grano fino con fragmentos líticos andesíticos de forma subangulosa a angulosa y subredondeados.

Las brechas andesíticas al igual que las andesitas, se encuentran afectadas por un grado de fracturamiento de persistente a medio, la mayoría de las fracturas son cerradas y discontinuas; las fracturas abiertas sólo lo están unos milímetros, pueden estar rellenas de calcita o cuarzo, que en pocos casos llegan a formar pequeñas concentraciones de estos minerales

### ***1.1.2 ESTUDIO DE LA MARGEN NORTE.***

Al igual que en la margen Sur, las unidades litológicas que afloran en esta margen Norte están representadas por derrames andesíticos y brechas andesíticas.

La brecha andesítica se observa en la parte del camino de acceso al mirador, el afloramiento presenta una forma de colina con una altura promedio de 15 m, las andesitas afloran básicamente en la periferia norte de la instalación del Instituto de Investigación Pesquera y continua hasta el mar, con las mismas características litológicas y alteraciones hidrotermales a las descritas en la margen Sur (Fotografía 4).

En ambas márgenes los materiales Cuaternarios que se apreciaron son los siguientes.

Depósito de litoral (QI)

Están constituidos por material de arenas de grano medio a fino, de color pardo, se presentan en las playas de las pequeñas bahías.



Fotografía 4. Panorámica de la margen Norte, en primer plano los afloramientos de brecha andesítica y al fondo la andesita, al centro el Instituto de Investigación Pesquera.

#### Depósito de talud (Qdt)

Se trata de material que se ha acumulado al pie de los cantiles y de la ladera de los cerros, está constituido por bloques angulosos a subangulosos y envueltos en una matriz areno-limosa de la propia roca de los alrededores.

#### Material de rezaga (Qr)

Corresponde a una extensión limitada de material y en especial a la margen Sur en la parte superior del cerro, que fue depositado debido a trabajos previos de remoción de materiales para implementarlos como relleno en la parte de la Termoeléctrica y en la zona de estudio.

## I.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL, SITIO CANAL VENTANAS

Habiendo efectuado los reconocimientos de campo en cada una de las márgenes del Canal Ventanas, se determinaron las siguientes características en relación al fracturamiento que presentan las rocas en ambas márgenes.

Las fracturas que se apreciaron son muy marcadas, van de continuas a subcontinuas con una longitud de hasta 40 metros promedio las más notorias, existen otras que son

de longitud y proyección mayor pero son escasas y propiamente se observaron hacia la margen Sur de los cantiles del mar.

La frecuencia de las fracturas varia de lugar y de afloramiento de roca en ambas márgenes, no existe una uniformidad o parámetro para establecer la intensidad de las fracturas, ésta puede ser desde ligera a muy intensa y se pueden encontrar con un rango menor de 3 a 4 fracturas subcontinuas por metro lineal o bien hasta 15 por metro lineal

Por las características y descripciones de ambas márgenes del canal y de los análisis estereográficos efectuados a los datos estructurales colectados se tienen las siguientes orientaciones preferenciales de las principales fallas y sistemas de fracturas encontradas (Tabla 1).

Tabla1. Resumen de las orientaciones preferenciales obtenidas para las diferentes discontinuidades en ambas márgenes del Canal Ventanas.

ORIENTACIÓN	MARGEN SUR		MARGEN NORTE	
	FALLAS	FRACTURAS	FALLAS	FRACTURAS
<b>N-S (F4)</b>	N12°E/77°NW N16°W/87°SW	N02°W/86°NE N21°W/47°SW	N13°W/41°SW	N06°W/79°NE N14°E/63°NW
<b>NE-SW (F3)</b>	N56°E/54°NW N69°E/50°NW	N29°E/34°SE N69°E/81°NW	N26°E/60°NW	N37°E/72°SE N64°E/88°SE N66°E/89°NW
<b>NW-SE (F2)</b>		N49°W/83°NE		N45°W/47°SW
<b>E-W (F1)</b>		N71°E/84°SE		N77°E/73°SE N87°E/85°NW

### I.3 EXPLORACIÓN DIRECTA BARRENOS A DIAMANTE

En el sitio de Canal de Ventanas, se programó una plantilla de ocho barrenos exploratorios con el fin de establecer el modelo geológico de la porción superficial y del subsuelo que corresponde a la zona que abarca el proyecto.

Se elabora un informe para cada uno de los barrenos (Plano 3), describiendo las características litológicas de los cuerpos geológicos que se atravesaron, el porcentaje del índice de calidad de roca (RQD) y el porcentaje de recuperación de los núcleos de roca, un resumen de resultados de las características principales obtenidas de cada barreno se presenta a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las características principales de los barrenos efectuados en el sitio del Canal Ventanas.

MARGEN	PROF. FINAL (m)	ADEME (NW)	NIVEL FREÁTICO PROMEDIO (m)	CONTACTO GEOLÓGICO (m)	LITOLOGÍA	INTERVALO (m)	% REC	% RQD	CLASIFICACIÓN EN BASE AL RQD
BARRENO									
<b>S U R</b>									
<b>* L1 - MS</b>	30.25	0.00	4.31	0.0 A 0.80	RELLENO	0.80 A 8.20	50	9	MUY MALA
				0.80 A 6.20	BRECHA ANDESÍTICA	8.20 A 12.85	99	80	BUENA
				6.20 A 27.70	ANDESITA	12.85 A 19.40	99	43	MALA
				27.70 A 30.25	BRECHA ANDESÍTICA	19.40 A 30.25	95	19	MUY MALA
<b>L2 - MS</b>	17.00	12.00	3.14	0.0 A 0.85	RELLENO	N/A	N/A	N/A	N/A
				0.80 A 17.00	ARENAS	N/A	N/A	N/A	N/A
<b>MS - 3</b>	30.05	22.75	4.31	0.00 A 0.80	RELLENO	0.0 A 23.30	N/A	N/A	N/A
				0.85 A 23.30	ARENAS	23.30 A 30.05	78	0	MUY MALA
				23.30 A 30.05	BRECHA ANDESÍTICA				
<b>MS - 4</b>	31.00	6.20	5.67	0.00 A 0.80	RELLENO	0.00 A 0.80	N/A	N/A	N/A
				0.80 a 3.15	ARENAS	0.80 a 3.15	N/A	N/A	N/A
				3.15 a 15.16	BRECHA ANDESÍTICA	3.15 a 15.16	76	4	MUY MALA
				15.16 a 15.45	ANDESITA	15.16 a 15.45	100	33	MALA
				15.45 a 18.25	BRECHA ANDESÍTICA	15.45 a 18.25	65	17	MUY MALA
				18.25 a 18.70	ANDESITA	18.25 a 18.70	100	28	MALA
				18.70 a 31.00	BRECHA ANDESÍTICA	18.70 a 31.00	97	39	MALA
<b>NORTE</b>									
<b>** MN 7</b>	30.10	9.00	7.63	0.0 A 0.80	RELLENO	0.00 A 0.80	N/A	N/A	N/A
				0.80 A 11.20	ARENAS	0.80 A 11.20	N/A	N/A	N/A
				11.20 A 12.15	BRECHA ANDESÍTICA	11.20 A 13.75	81	3	MUY MALA
				12.25 A 13.75	ANDESITA	13.75 A 14.90	100	69	REGULAR
				13.75 A 14.90	BRECHA ANDESÍTICA	14.90 A 23.45	86	7	MUY MALA
				14.90 A 16.00	ANDESITA	23.45 A 25.85	96	48	MALA
				16.00 A 30.10	BRECHA ANDESÍTICA	25.85 A 30.10	89	5	MUY MALA
<b>MN - 8</b>	30.05	12.20	5.49	0.0 A 0.80	RELLENO	0.00 A 0.80	N/A	N/A	N/A

				0.80 A 6.40	ARENAS	0.80 A 6.40	N/A	N/A	N/A
				6.40 A 7.70	ANDESITAS	6.40 A 12.25	69	5	MUY MALA
				7.70 A 8.95	BRECHA ANDESÍTICAS	12.25 A 30.05	83	30	MALA
				8.95 A 10.80	ANDESITAS				
				10.80 A 12.25	BRECHAS ANDESÍTICAS				
				12.25 A 15.55	ANDESITAS				
				15.55 A 30.05	BRECHAS ANDESÍTICAS				

De acuerdo a la planeación del proyecto se determinaron las características de la permeabilidad del macizo rocoso a la cota -17 msnm, realizando las pruebas de tipo Lugeon y Lefrank, con los resultados de las pruebas de permeabilidad se calcularon los coeficientes de conductividad hidráulica de cada barreno ensayado.

Con ayuda de los coeficientes de permeabilidad definidos se caracterizó a la roca andesítica y a la brecha andesítica como permeable en la roca superficial a poco permeable profundizando en el macizo, la toba cristalina andesítica como permeable.

Con los datos de las coordenadas de cada barreno y con los resultados litológicos de la barrenación se efectuó un bloque diagramático estratigráfico que se integra mas adelante con la prospección geofísica.

#### **I.4 INTEGRACIÓN GEOLÓGICO-GEOFÍSICA**

Dentro de los estudios de geología se efectuaron los levantamientos geofísicos 8 y 9 paralelos al sitio Canal Ventanas y ubicados en la Margen Sur (Plano 2), obtenidos mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) y tendidos de refracción sísmica (TRS).

Por medio de los datos de los barrenos se definen los horizontes litológicos dentro del macizo rocoso y por medio de los estudios geofísicos podemos conocer el contacto entre cuerpos geológicos con diferentes velocidades de propagación de onda.

Se integran los resultados de barrenación a diamante con la información geofísica obtenida de las líneas 8 y 9 se conforman las Secciones Geotécnicas; En el Plano 4 se presentan los diagramas de las secciones geotécnicas, 4a que comprende a la línea 8 y 4b la línea 9.

En las Secciones Geotécnicas 8 y 9 además de la composición litológica se presentan las unidades(U1-U7) definidas con la información geofísica, velocidad de onda sísmica (m/s) y su resistividad eléctrica (ohms-m).

## II. ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

De acuerdo a las consideraciones anteriores los estudios geotécnicos se enfocaron en los siguientes objetivos:

- Obtener las propiedades geomecánicas de la masa rocosa a partir de pruebas índice y mecánicas en muestras de roca intacta y características estructurales.
- Determinar los parámetros de resistencia en discontinuidades, por medio de pruebas de corte directo en el laboratorio de mecánica de rocas.
- Evaluar y garantizar la estabilidad de los taludes finales de los cortes del proyecto.
- Proporcionar las recomendaciones geotécnicas para las distintas etapas de excavación.

### II.1 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

Se realizó la selección de 25 muestras de núcleos de los barrenos de exploración, ejecutando pruebas mecánicas de compresión simple; pruebas índice, alteración, interperismo acelerado, absorción, abrasión, así como determinación de la velocidad de transmisión de la onda primaria. El objetivo del programa fue el determinar las propiedades de la masa de roca, para su posible utilización como material de construcción para escolleras, tanto para determinar las técnicas de excavación apropiadas. La Tabla 3 muestra el resumen de las propiedades de la roca intacta y su comparación con los estándares de obras marítimas.

