

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

“DISEÑO GEOTÉCNICO PARA  
ESTABILIZACIÓN DEL DEPÓSITO DE  
JALES MINEROS (PRESA I), EN NACOZARI  
DE GARCÍA, SONORA, MEXICO.”

**TESIS**

Que para obtener el Grado de:  
**Maestro en Ciencias-Geología.**



**PRESENTA:**

**JACINTO A. RIVERA CASTELO.**

**Hermosillo, Sonora, Enero del 2009**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

***DEDICATORIA:***

***Dedico este trabajo a mis padres y hermanos que me inspiraron a seguir y terminar con mis estudios de maestría, así como a todas aquellas personas que creyeron en mí.***

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico durante el tiempo invertido en mis estudios de Maestría.

A la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) y particularmente al Dr. Alberto Ramírez, responsable de la evaluación técnica del proyecto, por el financiamiento otorgado.

A la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) Región 9, en especial a Emily Pimentel y Bill Keener, por su apoyo para la realización del proyecto, así como las sugerencias al mismo.

Al Dr. Edward Surbbrugg de TetraTech Inc. por su apoyo en la realización de los análisis geoquímicos con el equipo portátil de fluorescencia de rayos X.

Al Ing. Victor Del Castillo de Southern Copper Grupo México por su constante apoyo e interés en el proyecto, así como por sus valiosos comentarios y consejos.

A la Universidad de Arizona (AZ), en especial a la Dra. Raina Maier por su apoyo técnico.

Al Centro Binacional, en especial a Denisse Moreno, por su disposición y apoyo al proyecto, además de facilitar una estancia en la Universidad de Arizona.

Agradezco a la Dra. Diana Meza Figueroa y al Dr. Sergio Alan Moreno Zazueta, por ser guía excepcional en el desarrollo, ejecución y elaboración de este proyecto, además por su constante apoyo, invaluable enseñanzas, soporte y confianza durante mis estudios de maestría.

A la M.C. Margarita de la O Villanueva y al M.C. J. Ismael Minjarez Sosa, por ser parte de mi comité y por sus valiosos comentarios.

Quiero expresar mi agradecimiento a todo el personal académico y administrativo de la Universidad de Sonora (UNISON), por su disponibilidad y por la ayuda brindada durante mis estudios de posgrado.

Mil gracias también a los estudiantes y compañeros de la Maestría, en particular a Alberto Campillo y Hugo Zúñiga, por su apoyo y colaboración, en este trabajo.

Finalmente debo extender este agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna u otra forma me apoyaron.

## INDICE

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>RESÚMEN.</b>   |      |
| <b>ABSTRACT.</b>  |      |
| <b>I.INTRODUCCIÓN.....</b>  | 1    |
| <b>II.OBJETIVOS.....</b>  | 5    |
| II.1. Objetivos Generales.....                                      | 5    |
| II.2. Objetivos Específicos.....                                    | 5    |
| <b>III. ANTECEDENTES.....</b>                                       | 6    |
| III.1. Impactos ambientales de las presas de jales.....             | 7    |
| III.1.1.. Impactos por el agua.....                                 | 8    |
| III.1.1.1 Erosión hídrica.....                                      | 8    |
| III.1.1.2. Drenaje ácido.....                                       | 10   |
| III.2.Legislación ambiental y jales mineros.....                    | 12   |
| III.2.1.Situación mundial de la restauración minera.....            | 13   |
| III.2.2. Situación nacional de la restauración minera.....          | 15   |
| III.3. Caracterización, diseño y usos de terrenos restaurados.....  | 19   |
| <b>IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA.....</b>                                | 22   |
| IV.1. Área de estudio.....  | 22   |
| IV.2. Clima.....  | 24   |
| IV.3. Hidrografía.....  | 26   |
| <b>V. METODOLOGIA.....</b>  | 28   |
| V.1. Caracterización física del sitio.....                          | 29   |
| V.2. Análisis de riesgo.....  | 32   |
| V.3. Cálculo de la erosión hídrica.....                             | 34   |
| V.4. Muestreo y análisis geoquímico.....                            | 36   |
| V.5. Fitoestabilización.....  | 36   |
| <b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>                              | 38   |
| VI.1. Caracterización de los jales.....                             | 38   |
| VI.1.1 Altimetría y características hidrológicas.....               | 38   |
| VI.1.1.1 Levantamiento topográfico.....                             | 39   |
| VI.1.1.2 Escorrentía.....   | 41   |
| VI.1.1.3 Cubicación de los jales.....                               | 42   |
| VI.1.2 Propiedades físicas y geoquímicas de los jales.....          | 44   |
| VI.1.2.1 Determinación de la granulometría.....                     | 44   |
| VI.1.2.2 Cálculo de la densidad.....                                | 49   |
| VI.1.2.3 Erosión hídrica para suelos.....                           | 52   |
| VI.1.2.4 Erosión hídrica en jales.....                              | 58   |
| VI.1.2.5 Estudio de densidad de cárcavas.....                       | 67   |
| VI.1.2.6 Geoquímica de los jales.....                               | 69   |
| VI.2 Aplicación del análisis de riesgo para el sitio.....           | 73   |
| VI.2.1 Zona de inestabilidad crítica.....                           | 73   |
| VI.2.2 Aplicación del método Preliminary Hazard Analisis (PHA)..... | 77   |
| VI.3 Diseño geotécnico.....   | 81   |
| VI.3.1 Vertiente Norte.....   | 82   |
| VI.3.2 Vertiente Sur.....   | 83   |
| VI.3.3 Diseño de terrazas y taludes centrales.....                  | 83   |
| VI.3.4 Diseño de canales de desagüe.....                            | 88   |

|   |            |
|---|------------|
| VI.3.5 Movimiento de tierras.....                             | 93         |
| VI.3.6 Cálculo del área real.....                             | 96         |
| VI.3.7 Orientación del diseño a un uso recreativo.....        | 96         |
| VI.4 Fitorremediación.....                                    | 100        |
| VI.4.1 Geoquímica de suelos.....                              | 101        |
| VI.4.2 Propuesta de plantas con potencial estabilizador ..... | 106        |
| <b>VII. CONCLUSIONES.....</b>                                 | <b>111</b> |
| <b>VIII. BIBLIOGRAFIA.....</b>                                | <b>113</b> |