Tabla 3. Resumen de propiedades de la roca intacta.

PRUEBAS	ÍNDICE						Vp (m/s)	MECÁNICAS Rc (MPa)
	s/Ref.	Ref. 2	s/Ref.	Ref. 2	Ref. 1	Ref. 3		
LITOLOGÍA	w sat(%)	$\gamma$ Amb (Kn/m <sup>3</sup> )	i (%)	a (%)	la (%)	A (%)		
	N/A	>25.99	N/A	<2	<10	<50	N/A	N/A
ANDESITA	0.56	27.00	0.27	0.00	0.54	11.98	5402	51.81
BRECHA ANDESÍTICA	2.21	26.15	0.73	0.03	0.90	14.13	5159	33.87
<i>w sat.</i>	<i>Contenido de agua de la roca después de la saturación</i>							
<i><math>\gamma</math> Amb</i>	<i>Peso volumétrico ambiente</i>							
<i>i</i>	<i>Índice de alteración</i>							
<i>a</i>	<i>Índice de absorción</i>							
<i>la</i>	<i>Interperismo acelerado (% pérdida de peso)</i>							
<i>A</i>	<i>Índice de abrasión (Prueba de los Angeles)</i>							
<i>Vp</i>	<i>Velocidad sónica de la onda primaria</i>							
<i>Rc</i>	<i>Resistencia a la compresión simple</i>							
<i>Ref. 1</i>	<i>Normas de Calidad de los Materiales SCT</i>							
<i>Ref. 2</i>	<i>Break Waters Design and Construction Conference, Institute of Civil Engineers and Held, London may 1983</i>							
<i>Ref. 3</i>	<i>ASTM Standard Test C127, C131 protection for Shore</i>							

Se observa en la tabla que los materiales ensayados cumplen con los estándares marítimos para la fabricación de escolleras, por lo tanto el material de la excavación superficial y submarina que cumpla con el tamaño requerido puede ser usado en el núcleo y parte de la capa secundaria de las escolleras.

## II.2 PRUEBAS DE CORTE DIRECTO

A partir de las determinaciones geológico-estructurales realizadas superficialmente, se definieron como principales discontinuidades los sistemas de fracturamiento, así como fallas de poca extensión, y contactos roca-roca. En la Tabla 1, se muestra el resumen de las discontinuidades en la zona del Canal Ventanas.

Para llevar a cabo los análisis de estabilidad, se obtuvieron seis muestras cúbicas in situ de 50 x 50 x 50 cm de lado para llevar a cabo ensayos de corte directo en las formaciones de andesita y brecha andesítica.

Las muestras anteriores se seleccionaron para los casos de discontinuidades con las juntas cerradas de contactos roca-roca que son los más abundantes, y juntas semiverticales con rellenos de hasta 0.5 cm de arcilla, de estos ensayos se obtiene el ángulo de fricción y la cohesión, datos necesarios para el análisis de estabilidad que se describe más adelante. En la Tabla 4 se presenta un resumen los parámetros de resistencia en discontinuidades, a partir de la pruebas de corte directo.

MUESTRA	RESISTENCIA MÁXIMA		RESISTENCIA RESIDUAL	
	Ángulo de fricción $\phi_{\text{resid.}}$ (grados)	Cohesión $C_{\text{máx}}$ (MPa)	Ángulo de fricción $\phi_{\text{resid.}}$ (grados)	Cohesión $C_{\text{resd}}$ (MPa)
M3	48	0.116	46	0.157
M4	38	0.189	36	0.104
M5	46	0.000	23	0.118
M6	31	0.111	33	0.000

Tabla 4. Parámetros de resistencia en discontinuidades a partir de las pruebas de corte directo

### II.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El factor de seguridad contra falla de las excavaciones se evaluó con el Método de Equilibrio Límite, el cual plantea una comparación entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento (resistencia al esfuerzo cortante en el plano de falla) y las que lo propician (componente tangencial del peso propio del bloque, más el efecto de las acciones sísmicas y el empuje hidrostático o de subpresión), se utilizan los siguientes factores mínimos de seguridad para el análisis de estabilidad en los taludes del proyecto de excavación.

Condición de análisis (fuerzas actuantes)	Factor de seguridad mínimo
Peso propio (estático)	1.5
Peso propio + 100% sismo + 20% empuje hidrostático o subpresión	1.1
Peso propio + 100% sismo + 100% empuje hidrostático o subpresión (caso transitorio de excavación en seco con el talud saturado)	1.1

Tabla 5. Factores de seguridad mínimas

El peso de cada bloque analizado, se obtuvo tomando en cuenta su geometría y el peso volumétrico de la roca.

Se consideró que en los contactos de fallas y fracturas puede penetrar y acumularse eventualmente agua, lo que genera un empuje hidrostático y subpresión sobre el bloque. Se consideró el 80% de disipación de los empujes hidrostáticos por la existencia de drenaje sistemático en los taludes por arriba del nivel del mar y en la excavación en seco se considera 100% de empuje hidrostático.

Para los análisis de estabilidad pseudoestáticos, se consideró un coeficiente sísmico de  $c = 0.4$  ( $a_0 = 0.4g$ ) obtenido de un estudio sismotectónico.

Estos mecanismos se presentan en taludes de excavaciones a cielo abierto y para garantizar la estabilidad, se analizan los datos estructurales para determinar la formación de bloques, como se maneja una gran cantidad de datos se empleó un paquete de computo como software de apoyo llamado Swedge (Probabilistic analysis

of the geometry and stability of underground wedges, propiedad del Departamento de Mecánica de Rocas de CFE), por medio de este programa se analizaron las fallas y fracturas principales, se determinan la formación de probables cuñas y se establecen las condiciones técnicas necesarias para garantizar la estabilidad de los taludes finales del lado norte y lado sur del canal de navegación.

Los análisis se realizan para cada lado del canal.

### **II.3.1 ESTABILIDAD DE LA MARGEN NORTE**

A partir de un estereograma de redes (Figura 3), se revisó la interacción e intersección de las familias o sistemas de discontinuidades principales con la cara expuesta del talud, en este caso, el talud esta orientado sensiblemente de E-W, con la salida franca de bloques hacia el sur, considerando la persistencia de la familia de fracturas se identificó la formación de tres cuñas, las cuales son analizadas con el método de equilibrio límite, de acuerdo a los criterios antes mencionados.

La cuña **a**, permanece estable con el abatimiento del talud con 0.25:1, mientras que la cuña **c** requiere del abatimiento del talud hasta 0.50:1 para permanecer estable con un ángulo de intersección bajo. Sin embargo la cuña **b** presenta un ángulo de intersección  $i = 43^\circ$ , por lo que aún al abatir el talud 0.50:1 presenta inestabilidad, En la Figura 3 se muestra la cuña tipo que requiere tratamiento de estabilización.

Para estabilizar el talud superior y el talud inferior con respecto al nivel N+0 del mar y basados en la pendiente de proyecto, para un talud de 0.5:1, se considera necesario un tratamiento selectivo de anclaje, aplicando una presión de soporte de 2.1 t/m<sup>2</sup> solo en el bloque identificado sino también en los que sean identificados durante los cortes; El anclaje es calculado con anclas de fricción de 2.54 cm (1") de diámetro y 6 m de longitud con patrón de 2.8 x 2.8 m, para cubrir el déficit necesario por arriba del nivel del mar.

En resumen el talud permanece estable con pendiente 0.50:1 y alturas máximas de 20 m, intercalar bermas de 5 m, hasta llegar al terreno natural, atendiendo a las indicaciones particulares del proyecto, ver secciones A y B en el Plano 4.

Deberán de considerarse dos líneas de drenaje profundo en cada berma ubicados por arriba del nivel N+0, las dos líneas se ubicaran a 2 y 5 m con por arriba del piso de cada berma que consisten en perforaciones de 5.71 cm (2 ¼") de diámetro, de 4 m de longitud en patrón de 5.6 m x 3.0 m de separación horizontal y vertical respectivamente

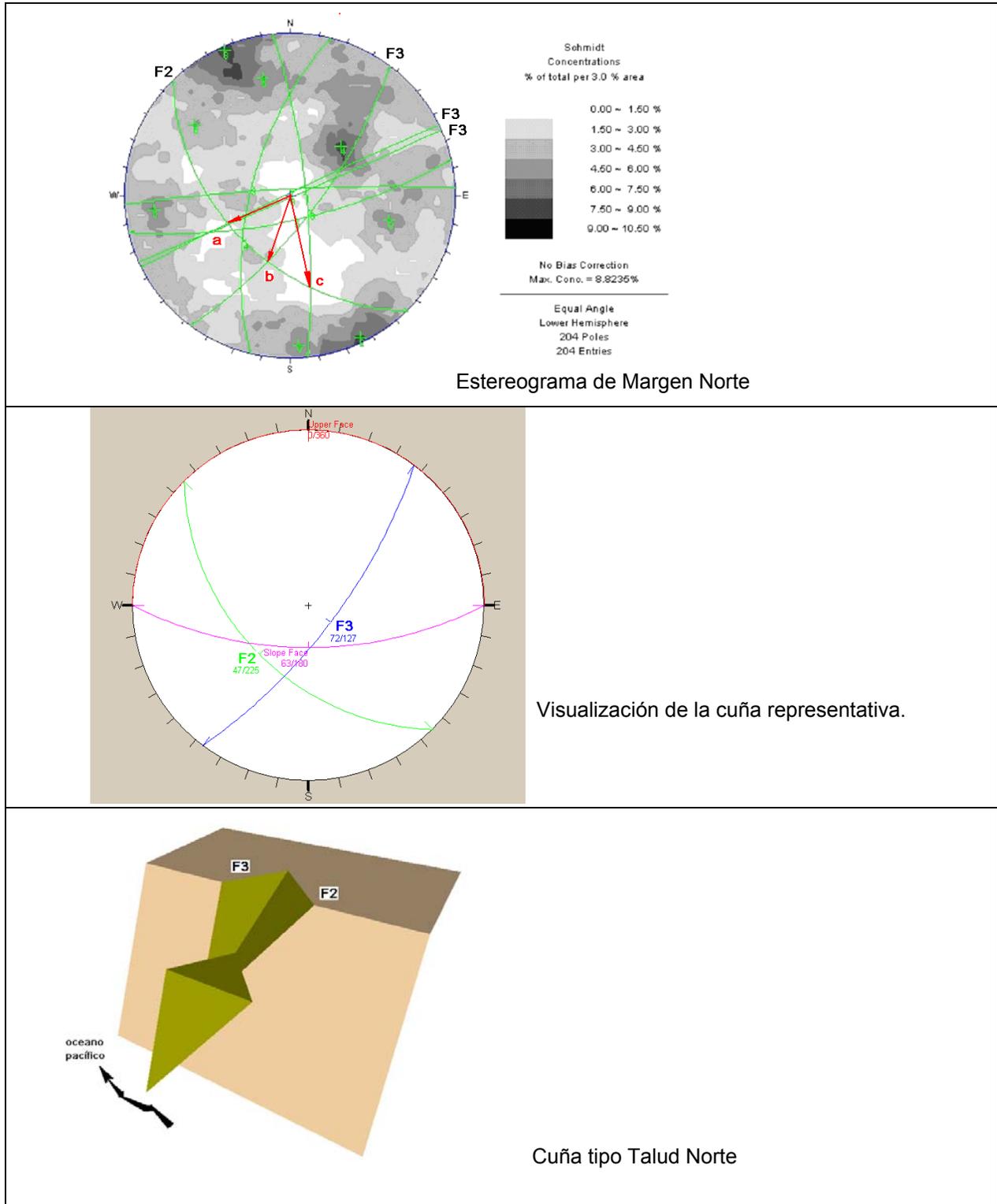


Figura 3. Estereograma y diagrama de cuña tipo margen norte del Canal Ventanas

### **II.3.2 ESTABILIDAD DE LA MARGEN SUR**

El talud en la Margen Sur también está orientado hacia el EW, con salidas francas de bloques hacia el Norte, considerando la persistencia de la familia de fracturas se identificó la formación de tres posibles cuñas, se analizó la estabilidad en base a los factores de seguridad propuestos en el inicio del capítulo.