## INDICE DE FIGURAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Presas de jales existentes en Nacozari de García.....   | 3           |
| Figura 2. Procedimiento de almacenamiento mecánico de jales.....  | 7           |
| Figura 3. Modelo esquemático de formación de zonas de cementación en Ojancos (Chile).....   | 12          |
| Figura 4. Localización de los principales pasivos mineros existentes en Mexico.....   | 18          |
| Figura 5. Ubicación de Nacozari de García en la República Mexicana.....   | 23          |
| Figura 6. Localización de las tres presas de jales existentes en Nacozari de García.....  | 23          |
| Figura 7. Climas predominantes en el Estado de Sonora.....  | 24          |
| Figura 8. Temperatura media promedio mensual para el período comprendido de 1943-2006, datos obtenidos de la estación Nacozari de García.....       | 25          |
| Figura 9. Precipitación acumulada promedio mensual para el período comprendido de 1943-2006, datos obtenidos de la estación Nacozari de García..... | 26          |
| Figura 10. Evapotranspiración promedio mensual calculada a partir de los datos históricos de temperatura y evaporación de la zona.....              | 26          |
| Figura 11. Regiones hidrológicas y cuencas del Estado de Sonora.....  | 27          |
| Figura 12. Mapa topográfico incluyendo la Hidrología .....  | 28          |
| Figura 13. Metodología general desarrollada en este trabajo para un diseño estable....  | 29          |
| Figura 14. Diagrama de flujo indicando la información a generar en este trabajo.....  | 29          |
| Figura 15. Metodología desarrollada en el área de ingeniería.....   | 31          |
| Figura 16. Metodología desarrollada para la obtención de la erosión hídrica.....  | 35          |
| Figura 17. Metodología desarrollada en los trabajos para la propuesta de Fitoestabilización.....  | 37          |
| Figura 18. Escorrentía representada en la cuenca de los jales de Nacozari.....  | 39          |
| Figura 19. Puntos registrados por la estación durante el recorrido sobre los jales.....   | 40          |
| Figura 20. Trabajo de triangulación generado por el programa AutoCAD 2004.....  | 41          |
| Figura 21. Curvas de nivel superpuestas en la triangulación de lo puntos.....   | 41          |
| Figura 22. Delimitación de la Vertiente Norte y de la Vertiente Sur.....  | 42          |
| Figura 23. Plataforma dibujada en el contacto entre el jal y el suelo.....  | 43          |
| Figura 24. Ubicación de las estaciones de muestreo.....   | 44          |
| Figura 25. Ubicación y extensión que cubren los jales de flotación.....   | 46          |
| Figura 26. Carta edafológica ampliada de Nacozari de García.....  | 52          |
| Figura 27. Carta topográfica de Nacozari de García.....   | 56          |
| Figura 28. Cantidad promedio mensual de suelo erosionado en Nacozari.....   | 57          |
| Figura 29. Cantidad promedio estacional de suelo erosionado en Nacozari.....  | 58          |
| Figura 30. Representación de las secciones en vista de planta sobre los jales de Nacozari.....  | 61          |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 31. Sección A-A', mostrando los cambios de pendiente más notorios a lo largo de la topografía de los jales gruesos.....   | 62  |
| Figura 32. Sección B-B', mostrando los cambios más notorios a lo largo de la topografía de los jales finos.....                  | 63  |
| Figura 33. Gráfico comparativo de la erosión promedio mensual para cada tipo de jal según su granulometría.....                  | 65  |
| Figura 34. Gráfico comparativo de la erosión promedio estacional para cada tipo de jal según su granulometría.....               | 66  |
| Figura 35. Porcentaje de cantidades erosionadas correspondientes a suelos y jales del poblado Nacozari de García.....            | 66  |
| Figura 36. Zonas de máxima formación de cárcavas.....  | 69  |
| Figura 37. Localización de los puntos de muestreo en jales, sales y suelos.....  | 72  |
| Figura 38. Bloque que se está desplazando en la parte noroeste (NW) de los jales.....  | 75  |
| Figura 39. Figuras geométricas desglosadas a partir de la forma real del bloque de inestabilidad crítica.....                    | 76  |
| Figura 40. Plan director con zonificación de usos.....   | 82  |
| Figura 41. Perfiles de las terrazas en la Vertiente Norte y la Vertiente Sur.....  | 85  |
| Figura 42. Forma y dirección de los arcos de las terrazas.....   | 85  |
| Figura 43. Altura real del banco.....  | 86  |
| Figura 44. Representación de los tres taludes centrales y las terrazas en vista de planta.....                                   | 88  |
| Figura 45. Vista de planta que nos muestra los canales de desagüe en ambas vertientes.....                                       | 89  |
| Figura 46. Sección transversal del canal de desagüe en la Vertiente Norte (tramo en la cima del talud).....                      | 89  |
| Figura 47. Sección transversal del canal de desagüe en la Vertiente Norte (tramo al pie del talud).....                          | 90  |
| Figura 48. Sección longitudinal del canal de desagüe en la Vertiente Norte.....  | 91  |
| Figura 49. Sección transversal del canal de desagüe en la Vertiente Sur.....   | 92  |
| Figura 50. Vista de planta de la propuesta de diseño.....  | 93  |
| Figura 51. Perfiles que se trabajarán para realizar el cálculo del movimiento de tierras.....                                    | 94  |
| Figura 52. Perfil 69, se puede apreciar el área (S), entre ambos perfiles.....   | 95  |
| Figura 53. Diseño conceptual de recuperación con uso recreativo en el depósito de jales en el poblado de Nacozari de García..... | 97  |
| Figura 54. Diseño detallado para el depósito de jales mineros de Nacozari de García para una recuperación de uso recreativo..... | 98  |
| Figura 55. Sección transversal del camino de la Vertiente Norte, mostrando sus dimensiones.....                                  | 99  |
| Figura 56. Sección transversal del camino de la Vertiente Sur, mostrando sus dimensiones.....                                    | 99  |
| Figura 57. Longitud de las capas que servirán de cubierta para los jales de Nacozari   | 100 |
| Figura 58. Concentraciones en mg/Kg de elementos en jales, sales eflorescentes y posibles suelos de préstamo.....                | 102 |
| Figura 59. Localización de la segunda fuente posible de suelo de préstamo como cubierta para los jales.....                      | 103 |
| Figura 60. Concentraciones de suelos naturales y los límites permisibles.....  | 103 |
| Figura 61. Gráfica As vs Cu, mostrando correlación positiva.....   | 104 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 62. Gráfica Zn vs Cu, mostrando correlación positiva.....                    | 105 |
| Figura 63. Gráfica Mn vs Zn, no presenta correlación entre éstos dos elementos..... | 105 |

## INDICE DE FOTOGRAFÍAS

|   |     |
|---|-----|
| Fotografía 1. Impactos de los jales de Nacozari en la comunidad.....  | 5   |
| Fotografía 2. Ejemplo de derrame en Aznalcollar, España.....  | 10  |
| Fotografía 3. Drenaje ácido de mina. Note la fuerte coloración rojiza, dada por especies oxidadas de hierro.....                              | 11  |
| Fotografía 4. Vista de los trabajos de restauración en la mina Cuale.....   | 17  |
| Fotografía 5. Restauración de la Mina Sultepec, Sultepec, Edo. de México.....   | 18  |
| Fotografía 6. Componentes de la estación de GPS, usada en el levantamiento topográfico de los jales de Nacozari.....                          | 39  |
| Fotografía 7.- Estaciones de muestreos LP1, LP2, LP3, LP4 y LP5 correspondientemente.....   | 45  |
| Fotografía 8.- Muestreo realizado en jales de granulometría gruesa.....   | 45  |
| Fotografía 9.- Muestreo en la zona de jales finos.....  | 47  |
| Fotografía 10.- Acumulación de sales eflorescentes en la superficie de los jales finos.....   | 49  |
| Fotografía 11.- Densímetro Electrónico Alfa Mirage EW-300SG.....  | 50  |
| Fotografía 12.- Cárcavas generadas por erosión hídrica a través del agua de escorrentía.....  | 68  |
| Fotografía 13.- Análisis de jales y sales eflorescentes utilizando fluorescencia de rayos X (XRF) portátil Innov-XT400.....                   | 71  |
| Fotografía 14.- Alta pendiente del bloque de inestabilidad crítica en el noroeste del sitio de los jales.....                                 | 74  |
| Fotografía 15.- Imágenes mostrando un cambio de pendiente significativo en el bloque.....   | 77  |
| Fotografía 16.- Experimentos de invernadero en la Universidad de Arizona, usando Atriplex Lentiformis y Buffalo Grass en Agosto del 2008..... | 110 |
| Fotografía 17.- Experimentos de invernadero en la Universidad de Arizona, usando Atriplex Lentiformis y Buffalo Grass en Agosto del 2008..... | 110 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.- Estados donde se han realizado algunos trabajos de restauración de minas en México.....  | 16 |
| Tabla 2.- Capacidad de acogida de diferentes actividades.....  | 20 |
| Tabla 3.- Relación entre la velocidad del viento y su energía.....   | 34 |
| Tabla 4.- Clasificación granulométrica de las partículas de cada muestra de los jales de Nacozari de García en base a su porcentaje..... | 47 |
| Tabla 5.- Densidades obtenidas de cada muestra y la densidad promedio de los jales.....  | 50 |
| Tabla 6.- Promedios mensuales y anual de precipitación registrados en Nacozari de García (1943-2006).....                                | 53 |
| Tabla 7.- Valores de R para cada mes del año.....  | 54 |
| Tabla 8.- Valores correspondientes para el suelo xerosol h y feozem h.....   | 55 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla 9.- Valor del coeficiente de vegetación correspondiente a cada metro cuadrado muestreado.....  | 56  |
| Tabla 10.- Valores de erosión correspondientes a cada mes y para cada tipo de suelo.....   | 56  |
| Tabla 11.- Cantidad erosionada por período estacional, para cada tipo de suelo.....  | 58  |
| Tabla 12.- Características de cada tipo de jal según su clasificación granulométrica....   | 59  |
| Tabla 13.- Porcentaje promedio para cada tipo de jales correspondiente a cada clasificación granulométrica.....  | 60  |
| Tabla 14.- Pendiente promedio obtenida para cada sección trazada.....  | 64  |
| Tabla 15.- Erosión promedio correspondiente a cada mes del año, para cada tipo de jales.....   | 64  |
| Tabla 16.- Erosión promedio correspondiente a cada estación del año.....   | 65  |
| Tabla 17.- Densidad de cárcava que corresponde a cada una de las zonas mostradas en laFigura 36.....   | 68  |
| Tabla 18.- Concentración promedio de elementos en los jales y en suelos de Nacozari.....   | 70  |
| Tabla 19.- Inventario de peligros que ajustan el método PHA a el sitio de Nacozari de García.....  | 78  |
| Tabla 20.- Severidad de las consecuencias.....   | 78  |
| Tabla 21.- Probabilidad del percance.....  | 79  |
| Tabla 22.- Peligros de diseño y operación del depósito de jales de Nacozari de García.....   | 79  |
| Tabla 23.- Tipo de acción que se debe aplicar según la distribución espacial de los posibles peligros.....   | 80  |
| Tabla 24.- Inventario de plantas nativas en el sitio de Nacozari de García y sus alrededores.....  | 106 |
| Tabla 25.- Familia de plantas candidatas al empleo en trabajos de fitoestabilización.....  | 107 |
| Tabla 26.- Características más importantes de los sitios de Nacozari de García y Zacatecas.....  | 108 |
| Tabla 27.- pH de muestras de suelo y escoria colectadas en la mina El Bote en Zacatecas.....   | 108 |
| Tabla 28.- Concentración total y DTPA de elementos traza solubles en suelos y residuos de desechos de la mina El Bote.....                                 | 109 |
| Tabla 29.- Factor de bioconcentración de elementos traza en plantas nativas utilizadas en mezclas de suelos y desechos alrededor del depósito El Bote..... | 109 |

## RESÚMEN

En el área del poblado de Nacozari de García se localizan tres zonas con depósitos de jales mineros que son resultado de la explotación de la antigua mina Pilares, comprendiendo un total de 52 hectáreas. Este trabajo se centra en el estudio del área 1 la cual se localiza dentro de la mancha urbana de Nacozari, cubriendo aproximadamente 19 hectáreas. Los jales del área 1 no están confinados, carecen de cubierta vegetal y altas pendientes de hasta 50°, en varios taludes, lo que los hace susceptibles a una alta erosión hídrica, eólica, así como posible colapso de material.

Los estudios geotécnicos y geoquímicos realizados hacen que el sitio se caracterice por los siguientes problemas: i) la presencia de un bloque altamente inestable en la vertiente NW de los jales. Dicho bloque de 20,300 m<sup>3</sup>, en caso de desplazarse hacia abajo podría cubrir algunas viviendas localizadas en la base de la pila de jales. ii) la erosión hídrica de los jales es 20 veces mayor que la de los suelos. iii) la evaluación geoquímica en jales y suelos, indica que aunque en términos de su toxicidad y capacidad para la generación de drenaje ácido los jales no son peligrosos (NOM-141-SEMARNAT-2003), si existe una acumulación de metales en sales eflorescentes formadas en la superficie de los jales la cual excede un 200% de la concentración de metales en jales. Estas sales representan un riesgo a la salud de los pobladores ya que son susceptibles de dispersión por viento y a la vez esta acumulación representa un reto para el establecimiento de la cubierta vegetativa en el área sureste de los jales. iv) la evaluación mediante un análisis de riesgo, muestra que el principal problema a abordar es la inestabilidad física de los montículos, debido a que existen viviendas en la base de los jales.

Por estas razones existe la necesidad de realizar o proponer métodos alternativos para la estabilización de los jales, siendo éste un diseño geotécnico para preparación del sitio y una propuesta para la remediación de los jales.

El diseño geotécnico considera los resultados del análisis preliminar de riesgos y se centra en la estabilización de los jales, reduciendo pendientes e incluyendo un sistema eficiente de drenaje por medio de un modelo de terrazas, además de la colocación de una cubierta vegetativa que disminuiría el impacto del transporte del material de jales hacia los suelos residenciales y a la vez, contribuiría a la reducción de la erosión eólica de los jales de granulometrías finas.

La propuesta para la remediación de los jales considera una preparación para restauración de uso recreativo en la cual se considera la implementación de la técnica de fitoestabilización en la zona SE de los jales, lo cual permitirá establecer plantas nativas que fijen los metales en las raíces. Los resultados de invernadero realizados en la Universidad de Arizona con jales de Nacozari, muestran efectividad para *Atriplex lentiformis*, sin embargo al no ser esta una planta nativa del sitio se propone la familia *Euphorbiaceae* de plantas nativas que son potencialmente fitoestabilizadoras en esta zona semiárida.

## ABSTRACT

Old mining activities of the former Pilares mine left mine tailings deposits currently distributed in three areas near Nacozari de García and covering a total surface of 52 hectares. This work shows results from a research conducted on site 1 within the urban area of Nacozari. This area covers a total surface of 19 h. The studied mine tailings are unconfined, lack of vegetative cover and characterized by strong slopes (as high as 50°) particularly in the northwest side. The tailings are highly eroded and susceptible for collapsing.

Geotechnical and geochemical studies identify the following problems associated to the site: i) the presence of a highly unstable block towards the NW side of the tailings. The block is 20 300 m<sup>3</sup>, and around 6 houses are in high risk in case of collapsing material. ii) hydric erosion of the tailings is 20 times higher than those in soils. iii) geochemical evaluation in tailings and soils, shows that in terms of their toxicity and capacity for generation of acid drainage the tailings should not be considered as dangerous (NOM-141-SEMARNAT-2003). However, this study allowed for the identification of efflorescent salts formed at the tailings surface, exceeding a 200% the metal-concentration in tailings. The metal-enriched salts represent a potential risk for population because they can be dispersed by wind action and it also represent a challenge for the establishment of a vegetative cover. iv) a preliminary risk hazard evaluation shows that the main issue in the tailings is the physical instability.

A geotechnical design is proposed for site preparation, the design focuses on the physical stabilization of the mine tailings, it allows for a reduction of the slopes, it includes a drainage efficient-system and a vegetative cover which will reduce the impact of tailings-material transported downslope to residential areas. The implementation of this design would also reduce the eolic erosion.

Finally, a proposal for tailings remediation is included. The proposal considers a recreation use for the site and the implementation of phytostabilization techniques for the area SE of the tailings. Greenhouse studies conducted at the University of Arizona, with material collected from the Nacozari mine tailings, show successful growth of *Atriplex lentiformis*, however, since this plant is not native, a potential phytostabilization native family is proposed instead: *Euphorbiaceae* particularly for a semi-arid zone.