La combinación de sistemas de fracturamiento que forman la cuña **a**, es estable para el talud 0.50:1 y las combinaciones del sistema de fracturamiento que forman las cuñas **b** y **c**, son similares, pero la cuña **c** presenta un ángulo de intersección mayor, formada por la combinación de los sistemas de discontinuidades de fracturamiento **F4** y los fallamientos menores asociados a **F3** ( Figura 4) , es poco probable que se presente la cuña **c** en grandes dimensiones, y se prevé la estabilización natural de pequeñas cuñas en la zona problemática.

En caso de identificar durante las obras de corte cambios importantes en los fallamientos, se diseñó un anclaje que soportará una posible cuña de 8.5 m de altura y 5 m de profundidad máxima como se muestra en la Figura 4 (cuña tipo), que requiere de una presión de soporte de 1.0 t/m<sup>2</sup>, esta se soluciona con anclaje de fricción de 2.54 cm (1") de diámetro y longitudes de 7 y 5 m, con patrón de 3.0 x 3.0 m.

Como resultado de los estudios de estabilidad en la Margen Sur, se determinó la estabilidad del talud con la pendiente 0.50:1, y altura máximas de 20 m, intercalando bermas de 5 m, hasta llegar al terreno natural, donde así lo requiera el proyecto. No se tendrán taludes importantes por arriba del nivel 0.00 msnm, por lo que no se requerirán los barrenos de drenaje, ver secciones A y B del Plano 5.

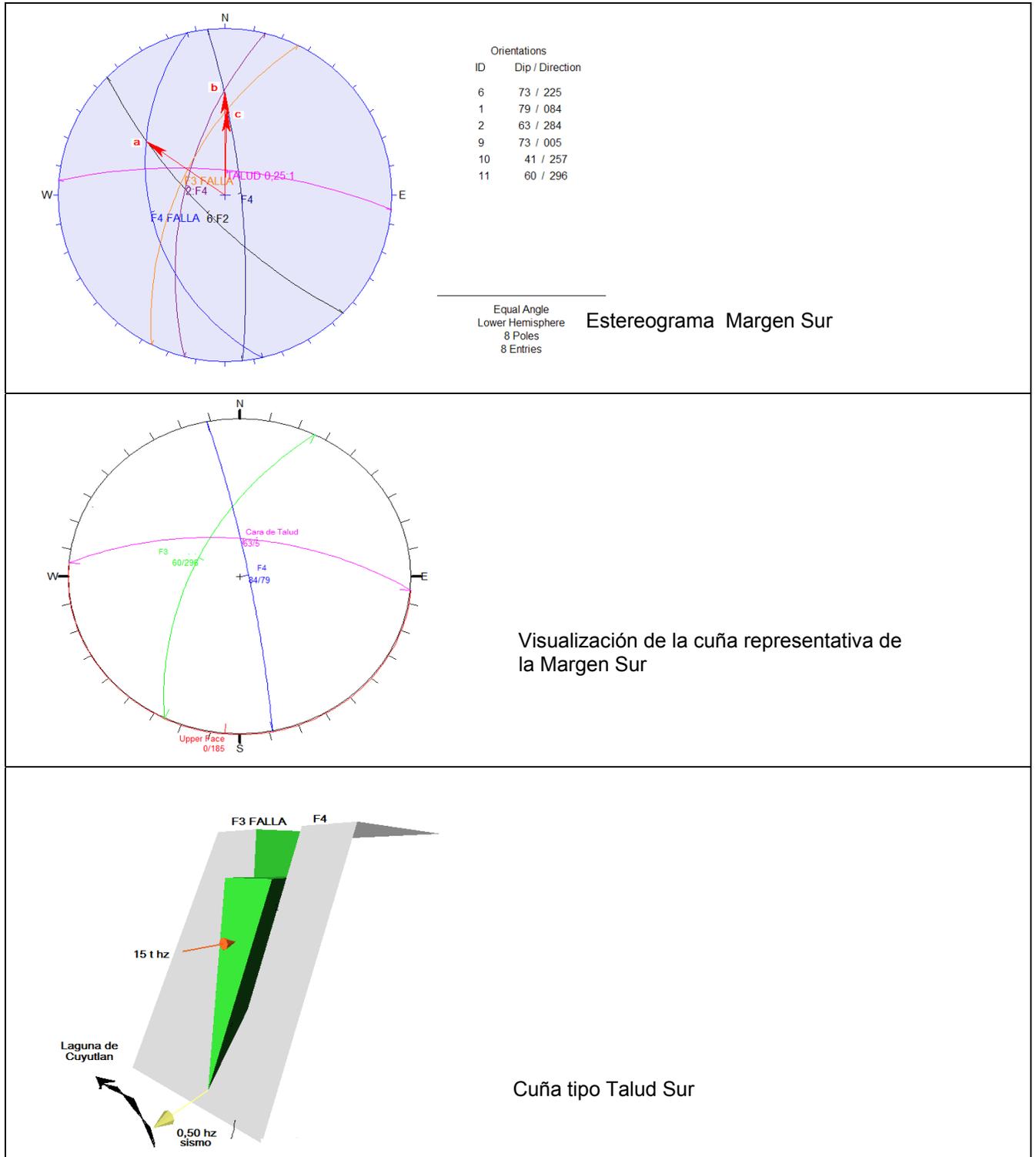


Figura 4. Estereograma y diagrama de cuña tipo margen sur del Canal Ventanas

### **III. MÉTODOS OPCIONALES DE EXCAVACIÓN DEL CANAL VENTANAS**

Se plantearon diversos escenarios y opciones para excavar y conformar el Canal Ventanas, además, se dividirá la excavación en dos fases, tomando como división la cota +3 msnm, considerando arriba del nivel del mar como excavación en tierra firme y por debajo del nivel del mar excavación submarina.

Se propone el método de Excavación Convencional Superficial (Tajo) por arriba del nivel +3 msnm, ya que las condiciones topográficas y geológicas son las adecuadas para este método.

Para la excavación por debajo del nivel del mar se proponen los siguientes métodos:

- Excavación en seco (Pantalla de impermeabilización).
- Excavación Submarina sobre barcazas o plataformas.
- Excavación por medio de plataforma de relleno.

#### **III.1 EXCAVACIÓN CONVENCIONAL EN TIERRA FIRME POR ARRIBA DEL NIVEL DEL MAR**

Considerando los resultados de los estudios geológicos se ha determinado emplear el método convencional de excavación a cielo abierto por arriba del nivel +3 msnm, con perforación, cargado de explosivos, voladuras y el retiro del material con carga y acarreo directo con cargadores y camiones.

Se debe iniciar con el despalme de la capa vegetal y material removible que tiene un espesor entre 40 a 60 cm, utilizando solo medios mecánicos.

Se requiere planear una primer serie de voladuras con el objetivo de regularizar y proveer de una plataforma horizontal y uniforme para iniciar una explotación sistemática por medio de bancos descendentes, hasta el nivel +3.

Para el comienzo de la explotación podrán aprovecharse los caminos y cortes existentes en el predio, tanto para la extracción del producto de voladura, como para el inicio de los frentes de ataque. Se deberá contemplar un acceso principal a cada nivel de banqueo con pendientes menores al 10%, determinando en el trazo del mismo el destino final del material.

La altura máxima de los bancos de la explotación debe ser de 8 m, considerando el equipo y factores de seguridad, de se deberá cuidar la secuencia de detonación y

dirección de salida de la voladura, de forma que se minimicen las vibraciones y no se vean afectadas otras actividades.

Se recomienda utilizar explosivo de media a alta velocidad, de acuerdo a los resultados de laboratorio, (4000 a 5000 m/s), se deberá considerar una combinación alta y baja densidad de explosivo (hidrogel y a granel), que se definirá en función de pruebas de voladuras. La extensión del corte se ilustra en la primera fase de excavación de las secciones A y B en el Plano 5.

De acuerdo a la información geológico-estructural proporcionada por el Departamento de Geología, las familias de fracturas F3, pseudo vertical con rumbo NE-SW y F2 con un echado de 47° SW y rumbo N45°W son las más persistentes en la zona norte del Canal Ventanas, si se desea optimizar y obtener bloques de mayores dimensiones se recomienda realizar la explotación sensiblemente paralela y a rumbo de la familia F3 con dirección al SW.

Se deberán dejar taludes finales con inclinación mayor o igual a 0.50:1, y altura máxima de 20 m, intercalando bermas de 5 m de ancho como mínimo para funcionamiento temporal de estabilización y tránsito de equipo.

Para evitar daños en los taludes finales debido a la excavación, será necesario realizar voladuras de precorte o poscorte, así como el monitoreo de vibraciones, de forma que no rebasen los límites permisibles en instalaciones aledañas.

Durante la construcción, es de vital importancia, realizar la actualización constante de las condiciones del macizo rocoso, en función de los avances durante la ejecución de la excavación, con el objeto de identificar la posibilidad de distintas condiciones geológico-estructurales de la roca, no consideradas, que demanden la rectificación de los tratamientos vertidos en este informe.

De acuerdo a la definición de los taludes finales sin tratamientos, es de vital importancia la ejecución de un control estricto de la voladura. Se deberá cuidar el paralelismo y separación de los barrenos de precorte ó poscorte, así como el vigilar el correcto cargado del explosivo. Lo anterior tiene como objeto el minimizar el daño a la roca en los taludes resultantes, ya que como se indicó antes, estos serán los taludes finales.

En cada voladura que se realice se recomienda llevar a cabo un levantamiento físico de los tamaños de bloques obtenidos, geometría, carga de explosivos, conexiones, retardos, etc.; con el objeto de obtener aspectos importantes que se deberán considerar en la próxima voladura.