## I. INTRODUCCION

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica). De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, la industria minera nacional es mayoritariamente metálica, y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo. Sin embargo, la actividad minera ha generado históricamente altos volúmenes de desechos conocidos como jales mineros. Debido a la menor eficiencia de los métodos antiguos de beneficio, jales mineros inactivos que representan un pasivo histórico pueden contener cantidades elevadas de metales que representan un riesgo en la ecología y en la salud humana. En este contexto, Merrington y Alloway (1994) consideran los jales como “los componentes ambientales más importantes de los sitios mineros históricos”.

De acuerdo a la información de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, se estima que hay más de 100 000 sitios mineros inactivos o abandonados solo en ese país. En México, se desconoce la cantidad de sitios mineros inactivos. Según el Instituto Nacional de Ecología (INE), en el periodo de 1995 a 1997, se detectaron 161 sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos en 18 Estados de la República. Sin embargo, se estima que el número de sitios de este tipo que contienen residuos peligrosos, es mucho mayor y se desconoce. Desde 1988, más de 27 mil empresas han cumplido con la obligación de informar la generación de residuos peligrosos. Sin embargo, se desconoce el universo de empresas generadoras que no informan y desechan sus residuos clandestinamente, y se estima que el universo potencial es mayor a 100,000.

En base a esta información, dentro de los residuos peligrosos encontrados con mayor frecuencia en tiraderos clandestinos se encuentran los desechos provenientes de la industria minera (jales, metales y escorias de fundición) y petroquímica (hidrocarburos y químicos), además de aceites gastados provenientes de talleres mecánicos.

Las características de los jales: bajo pH, concentraciones variables de metales pesados, bajo contenido de materia orgánica, ausencia de estructura de suelo y baja retención de agua proporcionan un medio hostil para el desarrollo de vegetación. Adicionalmente, la mayoría de los jales tienen laderas con pendientes muy elevadas e

inestables. Esto facilita tanto la erosión hídrica como la eólica y la transferencia de material de los jales a suelos adyacentes.

Los procesos de erosión de los jales representan un riesgo inminente que puede causar daños importantes en las siguientes formas: i) la estabilidad estructural de los jales puede estar seriamente afectada por procesos intensos de erosión hídrica causando en algunos casos colapsos de material. ii) la generación de drenaje ácido y el transporte en solución de metales hacia cuerpos de agua. iii) transporte de partículas a través del viento y su posterior depositación en ambientes más susceptibles. Este último proceso es dominante en las zonas áridas y semi-áridas.

Estos procesos son especialmente importantes cuando los jales mineros están localizados cerca de asentamientos humanos o de áreas agrícolas, ya que representan un riesgo de exposición humana a los contaminantes, ya sea por medio del polvo o indirectamente por el consumo de productos agrícolas de los suelos contaminados. Remover o cubrir los jales con materiales no contaminados reduce el riesgo ambiental (Conesa, 2007). Sin embargo, estas técnicas son costosas y en algunos casos poco prácticas debido a los altos volúmenes de jales y la necesidad de un área para la disposición de material. La fitoremediación (revegetación) representa una tecnología de menor costo así como una opción a largo plazo para inmovilizar contaminantes y minimizar el riesgo ambiental de estos sitios. Las plantas estabilizan el suelo con el crecimiento de raíces y generación de materia orgánica lo que reduce la erosión hídrica.

Sin embargo, para proponer una estrategia de estabilización para jales inactivos es necesario realizar estudios de caracterización de sitio y, considerando dicha información, generar el modelo conceptual adecuado para estabilizar el sitio particular.

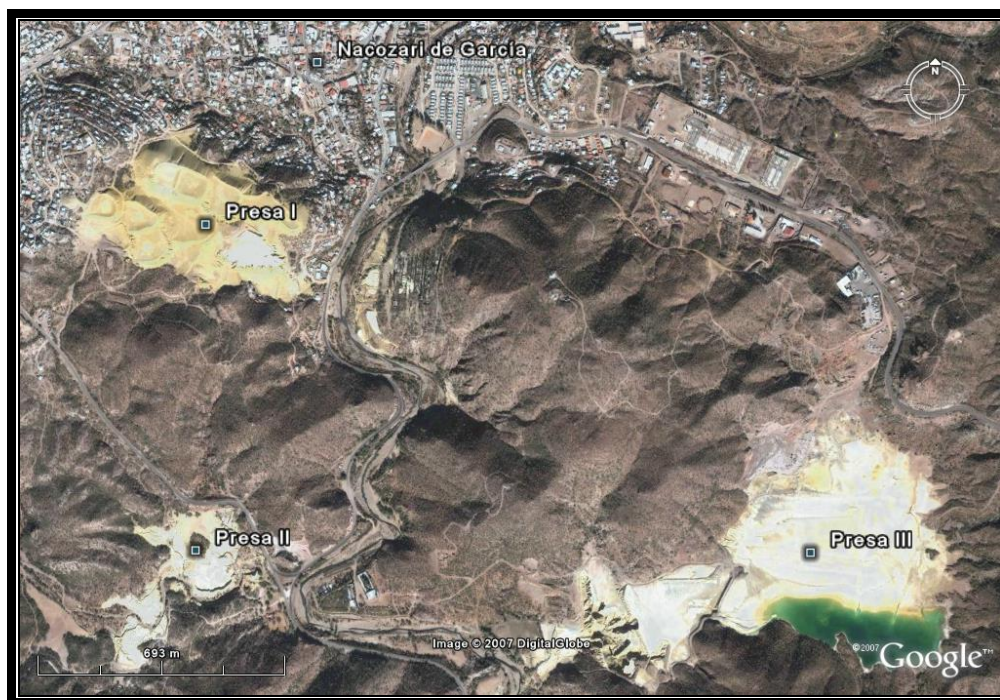
El estado de Sonora, al noroeste del país, posee una rica historia en la producción de cobre. Uno de los sitios de extracción de este metal se encuentra en el municipio de Nacozari de García. En él se ubican dos de las principales minas productoras de cobre en el país: Pilares y La Caridad, de las cuales, solo la última continúa sus actividades. En el presente trabajo se considera como estudio de caso al apilamiento de jales inactivo ubicado en el municipio de Nacozari de García, Sonora.

La historia minera del distrito de Nacozari se remonta a 1688, fecha en que se descubrieron varios yacimientos con mineralización económica de oro, plata y cobre, tales como Churunabi, La Fortuna, El Globo, La Caridad Vieja, Pilares, Santo Domingo, La

Guadalupe, La Lily y recientemente, el depósito cuprífero de la Caridad. El yacimiento cuprífero de Pilares fue descubierto en el año de 1886, siendo adquirido años más tarde por la compañía norteamericana Moctezuma Copper Company, convirtiéndose en uno de los principales polos de desarrollo en el norte y principal motor del estado en aquella época.

Pilares, fue una mina que se explotó por cobre en 1895, teniendo un gran auge a principios de este siglo, produciendo 3,000 ton/día, parando en 1949, después de producir 40 millones de toneladas de mineral (Alvarado et al., 2004).

Sus actividades se extendieron a lo largo de poco más de cincuenta años. Dicha producción generó una enorme cantidad de residuos (jales, terreros y material de descapote). Los jales fueron depositados en zonas distintas (*Figura 1*), cubriendo un total de 52 ha con un volumen total de 20 millones de toneladas de jales mineros (jales I, jales II y jales III). El crecimiento del pueblo Nacozari de García se desarrolló alrededor de la pila de desechos de la mina, tal que la ciudad ahora rodea a los jales más viejos de la mina (*Figura 1*). Debido a la abrupta topografía de Nacozari de García, la población está distribuida de forma irregular. Aproximadamente 40 familias viven alrededor de las orillas de los jales mineros, esto cubre un área aproximadamente de 19 ha.



*Figura 1.- Presas de jales existentes en Nacozari de García.*

Pasivos mineros localizados en los alrededores del poblado de Nacozari de García:

- 1) La presa de jales I que se localiza dentro del poblado en la parte Sur, y es en la que nos centraremos en este estudio.
- 2) La presa de jales II, es la de menor tamaño y volumen de las tres, y se encuentra a 1 km del poblado rumbo al SW, a la izquierda de la carretera 17 que conecta Moctezuma con Agua Prieta.
- 3) La presa de jales III, abarca una mayor extensión territorial, está localizada también en las afueras del poblado en la parte SE y a la derecha de la carretera rumbo a Agua Prieta un par de kilómetros antes de llegar a Nacozari.

La importancia e interés de trabajar particularmente con los jales que se encuentran dentro del poblado (Jales I) es precisamente que en su periferia se encuentran asentamientos humanos que de alguna u otra forma se ven amenazados por los desechos en cuestión por distintos factores físicos relacionados entre sí (clima y erosión) y que pueden llegar a representar un verdadero riesgo para los habitantes localizados a las faldas del pasivo (*Fotografía 1*).

La legislación mexicana no cubre los aspectos referentes a remediación de pasivos mineros históricos por lo que no hay antecedentes de trabajos de remediación al respecto. En la ausencia de normatividad, y cuando se trabaja con un pasivo minero, es necesario proponer alternativas utilizando una combinación de metodologías desde la perspectiva multidisciplinaria y que han sido aplicadas en otros países. En el caso de este trabajo se pretende adaptar estas metodologías al sitio específico de Nacozari de García. En este estudio se pretende integrar un diseño considerando la interacción de tres disciplinas: la Geología, la Ingeniería y la Microbiología.

El objetivo principal de este trabajo es generar un diseño conceptual que permita mejorar métodos existentes para estabilización y posterior remediación de jales mineros inactivos (pasivos) y que lleve a la protección de la salud humana y el ambiente.



Fotografía 1.- Impactos de los jales de Nacozari en la comunidad.

## II. OBJETIVOS

### II.1 Objetivos generales.

- Desarrollar un diseño para estabilización de taludes en función de los aspectos geotécnicos, geoquímicos, climáticos, geológicos, topográficos y sociales; auxiliado también en un análisis de riesgo, para el depósito de jales (Presa I), ubicado en el poblado de Nacozari de García, previo a su remediación.
- Propuesta para establecimiento de parcelas de prueba de vegetación y orientación del tipo de restauración a realizar en el sitio.

### II.2 Objetivos específicos.

- Levantamiento topográfico y cubicación de los jales.
- Caracterización de propiedades físicas de los jales.
- Cálculo de escorrentía y evaluación de erosión hídrica en jales y suelos de Nacozari de García.
- Elaboración de un análisis de riesgo.



- Elaboración de diseño ingenieril para estabilización de taludes cuidando los aspectos geotécnicos, para controlar la erosión hídrica y eólica, preparándolos para una posible fitorremediación.
- Identificación de sitios para extracción de suelo destinado como cubierta, en base a un diagnóstico geoquímico.

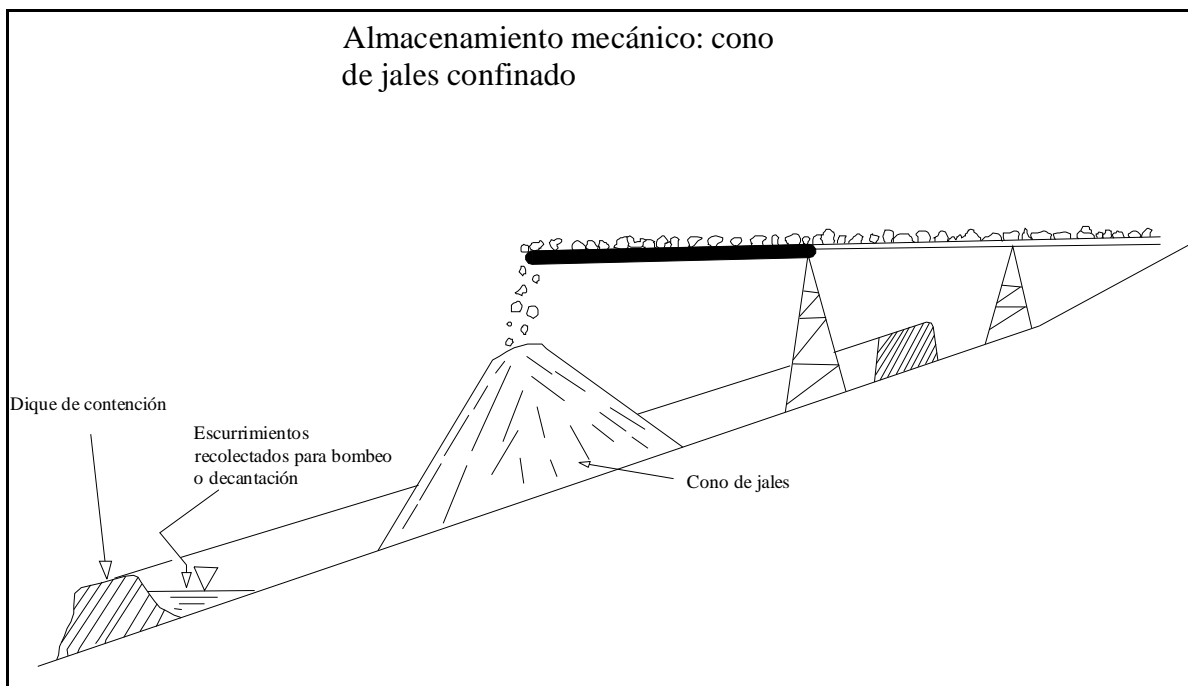
### **III. ANTECEDENTES**

Actualmente en la mayoría de los países la industria minera se rige bajo estrictas reglamentaciones que permiten el menor impacto posible a las áreas explotadas, sin embargo, las actividades mineras pasadas no se regían por estas leyes y como consecuencia, la actividad minera a nivel mundial ha dejado un legado global de sitios abandonados o pasivos mineros, que requieren ser remediados.

Los jales son el desecho que queda después de que se han extraído los minerales con valor comercial. Por lo general el mineral se tritura con un espesor equivalente al de la arena fina y el material con valor comercial se extrae en forma de un concentrado por flotación o procesos químicos. El producto sin valor que queda a la cola o al final del proceso, es llamado colas mineras (Legge et al., 1982). Este material no consolidado es apilado en depósitos o presas cuyas partículas pueden moverse fácilmente tanto por el impacto de las lluvias como por la acción del viento (Ramos & Siebe, 2006).

La naturaleza física y química de los jales está en función de la mena explotada y las operaciones de beneficio. Los métodos de disposición de jales son principalmente controlados por el contenido de agua de los jales, en el caso de jales activos. En general se identifican tres tipos de jales en base a su contenido de agua: húmedos, gruesos y secos. El tipo de disposición de jales es menos importante desde el punto de vista de los trabajos de remediación, sin embargo, el conocimiento del tipo de disposición de jales ayuda en la caracterización del material y en entender mejor las alternativas potenciales de remediación, ya que en el pasado, y en algunos países en la actualidad, los jales se depositaban en donde era conveniente. Para caracterizar presas inactivas de jales (pasivos mineros) es necesario conocer los criterios de diseño y construcción de presas activas. Este conocimiento nos permitirá interpretar los rasgos texturales en presas inactivas y de esta forma realizar un diseño adecuado para la estabilización de jales.