### III.2 EXCAVACIÓN BAJO EL MAR EN SECO, BAJO EL NIVEL -0

Para excavar bajo el agua en seco, se revisa la posibilidad de excavar parte de esta zona bajo el nivel -0 con el método convencional de voladuras. Para ello se propone aislar el área a excavar de forma perimetral por medio de bordos de roca in situ, controlando el agua filtrada con bombeo de achique, hasta un gasto permisible, que deberá de definirse, a partir de esta frontera o límite que se establezca, iniciar la excavación submarina.

De la información geológico-geofísica, se definieron horizontes de las calidades de la masa de roca, así como la ubicación de la cima de roca. Dentro de la exploración geológica, se realizaron pruebas de permeabilidad Lugeon y LeFranc, con objeto de caracterizar la masa de roca en su comportamiento hidráulico y estimar el volumen de agua que fluiría hacia el recinto.

Se definió un modelo geotécnico e hidráulico simplificando (red de flujo) y se determinó el valor de la conductividad hidráulica a partir de las pruebas de permeabilidad; finalmente este parámetro se asignó al modelo estimando la cantidad de agua por metro lineal que fluiría hacia el recinto al bajar el nivel de excavación.

El recinto propuesto para excavar en seco se describe a continuación. Se propone un área de excavación por este método de 394,00 m<sup>2</sup>, con perímetro de 797 m(Plano 1). Se calculó el gasto para el perímetro propuesto con ayuda del modelo hidráulico anteriormente descrito y en la Tabla 6 se presenta un resumen de las estimaciones para diferentes condiciones de tratamiento y profundidades de excavación.

<b>Gasto Total en It/s para las Diferentes Consideraciones,</b>			
<b>Elevación de la Excavación (m)</b>	<b>Elemento Impermeable (Bordo de roca)</b>	<b>Bordo de roca más Pantalla en roca de 5 m de profundidad</b>	<b>Bordo de roca más Pantalla en roca de 10 m de profundidad</b>
-5	142.32	110.69	90.57
-10	249.06	199.25	166.04
-17	529.26	376.36	338.73

Tabla 6. Gasto total para diferentes consideraciones de excavación en seco

Para hacer frente a las filtraciones hacia el recinto, se deberá prever el equipo de bombeo necesario para satisfacer los gastos indicados en la tabla anterior, tomando en cuenta que los gastos estimados se presentarán al llegar al final del corte en cada etapa, por lo que la demanda de bombeo aumentará de 0.0 a 110.69 lt/seg al llegar a la elevación  $-5.0$  msnm si se construye una pantalla impermeable de 5 m de profundidad y bordo de roca.

Teniendo el control de las filtraciones, se podrá excavar con el procedimiento convencional indicado en el inciso III.1, previendo la necesidad de utilizar explosivo resistente a la acción del agua, como son los hidrogeles.

Como se observa en el plano 5, la operación del Canal Ventanas no se verá afectada por la excavación, ya que esta es una restricción del proyecto el tener habilitado un canal para el suministro de agua a la central termoeléctrica actual. Para resolver esta restricción se proyecta dejar un pilar de roca entre la excavación del recinto y el canal, este pilar de roca deberá ser removido posterior a la excavación del recinto, una vez que se pueda circular agua por el nuevo canal.

En resumen solo se aplica la excavación en seco con ayuda de barreras impermeables y bombeo de filtraciones a un recinto de  $39,400 \text{ m}^2$  (plano 1), y el resto del área que se proyecta para el canal, deberá ser continuada por el método de excavación sobre plataformas o barcazas.

### **III.3 EXCAVACIÓN SUBMARINA SOBRE BARCAZAS O PLATAFORMA**

Como se indicó en el punto anterior, no es posible cubrir el total de la excavación aislando y excavando en seco en tierra firme. Además de que la excavación submarina con equipo sobre barcazas o plataformas es una alternativa complementaria al método expuesto en el inciso anterior.

Una alternativa de excavación o profundización en roca en la zona marina, es empleando equipo que se desplace sobre la superficie del mar. El ciclo de excavación comprende la perforación, cargado, voladura, extracción (dragado), acarreo y disposición final del material.

Todos los trabajos requieren de un grado de especialización y experiencia mayores que los que se aplican en obras a cielo abierto, por ello, existen factores mínimos que deberán considerarse para la ejecución de este tipo de trabajos.

- La excavación con equipo sobre barcazas o plataformas se permite con un tirante de agua de 2 a 3 metros.

- La perforación y carga de barrenos se realiza desde la superficie en condiciones especiales.
- Los consumos específicos de explosivo son de 3 a 6 veces mayores que los utilizados en voladuras a cielo abierto.
- Se deben asegurar y lograr la efectividad de cada una de las voladuras hasta el nivel de excavación de proyecto, debido a que la fragmentación secundaria se torna difícil y costosa.
- Los explosivos y sistemas de iniciación tienen que ser resistentes al agua y a la presión hidrostática.
- Los efectos ambientales perturbadores son más agudos, pues las vibraciones marinas van acompañadas de componentes de baja frecuencia y la onda de choque hidráulica tiene un radio de acción importante.
- Considerando las condiciones geológicas y el grado de fracturamiento el dragado será del tipo mecánico.
- El material dragado se desplaza fuera del área del canal.

#### **III.4 EXCAVACIÓN CON PLATAFORMA DE RELLENO**

Habrá que considerar este método tomando en cuenta que la pendiente del lecho marino en el Océano es del 3%, el método consiste en formar previamente una plataforma de roca resistente al oleaje con la corona a la elevación +3(Plano 6), a partir de la corona planear y realizar la perforación hasta el fondo previsto en el proyecto, asegurar el tramo de roca fragmentada con ademe de PVC para impedir que se tape el barreno. Los barrenos se deben cebar con hidrogeles de densidades mayores de 1.4 g/cm<sup>3</sup> y velocidades de detonación no menores de 5000 m/s. El explosivo seleccionado debe ser resistente al agua con tiempo entre 24 y 48 horas.

Las fases de la excavación constan de rellenar y nivelar por arriba del nivel N+0, esto es para proveer de una superficie de trabajo para la operación de barrenación, cargado y voladura. El material fragmentado junto con el relleno inicialmente depositado se rezaga en retroceso por medio de Draga de arrastre, situada sobre la plataforma de relleno, cargando directamente en el equipo de acarreo en superficie.

El ejecutar este método implica el movilizar y disponer de grandes volúmenes de material para conformar la plataforma, para después retirar junto con el material fragmentado.

## **IV. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN**

Para la explotación superficial existe solo un método que se adapta a las condiciones topográficas y geológicas que ya se ha definido, por lo tanto este análisis está enfocado a seleccionar el método para excavar bajo la elevación +0.00 msnm.

La selección del método de excavación bajo el nivel del mar, se llevó a cabo considerando las ventajas y desventajas desde el punto de vista técnico de cada una de las tres opciones descritas anteriormente.

### **IV.1 EXCAVACIÓN BAJO EL NIVEL +0.00 msnm EN SECO**

#### **IV.1.1 VENTAJAS**

Es posible continuar el método de explotación con equipo superficial por debajo del nivel del mar, hasta la elevación -17.00 msnm proyectado como piso del canal.

El equipo de perforación, cargado y acarreo utilizado en superficie puede trabajar hasta el nivel final debido a que el agua es desalojada.

Se puede usar parte del material obtenido de la explotación superficial para la construcción de los bordos de roca necesarios para aislar el recinto.

Los tiempos de excavación son menores, debido a que los equipos son de alta producción y el ciclo de minado es continuo.

#### **IV.1.2 DESVENTAJAS**

Se deben construir dos ataguías o bordos, una hacia el océano pacífico y otra hacia la Laguna de Cuyutlán.

Se debe dejar un pilar natural de roca in situ con un espesor de 20 m, y una cota en la elevación + 3.00 msnm.

Se deberá realizar un bombeo continuo de grandes volúmenes de agua, tomando en cuenta la incertidumbre de la estimación de filtraciones.

Para reducir los volúmenes de filtraciones se requiere construir una pantalla impermeable con inyección sistemática en el perímetro del recinto, además de la construcción del bordo de roca.

La excavación requerirá de la aplicación de dos métodos con las complicaciones de utilizar dos ciclos de minado distintos.

## **IV.2 EXCAVACIÓN EMPLEANDO EQUIPO SOBRE BARCAZA O PLATAFORMA**

### **IV.2.1 VENTAJAS**

Se puede implantar un ciclo completo de explotación.

Existe en el mercado el equipo necesario para realizar operaciones sobre la superficie del agua además que puede llegar vía marítima.

Los equipos tienen la flexibilidad de desplazamiento en el área de explotación y la relativa facilidad del acarreo del material explotado.

No se requiere bombeo de agua para la operación de los equipos.

No hay manejo de tepetate para conformar pisos de trabajo.

Reduce el tiempo de obra ya que no requiere de tratamientos previos para empezar la explotación.

Control en la fragmentación ya que se pueden diseñar bancos regulares, en donde se puede controlar la geometría del banco y factores de carga de explosivo.

Este método es aplicable a toda el área de excavación bajo el nivel del mar.

Los equipos son de alta producción, tanto en barrenación, como en rezagado y acarreo.

Se puede disponer del material rezagado para la conformación de las obras del proyecto, sin la necesidad de un remanejo de material.

Existen métodos eficaces para la mitigación de los efectos de la voladura submarina.

### **IV.2.2 DESVENTAJAS**

Requiere de equipo especializado que esta sujeto a la disponibilidad internacional.

Es necesario llevar un control estricto de los efectos ambientales de la voladura sobre el medio acuático.

Todos los trabajos tienen que ser realizados sobre barcazas o plataformas y los equipos tienen que ser adaptados a estas condiciones.

Se deben utilizar factores de carga de 3 a 6 veces más respecto a la explotación superficial, y hace más complejo el diseño de las voladuras.

### **IV.3 PLATAFORMA DE RELLENO**

#### **IV.3.1 VENTAJAS**

Proporciona un piso firme para llevar a cabo el ciclo de explotación del macizo de roca hasta la elevación -17.00 msnm.

Se puede trabajar con el medio saturado, por lo que no requiere bombeo de agua.

Se puede utilizar equipo de perforación y acarreo convencional.

#### **IV.3.2 DESVENTAJAS**

Requiere de grandes volúmenes de material fragmentado para conformar la plataforma.

El material fragmentado se deposita y después deberá ser retirado nuevamente al ir en retroceso.

El macizo de roca a fragmentar está confinado a su alrededor por el material de relleno, incrementando la plantilla y la carga de explosivo.

No existen experiencias previas de la eficiencia en la fragmentación en este tipo de voladuras, por lo que es necesario realizar pruebas.

Cambio constante en la plantilla de barrenación y la carga de explosivos durante el avance, por la variación en la relación de roca in situ-relleno, ya que la pendiente es del -3% hacia el océano.

Este método no es aplicable a toda el área de explotación submarina, debido a la necesidad de grandes cantidades de tepetate para conformar una plataforma de trabajo que cubra toda la superficie del canal.

La duración de la obra es mayor debido a que es necesario rellenar antes de iniciar operaciones.

#### IV. 4 SELECCIÓN DEL MÉTODO

Considerando el análisis anterior se descarta el método de explotación submarina con plataforma de relleno, debido a los grandes volúmenes de material de relleno que propone mover, además de que los bancos de roca a explotar están confinados bajo el relleno de material complicando la voladura ya que será necesario utilizar cargas de explosivo muy grandes para fragmentar y mover la roca in situ y las vibraciones aumentan con la carga, o usar cargas menores con el problema de la fragmentación. Otra complicación importante es el movimiento de material para rellenar y después para desalojar al ir en retroceso.

Al proponer una excavación mixta, se deben manejar dos métodos de excavación totalmente diferentes. Además manejar un bombeo constante, con las respectivas complicaciones en probables incrementos en las filtraciones. Se requiere invariablemente un bordo que confine el recinto y si se quiere disminuir el volumen de agua filtrada hacia la excavación, se deberá realizar un tratamiento especializado de inyecciones en un perímetro de 797 m, incrementando los tiempos de ejecución. Por lo que no se presenta como la mejor opción.

La excavación submarina empleando equipo montado sobre barcasas o plataformas, se puede aplicar a toda la extensión del canal, diseñando un ciclo de explotación continuo, se tendrá variación en la plantilla de barrenación y cargado de explosivos, pero no presenta complicaciones representativas como en el caso de la plataforma de relleno; Por otra parte el equipo existente es de alta producción, y flexible para adaptarse a toda el área de excavación, Por lo tanto desde el punto de vista técnico presenta las mejores condiciones para su ejecución.

Este análisis esta sujeto solo a consideraciones técnicas, el aspecto financiero queda fuera del presente trabajo y deberá considerarse para tomar la decisión final.

## V. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO SELECCIONADO

Como se concluyó en la sección anterior, la opción más viable es la explotación submarina con equipo sobre barcazas o plataformas. Por lo que en el presente capítulo se proporcionará un panorama más completo del ciclo de explotación y de los parámetros más representativos que intervienen en la ejecución de este método de excavación.

### V.1 CICLO DE EXPLOTACIÓN

El ciclo de explotación submarina se desarrolla con la secuencia siguiente:

- a) Posicionar y fijar la barcaza sobre área que se barrenara, posicionar en las coordenadas la perforadora
- b) Bajar la camisa exterior de la barrena, atravesar la capa de tierra que esta sobre la superficie del fondo marino y al llegar a la roca barrenar unos 30 cm para fijar la camisa.
- c) Bajar la barra hasta la roca y barrenar, antes de sacar la barra limpiar el barreno de los detritos de la perforación.
- d) Controlar la profundidad del barreno con el tamaño de las barras introducidas.
- e) Retirar la barra e introducir una tubería de PVC para aislar el barreno de la columna de agua al retirar la camisa exterior del equipo de barrenación.
- f) Cargar el barreno, retirar la tubería y recobrar el cordón del iniciador.
- g) Anudar las cargas con cordón detonante en la superficie del agua, sujetarlas a boyas para identificar su posición y para el encendido.
- h) Retirar la barcaza por lo menos 60 metros lejos del área de voladura.
- i) Después de pegar la voladura se posiciona y fija sobre el área el equipo de dragado, y junto a el posicionar la barcaza de acarreo del material fragmentado.
- j) Al terminar el rezagado retirar el equipo e iniciar el ciclo nuevamente.

Se pueden planear dentro del área del canal varias zonas de trabajo para no interrumpir los ciclos, así cuando la barcaza termine de barrenar una zona se desplace a otro lugar a barrenar y no se tenga que esperar a terminar el rezagado para continuar el ciclo.

El equipo recomendado para realizar la excavación se describe a continuación.

### V.1.1 Perforación empleando equipo marino

La perforación podrá realizarse con dos tipos de estructuras diferentes: barcazas flotantes o plataformas autoelevables, la selección de la modalidad dependerá de los costos y beneficios que presente cada uno y no se detalla en este proyecto, solo se describen las características de cada uno.

**Las barcazas flotantes**, son estructuras rectangulares no autopropulsadas, cuentan con bastidores o guías sobre las que van montadas las perforadoras y sobre los cuales se desplazan para cambiar a la siguiente posición, incluyen torres para facilitar las operaciones de colocación y cambio de tubería (figura 5).

Estas barcazas, se anclan al fondo marino o se amarran a puntos fijos durante la operación. Estas presentan restricciones en las condiciones de operación, debido a que se encuentran sujetas al movimiento de las olas y corrientes superficiales, generalmente cuentan con dispositivos que compensan estas condiciones dentro de cierto rango.



Figura 5. Barcaza con dos perforadoras (izquierda).

**La plataforma autoelevable**, es una barcaza, no autopropulsadas, que cuenta con cuatro soportes con mecanismo de elevación independientes en los extremos, que permiten elevar la plataforma sobre sus soportes y adaptarse al fondo marino (Figura 6).

La perforación desde la plataforma, elimina gran parte de los movimientos debidos a los agentes exteriores y permite un mayor control en la dirección de la barra de perforación, pero requiere de una mayor inversión inicial.

Las dimensiones de este tipo de equipo varían dependiendo de la profundidad máxima de barrenación que alcance y de la elevación máxima de los soportes.

Ejemplo: Equipo de perforación submarina de Great Lakes Inc.

Largo de la plataforma: 53 m

Ancho de la plataforma: 13 m

4 Soportes autoelevables

Elevación máxima de las torres: 25 m

3 Torres de Barrenación

Profundidad de barrenación máxima: 26 m

Abertura máxima de barrenación: 114 mm



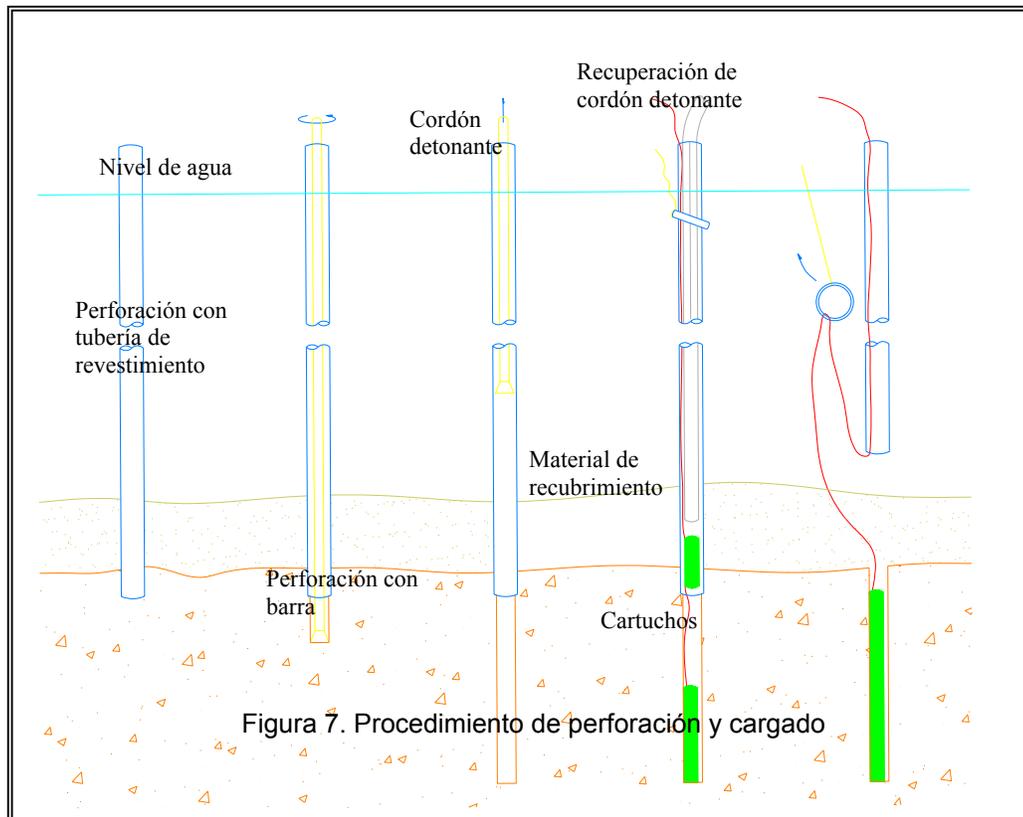
Figura 6. Plataforma autoelevable con tres torres de perforación.

Existen equipos en donde las perforadoras se encuentran en un extremo de la barcaza (Figura 6) y las torres perforan una línea de barrenos y después la barcaza se desplaza a la siguiente línea; Otro equipo realiza la perforación en el interior la plataforma y las torres de barrenación se desplazan en sentido NS-EW, realizando varias líneas de barrenos en la misma posición, la barcaza seleccionada será la que pueda realizar el mayor número de barrenos en una sola posición con las especificaciones de la plantilla de barrenación diseñada.

En cuanto a los procedimientos de perforación, existen dos equipos especiales, los de tipo OD (Perforación por roto-percusión concéntrica de camisa y tubo) y tipo ODEX (Perforación por roto-percusión simultánea de camisa y tubo con martillo de fondo de barrido excéntrico); El primero dispone de una camisa exterior que posee en su extremo una corona de carburo de tungsteno con la que perfora de 0.10 a 0.50 m el macizo rocoso después de haber pasado por la capa de material suelto del lecho marino, el resto del barreno se perfora con la barra interior (Figura 7).

El equipo ODEX consiste en un escariado que se practica con una boca excéntrica que, al abrir un orificio mayor, posibilita la bajada del tubo exterior simultáneamente con la barra de perforación hasta el fondo del barreno, este es usado cuando el macizo de roca es deleznable y se corre el riesgo de bloqueo del barreno por los caídos de las paredes del mismo, en ambos casos el tubo exterior protege el barreno de la columna de agua del mar.

Considerando las condiciones geológicas del macizo de roca a excavar se concluye que el método de perforación más adecuado es el tipo OD (Perforación por roto-percusión concéntrica de camisa y tubo), ya que la roca in situ es resistente y no se corre el riesgo de tapar en barreno con caídos, por lo tanto no es necesario el encamisado del barreno.



### V.1.2 Carga convencional con explosivos, empleando equipo marino

Esta operación puede efectuarse manualmente o con cargadoras de explosivo de aire comprimido. Las cargadoras presentan la ventaja de que pueden conseguir densidades altas del explosivo al confinarlo. Como consecuencia de ellos es posible abrir los esquemas de perforación, reduciendo el costo de perforación y el peligro de transmisión de detonación entre barrenos debido a la desviación en cada uno.

El cargado de explosivo se realiza una vez terminada la perforación del barreno desde la misma barcaza, primero se limpia el barreno y se retira la barra interior y la camisa, quedando una tubería flexible de plástico o aluminio dentro del barreno (figura 8), mediante la cual se introduce la primera carga con el iniciador (Figura 7), después se introduce el resto de la carga. El equipo se conecta a la red de aire comprimido mediante válvulas reductoras, hasta conseguir una presión de 300 KPa que impulsa los cartuchos depositados en la cámara de carga.



Figura 8. Cargado de explosivo

En el caso de barrenar con el método ODEX, la tubería flexible no es retirada por lo tanto al terminar el cargado de los barrenos el encadenado se realiza con la tubería expuesta en la superficie y por las cuales salen los iniciadores (Figura 8).