A juzgar por las características del depósito de jales ubicado en el poblado de Nacozari de García, éste almacenamiento corresponde a uno de tipo mecánico (*Figura 2*), ya que son un conjunto de apilamientos, donde el ángulo de los taludes corresponde al ángulo de reposo del material; además existen apilamientos posteriores depositados sobre apilamientos más antiguos, uno de éstos apilamientos tiene características diferentes debido al cambio en el sistema de beneficio de la planta, esto se nota principalmente en su granulometría.



*Figura 2.- Procedimiento de almacenamiento mecánico de jales ( Legge et al., 1993)*

### **III.1. Impactos ambientales de las presas de jales.**

Un depósito de jales, puede ocasionar diversos impactos como son: erosión hídrica, eólica, drenaje ácido de mina e impacto visual, entre otros. Las características climatológicas influyen en el desarrollo de estos impactos.

En áreas mineras donde la vegetación es nula o extremadamente baja, la naturaleza de los contaminantes sólidos o materiales producto de desechos mineros sumado a las características topográficas del sitio, puede afectar enormemente la hidrología y los procesos de erosión (Tamás & Kobács, 2003). Esto es importante en el caso de jales mineros localizados en zonas áridas y semi-áridas.

### **III.1.1. Impactos por el agua.**

Cuando el agua producto de las precipitaciones alcanza el suelo, se puede presentar problemas de escurrimiento en la superficie generando erosión hídrica, y en algunos casos, metales se disuelven y entran en solución, mientras que otros siguen fijos por adsorción y/o precipitados y se mueven con las partículas del suelo (Navarro et al., 2008).

#### **III.1.1.1. Erosión hídrica.**

En el caso de la erosión producida por el agua, el proceso puede ser analizado iniciando por el desprendimiento de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia y al mismo tiempo ocurre el proceso de flujo superficial o escorrentía, la cual hace que las partículas removidas sean incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo. Adicionalmente, las corrientes generan procesos de desprendimiento de partículas por acción de la fuerza del agua en movimiento. Los procesos son muy complejos y es común que varios procesos actúen conjuntamente.

Entre los principales tipos de erosión según Suárez, 2001 tenemos los siguientes:

1. Erosión por gotas de lluvia: Cuando las gotas de agua impactan el suelo desnudo pueden soltar y mover las partículas a distancias realmente sorprendentes. La erosión por golpeo de la lluvia (Splash erosion) ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo.

2. Erosión laminar: Las corrientes superficiales de agua pueden producir el desprendimiento de las capas más superficiales de suelo en un sistema de erosión por capas que se profundizan. La erosión laminar consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa. El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible.

3. Erosión en surcos: La concentración del flujo en pequeños canales o rugosidades hace que se profundicen estos pequeños canales formando una serie de surcos generalmente semiparalelos. La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie.

4. Erosión interna: El flujo de agua a través del suelo puede transportar partículas formando cavernas internas dentro de la tierra. La erosión interna incluye el transporte de partículas

en solución, suspensión y arrastre a través de cavernas interconectadas, o ductos y tubificación, o a lo largo del fondo de cimentaciones.

5. Erosión en cárcavas: Al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión se convierten en cárcavas, o varios pequeños surcos pueden unirse y crecer para formar una cárcava. Se denomina cárcava a un canal de erosión con una sección superior a un pie cuadrado. Estos canales ya no pueden ser eliminados con prácticas agrícolas. Las cárcavas son canales mucho más largos que los surcos.

6. Erosión en cauces de agua (erosión lateral y profundización): La fuerza tractiva del agua en las corrientes y ríos produce ampliación lateral de los cauces profundización y dinámica general de la corriente. Las corrientes de agua son volúmenes de agua en movimiento, los cuales debido a la fuerza tractiva de la corriente pueden producir el desprendimiento, transporte y depositación de las partículas de suelo o sedimentos tanto en el fondo como en la ribera de la corriente.

7. Erosión en masa (deslizamientos): El fenómeno de erosión en masa incluye el desprendimiento, transporte y depositación de grandes masas de suelo, por acción del agua. Las masas en movimiento se comportan como un fluido pero su comportamiento es diferente al de los flujos de sedimentos, especialmente debido a la alta concentración de sólidos. A estos movimientos se les denomina genéricamente como flujos o avalanchas.

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra.

Hay muchos ejemplos de colapsos de jales, entre ellos el accidente de Aznalcóllar en el Sur de España en 1998 (*Fotografía 2*). La ruptura del depósito de jales de una mina de pirita que la empresa Bolidén explotaba en Aznalcóllar (Sevilla) produjo un enorme desastre ecológico que afectó al parque natural de Doñana, 900,000m<sup>3</sup> de lodos y 3.6m<sup>3</sup> millones de aguas contaminadas con metales pesados y ácidos se esparcieron por el río Guadiamar provocando la destrucción de gran parte de la flora y fauna de la zona (Aguilar et al., 2003), eso fue considerado como uno de los peores desastres ecológicos en Europa en tiempos recientes; el transporte de metales provenientes del sitio minero principalmente del drenaje ácido y la erosión (hídrica y eólica) de las presas y depósitos de jales. Esos efectos contaminantes pueden alcanzar una zona local y, en algunos casos, a escala regional,

afectando zonas urbanas, ganaderas, acuícolas o agrícolas. Consecuentemente, hay un riesgo de ingestión de metales en humanos (Conesa, 2007).



*Fotografía 2.- En 1998 la ola negra por la rotura de la presa minera de Aznalcollar (Sevilla), produjo un enorme desastre ecológico que afectó al parque natural de Doñana.*

En el caso de zonas tropicales, donde se tienen precipitaciones anuales muy altas, la erosión hídrica sobre el área de un depósito de jales suele ser bastante intensa, al no contar éstos con una cubierta vegetal, el acarreo de material ocurre en grandes cantidades. En cambio en climas áridos y semi-áridos, las precipitaciones son mucho menores, siendo el fenómeno de erosión hídrica menor que en las zonas de abundantes lluvias; además al ser menor la densidad de vegetación en zonas secas, la intensidad del viento es mucho más fuerte, ocasionando una mayor erosión eólica en los suelos expuestos. El movimiento del viento ejerce fuerzas de fricción y levantamiento sobre las partículas de suelo, desprendiéndolas transportándolas y depositándolas

### **III.1.1.2. Drenaje ácido de mina.**

El drenaje ácido de mina consiste en la emisión o formación de aguas de gran acidez (García Meza, 2008), por lo general ricas en sulfatos, y con contenidos variables en metales pesados (*Fotografía 3*).

El drenaje ácido de mina en climas tropicales, se produce por la oxidación e hidrólisis de los sulfuros, para el caso de jales ricos en sulfuros, y en especial de la pirita



Fotografía 3.- Drenaje ácido de mina. Note la fuerte coloración rojiza, dada por especies oxidadas de hierro.

El entorno biológico juega un papel determinante en la generación de drenaje ácido de mina, la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es la mayor responsable de la contaminación relacionada con el drenaje ácido. Esta es una bacteria acidófila (propia de ambiente ácido), con una fisiología basada en la fijación de carbono a partir del CO<sub>2</sub> atmosférico, siendo por lo tanto estrictamente quimioautótrofa (utilizan sustancias químicas para producir sus propios alimentos). *T. ferrooxidans* obtiene su energía oxidando hierro o azufre; además, éstos microorganismos sobreviven a lugares de altas temperaturas. Como resultado se obtienen aguas de pH muy bajo (2-3), cargadas en sales, sobre todo en sulfatos, en las que normalmente son más solubles los metales pesados, como Pb, Zn, Cu, As, Cd.