En nuestro caso la roca es dura y competente por lo que no se corre el riesgo de tapar en barreno con caídos, por tal motivo se recomienda el método tipo OD (Perforación por roto-percusión concéntrica de camisa y tubo), en donde se la cubierta exterior se retira y el cordón se recupera bajando un anillo atado a una sogá de cáñamo resbalando por el exterior de la cubierta hasta que toque el fondo, cuando se retira la tubería se trae a la superficie el anillo con el cordón.

Para el cargado los explosivos son usados: Los hidrogeles explosivos( alto explosivo) los cuales son ideales para trabajar bajo el agua y resisten la presión hidrostática, debido a su alto costo se combina para el cargado del barreno con la gelatina amoniaca la cual proporciona el 90 % de la fuerza de fracturamiento.

Se ha preferido como método más seguro y mejor para detonar una voladura el uso de cordón detonante preferentemente a los iniciadores eléctricos, experimentalmente se ha comprobado la eficiencia de este método, el uso de cordón detonante para cebar y pegar una voladura se recomienda cuando se pretende detonar una sola línea de barrenos; En nuestro caso se quiere aprovechar la barrenación y cargado pegando

varias líneas de barrenos y para no aumentar las vibraciones, se recomienda el uso de iniciadores con retardo y el encadenado con cordón detonante.

Una vez cargados los barrenos se realizan las conexiones de las líneas de transmisión en la superficie, se anudan las cargas y se atan a flotadores, se cuelga un rodillo con peso libre entre los flotadores para tensar y evitar el movimiento del encadenado por la fuerza del oleaje, ya que los equipos se posicionan lejos de la voladura referenciados con el anudado del cordón en la superficie del agua.

Al igual que las voladuras a cielo abierto, es necesario realizar un programa de pruebas de voladuras, donde se revisen las principales variables en la barrenación: plantilla, carga específica de explosivo, así como la fragmentación de la roca antes de comenzar las voladuras de producción a gran escala. Además de definir las medidas de mitigación de efectos adversos de la voladura.

### V.1.3 Extracción de la rezaga por dragado y acarreo marino

La selección del equipo del dragado depende de los siguientes factores:

Las características físicas del material a dragar.

La Cantidad de material a ser dragado.

La profundidad de dragado.

Distancia de acarreo sobre barcaza.

Tipos de dragas disponibles y Costo.

El producto de la voladura serán fragmentos con tamaños menores a 0,60 m, que deberán ser extraídos con dragado mecánico.

La cantidad de material in situ que se requiere mover es de aproximadamente 1'500,000 m<sup>3</sup> considerando un abundamiento del 40 % , se moverán 2'100,000 m<sup>3</sup> de material fragmentado, la profundidad de dragado es de 17 metros y la distancia lineal máxima de acarreo es de aproximadamente 800 m, el material es transportado por las barcasas hasta tierra firme en donde es descargado para ser sometido a una clasificación para ser usado para la construcción de las escolleras.

Existen en el mercado equipos que se ajustan a las necesidades de extracción del material previsto en la zona del Canal Ventanas. Para la extracción de la roca producto de voladura aplican las dragas excavadoras y las dragas de cucharón.

**Las Dragas excavadoras**, son básicamente palas frontales y retroexcavadoras montadas sobre barcasas con soportes autoelevables (Figura 9).

Las dimensiones de estos equipos varían dependiendo de la capacidad del carga del cucharón y de la profundidad máxima alcanzada.

Ejemplo: Pala retroexcavadora de Great Lakes Inc.  
Capacidad de cucharón: 15 - 19 m<sup>3</sup>  
Longitud de la plataforma: 61 m  
Ancho de la plataforma: 17 m  
Rango de Profundidad alcanzada: 18 - 25 m  
Alcance horizontal máximo: 15 m



Figura 9. Draga con pala retroexcavadora descargando a la barcaza

**La Draga de cucharón**, es llamada así porque utiliza un cucharón para excavar el material a dragar. Existen diferentes tipos de cucharones, adaptándose a una gran variedad de materiales al dragar. El mecanismo consiste en mover el cucharón hacia adelante manipulando la tensión de los cables que lo soportan, para después bajar el cucharón hasta la base de la roca fragmentada y por arrastre llenarlo, levantarlo y vaciar en la barcaza. Este equipo está montado sobre una barcaza anclada, o sobre una plataforma autoelevable (Figura 10).

Ejemplo de las dimensiones de una Draga de Cucharón:

Capacidad de cucharón: 10 - 20 m<sup>3</sup>  
Largo de la plataforma: 56 m  
Ancho de la plataforma: 18 m  
Rango de profundidad alcanzada: 25 – 45 m  
Alcance horizontal máximo: 30 m



Figura 10. Draga con cucharón de arrastre

Ambos tipos de excavadoras no son autopropulsables, por lo que requieren del apoyo de remolcadores para los desplazamientos y posicionamiento.

El material dragado en cualquiera de los casos es depositado en barcazas o pangas de mediana a gran capacidad, no autopropulsables, las cuales completan el ciclo de acarreo y disposición final del material.

El equipo más recomendado es la pala retroexcavadora debido principalmente a que la draga de cucharón requiere que el material de la voladura este bien fragmentado y suelto, como no se pueden garantizar estas condiciones es más óptima la pala.

## V.2. EFECTO DE LAS EXPLOSIONES SUBMARINAS.

En el agua, la energía de explosión se transmite con gran eficiencia, por lo que la onda de choque tiene un alto poder destructivo incluso a gran distancia, y puede dañar estructuras cercanas, embarcaciones, así como la fauna acuática existente.

Los principales problemas asociados a las explosiones bajo el agua son:

Vibraciones terrestres, que son más importantes cuando el explosivo se encuentra confinado en el barreno perforado en roca, estas pueden ir acompañadas de ondas de baja frecuencia.

Onda de choque hidráulica, ondulaciones elásticas viajando a través del fondo marino y del agua, la intensidad depende del tamaño de la carga de explosivo.

Uno de los procedimientos más usuales para combatir el efecto de la presión de onda hidráulica consiste en rodear con una cortina de burbujas la zona de voladura para aislarla del resto del entorno. La cortina de burbujas consta básicamente de una o dos tuberías paralelas que yacen en el lecho del mar, y a lo largo de las cuales es bombeado aire a presión. El aire escapa a través de pequeños orificios perforados, formando las burbujas que ascienden hacia la superficie.

En el cuadro siguiente se indica un arreglo típico de una instalación de pantalla de burbujas.

<b>Diámetro de tubería</b>	50 mm
Separación de orificios	100 mm
Diámetro de orificios	1.5 – 3.0 mm
Presión de aire	7 kg/cm <sup>2</sup>
Caudal por metro de tubería	0.13 l/s.m

Se ha demostrado experimentalmente que para un caudal de aire de 1.0 l/min.m, la sobre presión se reduce unas 10 veces, mientras que para un caudal doble lo hace unas 70 veces, debido a la formación de burbujas más pequeñas con mayor superficie efectiva que las burbujas más grandes.

Como apoyo a esta medida de mitigación de efectos de la voladura se recomienda reducir la carga de explosivos hasta que las vibraciones se reduzcan a los límites permisibles, es necesario realizar todo un estudio de los efectos de la voladura en el medio acuático variando los parámetros en la plantilla y en la carga de explosivos, pero sin alterar negativamente la fragmentación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. ESTABILIDAD

Es importante garantizar la estabilidad de los taludes finales de la excavación, ya que son obras permanentes y cualquier falla podría causar la pérdida de equipo, estructuras y vidas humanas, más aun en este caso en donde el canal de navegación será transitado continuamente.

Los análisis realizados para estabilizar han sido soportados con robustos programas de pruebas de laboratorio geológicas y mecánicas, de igual manera los resultados han sido revisados por especialista en Mecánica de Rocas.

Para garantizar la estabilidad en el Talud Norte por arriba del N+0, se determina una pendiente de 0.50:1 con altura de bancos máxima de 20 m, intercalando bermas de 5 m, hasta al terreno natural, secciones A y B, plano 4.

El talud final, se propone un tratamiento selectivo de anclaje dirigido a bloques inestables que se formarían durante la excavación, que estimamos será del orden de 10% del talud expuesto, y se deberá vigilar en campo su formación por un especialista, los bloques detectados se les aplica el tratamiento de soporte que consiste en anclaje de fricción de 2.54 cm (1") de diámetro y 6.0 m de longitud, en patrón de 2.8 x 2.8 m.

También deberá considerarse dos líneas de drenaje profundo en cada berma ubicadas por arriba del nivel N+0, las dos líneas mencionadas se ubicaran a 2 y 5 m por arriba del piso de cada berma que consisten en perforaciones de 5.71 cm (2 ¼") de diámetro, de 4 m de longitud en patrón de 5,6 m de separación horizontal

Talud Sur por arriba del N+0, en este sitio se recomiendan taludes con pendiente 0.50:1, con alturas máximas de 20 m, intercalando bermas de 5 m, hasta llegar al terreno natural, secciones A y B, plano 4.

Para el talud final se recomienda dos líneas de barrenos de drenaje en cada berma, las líneas se ubicarán a 2 y 5 m con por arriba del piso de cada berma que consisten en perforaciones de 5.71 cm (2 ¼") de diámetro, de 4 m de longitud en patrón de 5.6 m de separación horizontal.

## **2 MÉTODOS DE EXCAVACIÓN**

### **2.1 EXCAVACIÓN POR ARRIBA DEL NIVEL +0.00**

La excavación por arriba del nivel del mar será realizada con el método de excavación superficial en donde se desarrolla el ciclo básico de explotación: barrenación, cargado, rezagado y acarreo.

Este método se aplicará en la barra de tierra firme que se ubica entre la Laguna de Cuyutlán y el Océano Pacífico. Se calculó un volumen de excavación superficial del orden de 500 000 m<sup>3</sup>.

Para el diseño de la excavación se recomiendan las siguientes especificaciones.

La altura máxima de los bancos que garantiza la estabilidad es de 8 m.

Se recomienda utilizar explosivos de media a alta velocidad (4000 a 5000 m/s), para reducir las vibraciones, combinando el de alta y baja densidad de explosivo (hidrogel y a granel), que se definirá en el diseño de la plantilla.

Se deberán optimizar los caminos existentes en el predio, tanto para la apertura de los frentes de explotación y la planeación de los accesos principales a cada nivel de banqueo.

Para evitar daños en los taludes finales debido a la excavación, será necesario realizar voladuras de precorte o poscorte, así como el monitoreo de vibraciones, de forma que no rebasen los límites permisibles en instalaciones aledañas.

Es indispensable mantener vigilancia especializada durante los trabajos, para registrar posibles cambios en las condiciones geológico-estructurales en la roca, que demanden la rectificación de los tratamientos de estabilización vertidos en este informe.

### **2.2 EXCAVACIÓN SUBMARINA CON EQUIPO SOBRE BARCAZA O PLATAFORMA**

El Método excavación con equipo montado sobre plataformas es el más adecuado para toda el área bajo el nivel del mar que abarca el proyecto del canal de navegación, se moverá un volumen aproximado de 1'500,000 m<sup>3</sup>, considerando 100 % de humedad en el cálculo de peso del material a mover.