En climas templados, las reacciones de oxidación de sulfuros liberan elementos que se transportan hacia abajo (infiltración), a condiciones geoquímicas más reductoras (bajo el nivel freático). Esto frecuentemente resulta en la retención de esos elementos por procesos de adsorción controlados por pH y/o la precipitación de fases minerales secundarias (e.g. óxidos de hierro y sulfuros de cobre). En contraste, en climas áridos, ocurre una migración hacia arriba bajo condiciones más oxidantes vía fuerza capilar (Dold y Fontboté, 2002). Estos autores muestran que en zonas de oxidación extremadamente ácidas (pH 1.7 a 4), el transporte de elementos hacia arriba lleva a la formación de minerales sulfatados solubles en agua, ocurriendo esto en la superficie de jales mineros de cobre (*Figura 3*).

Perfil representando la oxidación en jales ricos en carbonatos en depósitos de óxidos de Fe Cu-Au.

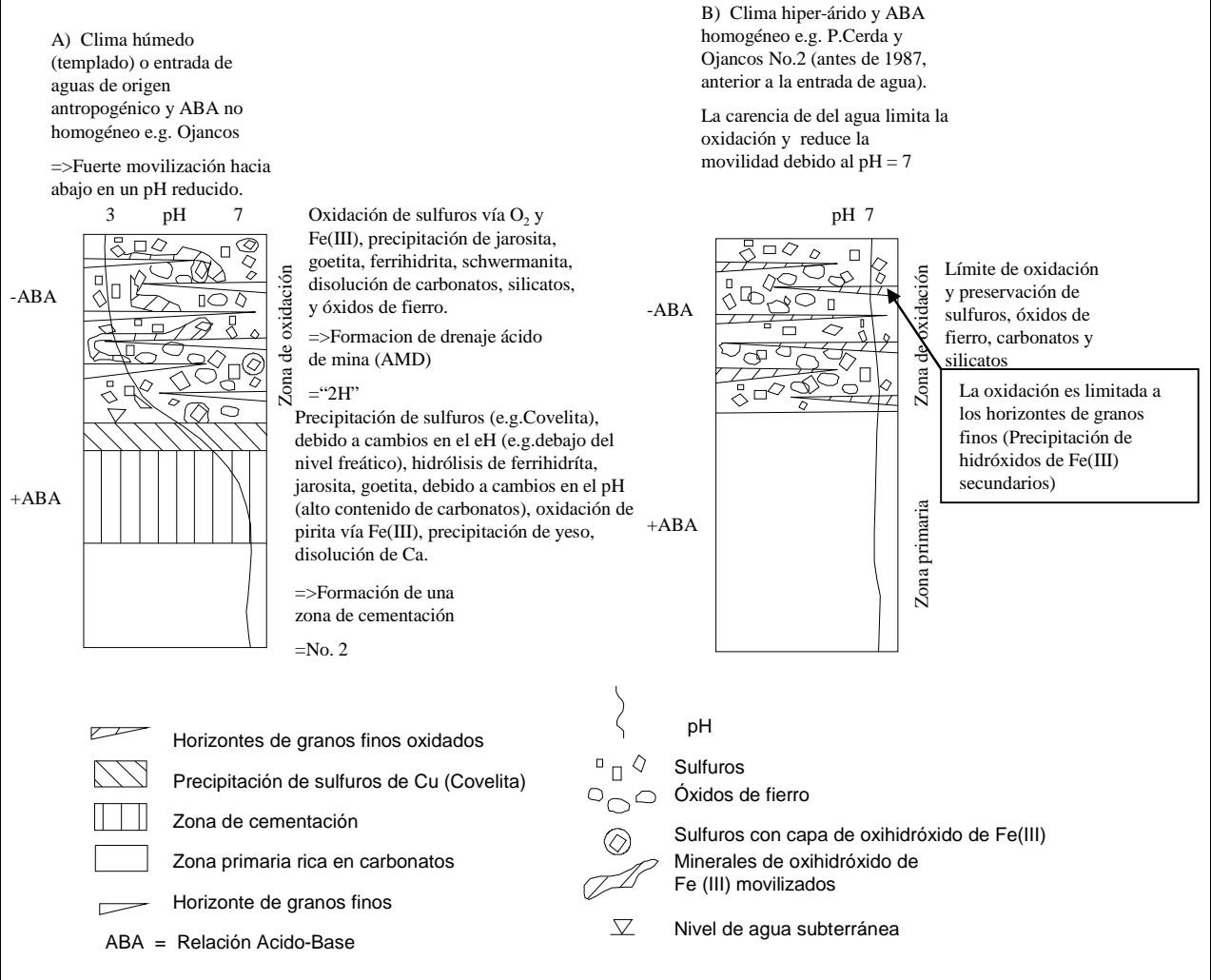


Figura 3.- (A) Modelo esquemático de formación de zonas de cementación en Ojancos (Chile), mostrando la lixiviación de elementos en la zona de oxidación con un bajo pH (-ABA en "2H") y precipitación de fases secundarias cuando la solución ácida alcanza la zona rica en carbonatos (+ABA en no.2). B) Modelo esquemático de una zona de oxidación con pH neutral (+ABA) y su desarrollo en climas hiperáridos (Tomada de Dold y Fontboté, 2002).

### III.2. Legislación ambiental y jales mineros.

Durante el movimiento verde de los años 60's, se manifestó el reconocimiento de que la conservación del ambiente, y la preservación de los paisajes naturales y los hábitats de plantas y animales, tenían un valor para la sociedad. Fue ésta misma la que comenzó a ejercer presión sobre los gobiernos para que regularan los impactos ambientales que generan las industrias, entre ellas la minera.

En consecuencia, algunos de los principales productores de minerales como Estados Unidos, Canadá y Australia comenzaron a legislar en materia ambiental sobre las

operaciones mineras superficiales en la segunda mitad del siglo XX. La legislación ambiental de la minería en estos países es variada en cuanto a competencias y contenidos, sin embargo en todas se contempla la restauración de minas (Jiménez et al., 2006).

La restauración de un terreno afectado por la minería consiste en devolverle en lo posible su aspecto original, después de la realización de las labores de extracción minera. Mientras que la remediación pretende solucionar los problemas de mayor dimensión, no solucionables mediante la simple restauración (Oyarzun & Higuera, 2003).

En países desarrollados, el cierre de minas es parte del ciclo de las operaciones mineras. Sus leyes contemplan además del procedimiento de evaluación de impacto ambiental, la solicitud de planes de manejo ambiental y el plan de restauración; así como los instrumentos económicos que permitan ejecutarlos.

### **III.2.1. Situación mundial de la restauración minera.**

Dado que en épocas pasadas estos aspectos no se tenían en cuenta, en la actualidad existe un sinnúmero de pasivos mineros no confinados y sin tratamiento. Una de las soluciones es la restauración de los depósitos y su aislamiento, entre materiales impermeables y/o aislantes desde el punto de vista físico-químico. Los trabajos no pueden circunscribirse tan solo en el depósito, sino también deben abarcar el tema de los cursos de agua que se hayan visto afectados durante el proceso de lixiviación. Esto constituye, evidentemente, un serio problema presupuestario (Higuera & Oyarzun, 2003).

En Estados Unidos, el superfondo fue creado el 11 de diciembre de 1980, generando un impuesto sobre las industrias petroleras y químicas que permitió que el gobierno federal respondiera ante las emisiones de desechos potencialmente peligrosos que pudieron dañar a la gente o el ambiente. El impuesto fue destinado a un fondo fiduciaria para remediaciones de sitios abandonados con desechos potencialmente peligrosos (sitios superfondo).