Es más efectiva la excavación con equipo montado sobre plataforma, ya que según un estudio oceanográfico se tienen olas hasta de 2 m de altura que alterarían los procesos de ciclo de excavación si se opta por barcazas.

El ciclo de explotación submarina involucra los siguientes procesos: barrenación, cargado, dragado y disposición de material fuera del área del canal.

Se requerirá de ejecución de voladuras submarinas con objeto de fragmentar y remover la roca.

El equipo de dragado mecánico mas adecuado para la extracción de la roca fragmentada es la Pala Retroexcavadora, debido principalmente a su alta productividad y a las condiciones en la fragmentación.

Los equipos de perforación y el dragado del material deben contar con un alcance de 20m de profundidad.

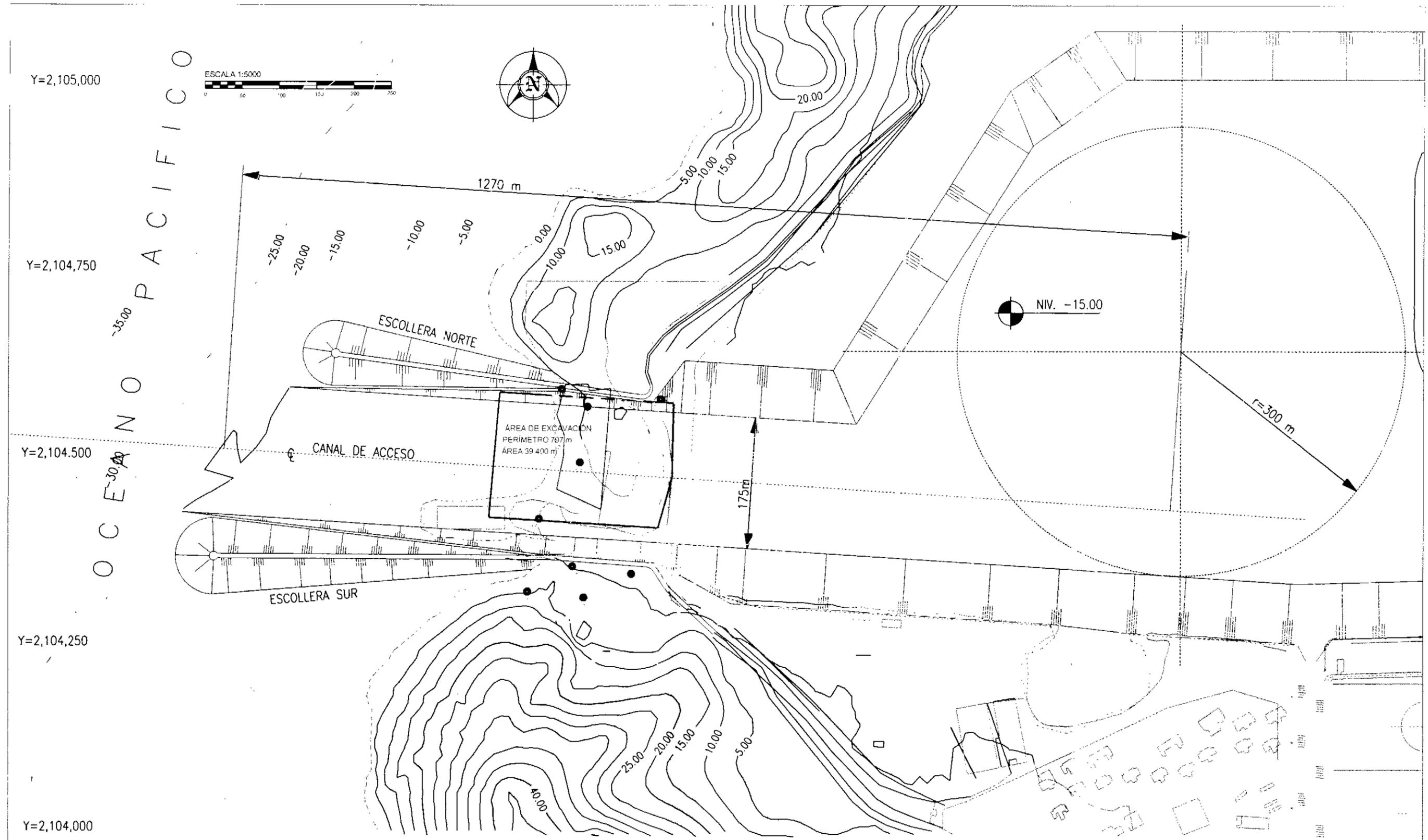
Para mitigar los efectos adversos de la voladura en el agua, se recomienda la cortina de burbujas de aire inyectadas desde una serie de tuberías instaladas en el fondo marino.

Todas las maniobras necesarias para la explotación se realizaran desde la superficie del agua, a excepción de la instalación y vigilancia la tubería que forma la cortina de burbujas.

De acuerdo a los perfiles de los barrenos resulta una recuperación y RQD global promedio de 66% y 23% respectivamente, en la masa de roca entre los niveles 0.00 y – 17.00 msnm; por lo que se estima que será aprovechable para la construcción del núcleo y capa secundaria de las escolleras entre 40 y 50% del volumen de excavación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. SCT, Normas de Calidad de los Materiales, 2004
2. SCT, Normas de Costas y Puertos 003-D de Materiales inciso 003-D.03, 2003.
3. Break Waters Design and Construction, Conference organized by institute on Civil Engineers and held in London, mayo 1983
4. Shore Protection Manual Vol. II, Department of the army, USA, Waterways experiment station corps of engineer 1983
5. ASTM Standard, Construction soil and rocks, vol. 4.08. 1990
6. Informe inédito preliminar proporcionado por el Departamento de Oceanografía el pasado 190405.
7. Informe inédito preliminar, e información de barrenos de exploración y pruebas de permeabilidad proporcionada por el Departamento de Geología durante la etapa estudios CFE. 2005
8. CFE-CCS (2005) "Estudio sismo tectónico para la TGNL Manzanillo, Col." Centro de Costos de Estudios Sismo tectónicos, GEIC; abril 2005
9. CFE, Informe 05-19-SGM/S, "Estudio de Mecánica de Suelos para la TGNL Manzanillo, Col." GEIC. 2005
10. SWEDGE. Probabilistic analysis of the geometry and stability of underground wedges". Geomechanics. Software & Research, Rocscience Inc. Canada 2002.
11. USACE US Army Corps of Engineers, Dredging and Dredged Material Disposal, Engineer Manual EM 1110-2-5025, 25 March 1983.
12. Flores Berrones Raúl, Flujo de agua a través de suelos, Avances en Hidráulica 4, 3ª edición, Asociación Mexicana de Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México 1999.
13. Undewater Drilling and Blasting for Rock Dredging, J.L. Abrahams. World Dredging Conference 1968. Palos Verdes California.



- Geometría Final del Canal
- Área de excavación en seco
- Topografía Superficial
- Nivel del Mar
- Batimetría



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ, JOSÉ I. IBARRA QUINTERO

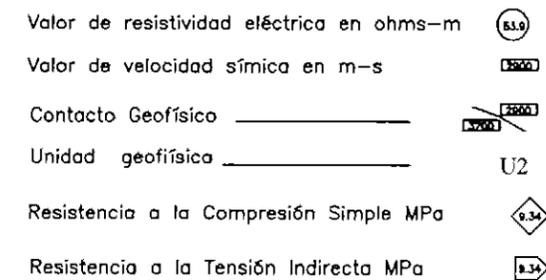
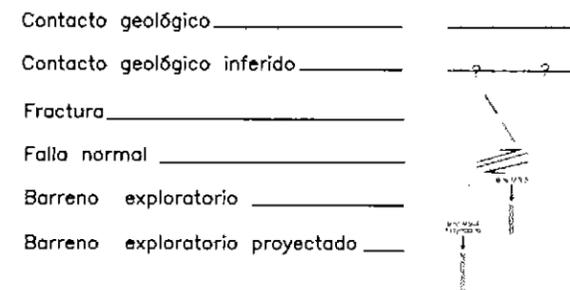
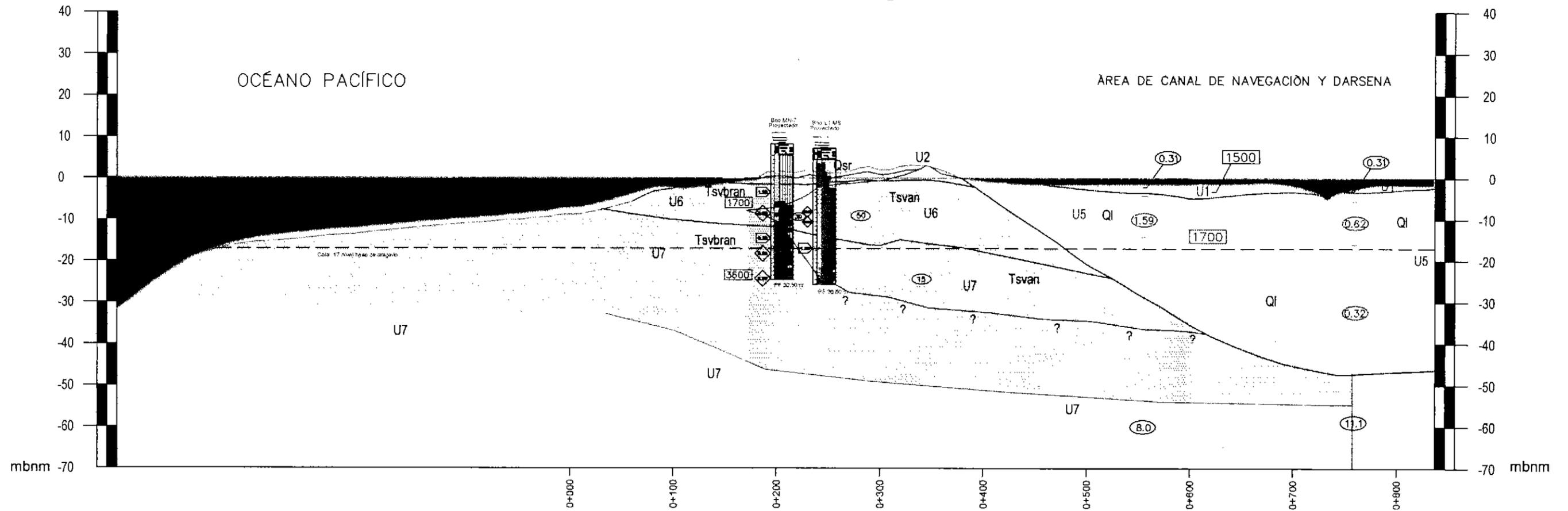
GEOMETRIA DE EXCAVACIÓN

PLANO 1  
ESCALA 1:5000





# LÍNEA 8



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

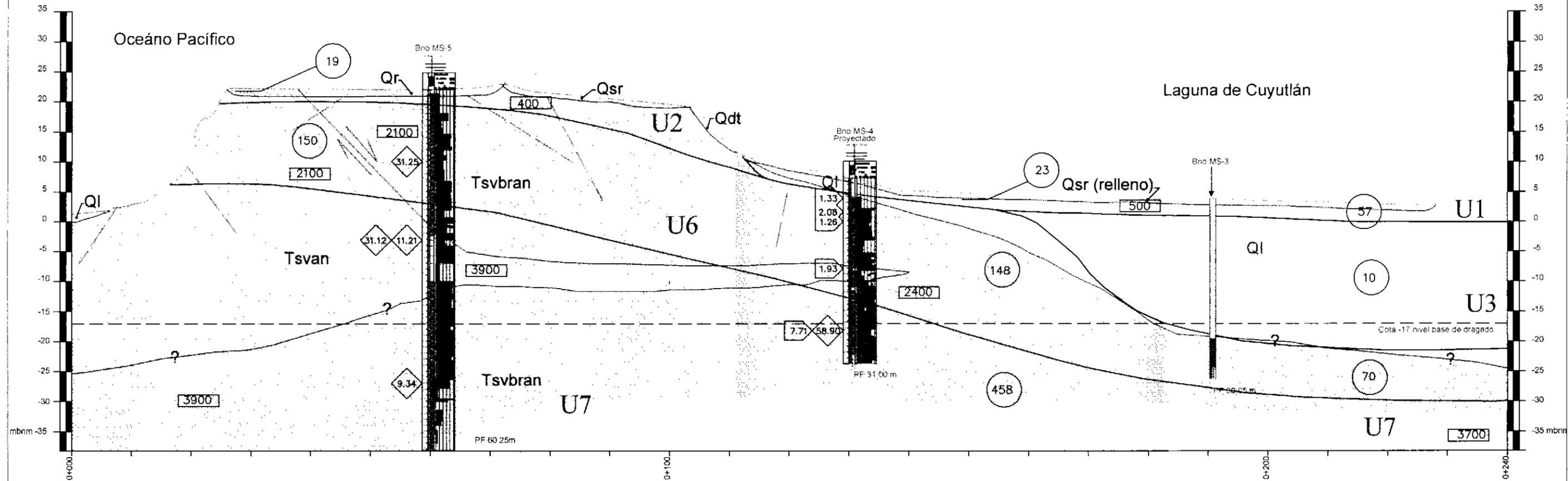
TESIS PROFESIONAL: ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ, JOSÉ I. IBARRA QUINTERO

SECCIÓN GEOTÉCNICA 8

PLANO 4a

ESCALA 1:1000

# LÍNEA 9



Contacto geológico \_\_\_\_\_

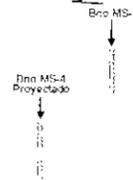
Contacto geológico inferido \_\_\_\_\_

Fractura \_\_\_\_\_

Falla normal \_\_\_\_\_

Barreno exploratorio \_\_\_\_\_

Barreno exploratorio proyectado \_\_\_\_\_



Valor de resistividad eléctrica en ohms-m (53.9)

Valor de velocidad sísmica en m-s (2900)

Contacto Geofísico (2900 / 3700)

Unidad geofísica (U2)

Resistencia a la Compresión Simple MPa (9.34)

Resistencia a la Tensión Indirecta MPa (9.34)



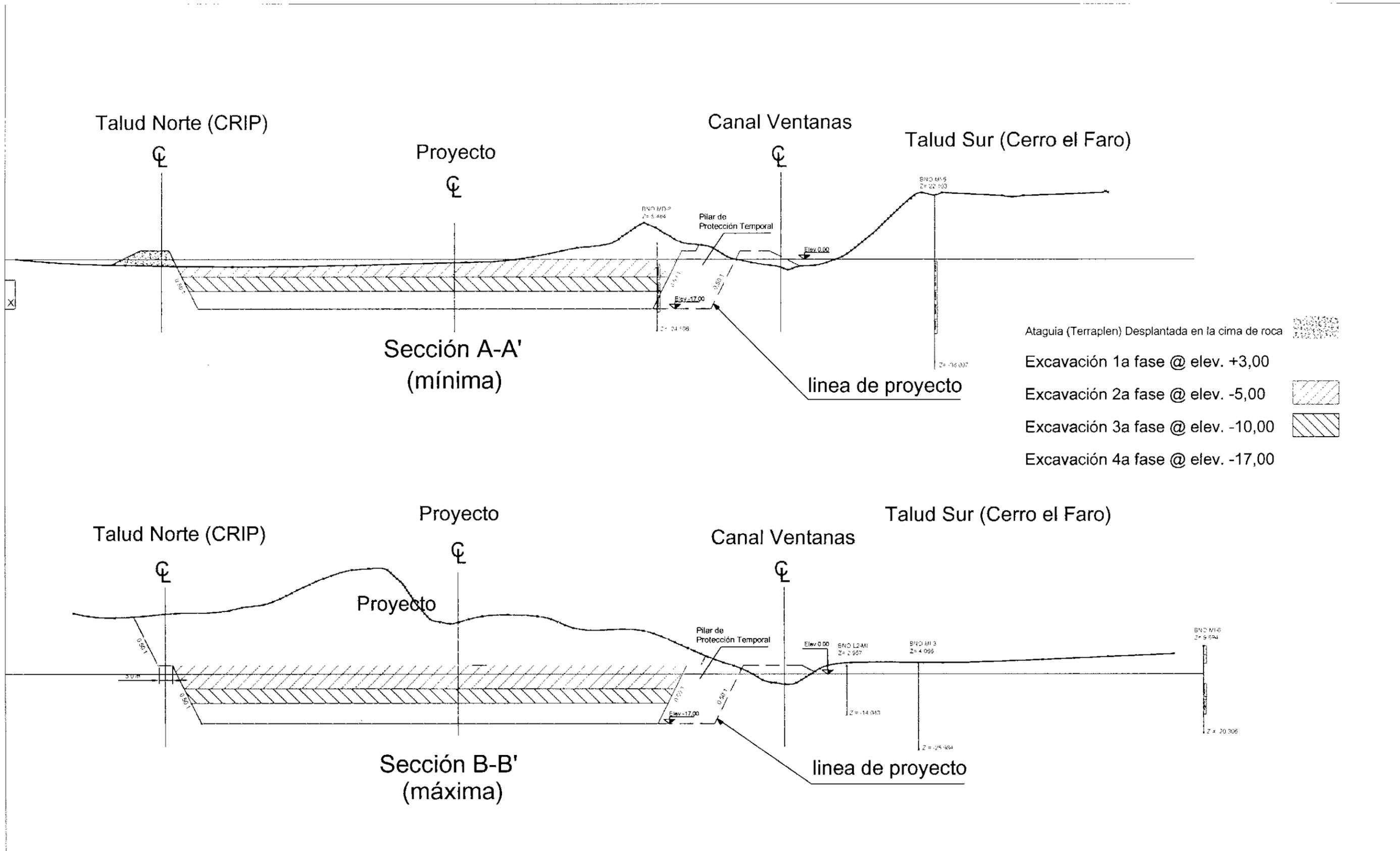
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL: ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ, JOSÉ I. IBARRA QUINTERO

SECCIÓN GEOTÉCNICA 9

PLANO 4b

ESCALA 1:1000



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

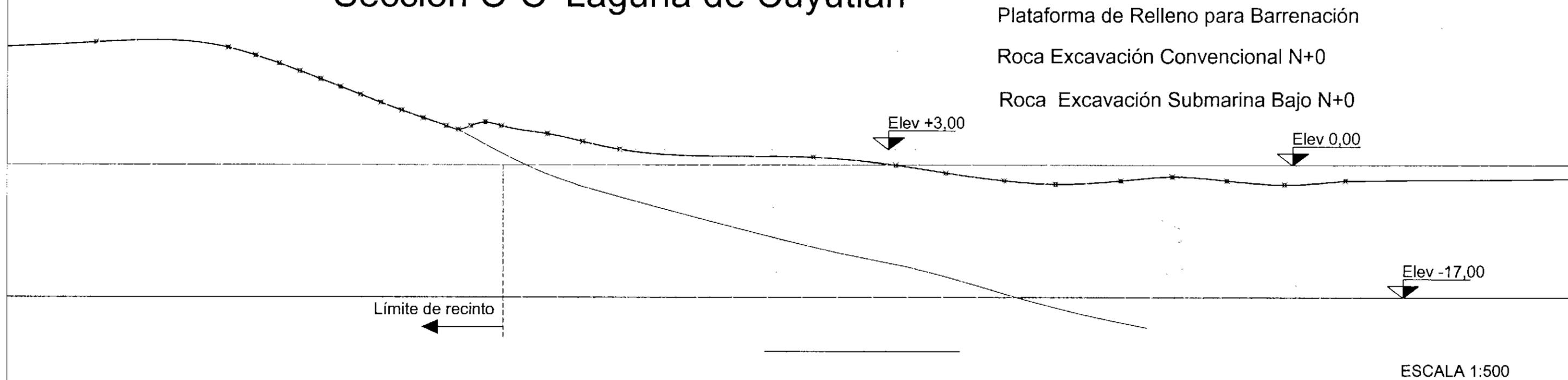
TESIS PROFESIONAL: ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ, JOSÉ I. IBARRA QUINTERO

SECCIONES A Y B, PROCEDIMIENTO  
CONCEPTUAL DE EXCAVACIÓN EN SECO

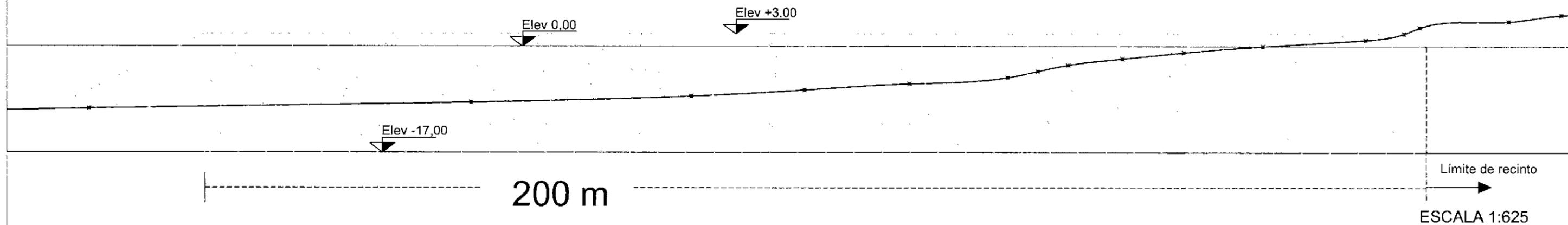
PLANO 5

ESCALA 1:1250

## Sección C-C' Laguna de Cuyutlan



## Sección C-C' Canal Oeste (Oceáno Pacífico)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS PROFESIONAL: ERIKA LOMELÍ RODRÍGUEZ, JOSÉ I. IBARRA QUINTERO

EXCAVACIÓN CON PLATAFORMA  
DE RELLENO

PLANO 6

ESCALA INDICADA