Un sitio superfondo es cualquier área en los Estados Unidos que ha sido contaminado por desechos peligrosos e identificados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como candidato a limpieza porque plantea un riesgo a la salud humana y/o al ambiente. El primer paso en el proceso de superfondo es identificar sitios abandonados o incontrolados de desechos peligrosos, para incluirlos o considerarlos en la lista de prioridades nacional (NPL) y actividades remediadoras a través de la nación.



En Europa, a partir de marzo de 1998 se ha incentivado con los premios europeos de restauración de terrenos que se otorgan a empresas europeas. Estos premios que pretenden reconocer los casos ejemplares de restauración de terrenos de antiguas explotaciones, son una demostración de los avances que se están realizando en materia de buenas prácticas de restauración en Europa.

Según Brodtkom (2002) éstas son algunas de las restauraciones más destacadas y significativas realizadas en Europa:

- Yacimiento de Haut-Saint-Martin-yeso (un ejemplo de biodiversidad en una antigua explotación en Francia), es una antigua explotación que ocupaba unas 25 ha, en la región parisina. La explotación fue completamente restaurada a partir de 1993, con objeto de promover la conservación de la fauna y de la flora local y de mejorar su integración en el medio ambiente natural.
- Las canteras de Taupes y Barbey-arenas y gravas para áridos (reservas naturales para aves en Francia), se extraen arenas y gravas para áridos, distantes entre si unos centenares de metros, han sido restauradas de manera ecológica dando lugar a dos nuevas zonas húmedas (de 25 y 35 ha) que ha permitido la llegada de una muy rica población de aves acuáticas migratorias y anidadoras.
- Yacimiento de Schelklingen-materias primas para cemento (Investigaciones en materia del cultivo de praderas en Alemania), es uno de sus yacimientos del Baden-Wuttemberg, la empresa ha desarrollado un proyecto original de investigación, orientado a esparcir, en el fondo de una cantera abandonada, césped cortado con el propósito de acelerar el crecimiento de la vegetación espontánea.
- Cantera de Artimes-calizas para cemento (Restauración de un ecosistema mediterráneo en Grecia), Al estar situada en un entorno natural y turístico del tipo mediterráneo, se realizaron grandes esfuerzos, durante la restauración del emplazamiento, para preservar el paisaje original y proteger el ecosistema natural propio de las zonas mediterráneas. En primer lugar se transportaron 400,000 toneladas de materiales inertes cerca de la planta de tratamiento para construir unos montículos entre 10 y 12m de altura y unos 1,500 m de longitud. Estos montículos se recubrieron de tierra fértil y a continuación, se plantaron árboles del tipo eucalipto y acacias. Estas barreras vegetales fueron erigidas para proteger el entorno inmediato contra el ruido, y para mejorar la calidad estética del paisaje.

- Cantera de Roashia-caliza para cemento (realización de terrazas e hidrosiembra en Italia), la restauración del lugar, realizada con la colaboración de las autoridades, arrojó resultados muy satisfactorios. El proyecto consistió, básicamente, en apilar materiales inertes en cada berma hasta alcanzar una altura entre 3 y 4m a lo largo de todo el frente de explotación, habilitando una zona plana en la parte superior del talud de manera que permitiera la circulación e impidiera la caída de piedras. La regulación de las aguas de escorrentía se logro utilizando canalones superficiales. Para favorecer la acumulación del agua necesaria para el crecimiento de la vegetación se instalaron pequeños canalones transversales a lo largo de los frentes.

### **III.2.2 Situación nacional de la restauración minera.**

En México se desconoce la cantidad de sitios de jales inactivos o pasivos mineros. Hasta la fecha los trabajos realizados para la recuperación y remediación de estos sitios, han sido sumamente escasos, razón por la cual es de gran importancia que instituciones de investigación evalúen y desarrollen alternativas tecnológicas, acordes a las condiciones específicas de cada sitio, que permitan su remediación a través de la remoción y/o estabilización de los contaminantes inorgánicos (Velasco et al., 2005).

Tomando al volumen de producción de los minerales no metálicos como indicador del área deteriorada por la minería superficial, el Estado de México (13%), Coahuila (11%), Jalisco (6%), Distrito Federal (5.7%), Hidalgo (5%) y Baja California Sur (5%) concentran el 46% del total de la extracción, lo que supone una superficie de deterioro mayor por la minería superficial que en el resto del país.

Actualmente, las normas que regulan concretamente aspectos ambientales de la minería son la NOM-120-SEMARNAT-1997 que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa; y la NOM-141-SEMARNAT-2003 que establece las especificaciones y criterios para caracterizar los jales y para las etapas de preparación, construcción, operación y post-operación de las presas de jales. Sin embargo, no existen las normas relativas a la modificación topográfica que resulta de la extracción, tampoco para las etapas de explotación, y post-operativa en las que cabría esperar la restauración de los sitios afectados.

El gobierno mexicano no cuenta con programas que aporten recursos económicos para restaurar los sitios contaminados, y es que el monto por éste concepto puede ser

elevado; por ejemplo, se calculó entre 50 y 60 mil millones de dólares el costo por restauración de las minas que representan un riesgo para los habitantes en Estados Unidos.

Los grupos mineros mejor consolidados en el México, han realizado trabajos de restauración tanto en minas subterráneas como superficiales en varios estados del país (*Tabla 1*), sin embargo, estos casos no corresponden con pasivos mineros.

| TIPO DE MINADO           | UBICACIÓN                 | EMPRESA               |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Tajos y open cast mining | Coahuila                  | MICARE                |
|                          | Coalcomán, Michoacán      | Grupo Peñoles         |
|                          | Talpa de Allende, Jalisco | Grupo Peñoles         |
|                          | Sultepec, Edo. México     | Grupo Peñoles         |
|                          | Colón de Querétaro        | LUISMIN               |
| Canteras                 | Ixtaczoquitlán, Veracruz  | Holcim-Apasco         |
| Subterráneo              | Querétaro                 | Grupo Peñoles         |
|                          | Coahuila                  | Grupo Peñoles         |
|                          | Guerrero                  | Grupo Peñoles         |
|                          | Zacatlán, Puebla          | Grupo Materias Primas |
|                          | Jaltipán, Veracruz        | Grupo Materias Primas |

*Tabla 1.- Estados donde se han realizado algunos trabajos de restauración de minas en México (Tomada de Jiménez et al., 2006).*

Algunos ejemplos sobre trabajos exitosos de restauración de minas cerradas en México (Huerta, 2005), se mencionan a continuación:

La mina Cuale: se encuentra ubicada en el municipio de Talpa de Allende, en el estado de Jalisco, 88 kilómetros al sureste de Puerto Vallarta. En esta mina, cuya precipitación pluvial es de 1,500 a 2,000 mm / año, temperaturas templadas entre 22-26°C, montañas con pendientes de hasta 40 %, en ella se produjo básicamente oro y plata.

Los trabajos de restauración han consistido principalmente en estabilización física y química (*Fotografía 4*), aseguramiento y manejo de residuos, confinamiento de desechos, arreglos visuales, mejoramiento del suelo, reforestación y ecotécnicas.

Se ha hecho énfasis en el desarrollo de líneas de humedad y forestación, desvío de escurrimientos y monitoreo de la calidad del agua. El tiempo invertido en la restauración de esta mina fue de ocho años, con una inversión total de 2 millones de dólares.

La Unidad Minera Sultepec: se encuentra ubicada en el municipio de Sultepec, en el Estado de México. Es una mina polimetálica de origen hidrotermal, preponderantemente de oro y plata, y sus operaciones datan de la época prehispánica. Después de cinco siglos de

operaciones, fue adquirida y operada por Peñoles en 1985 y cerrada en forma definitiva en 1991.

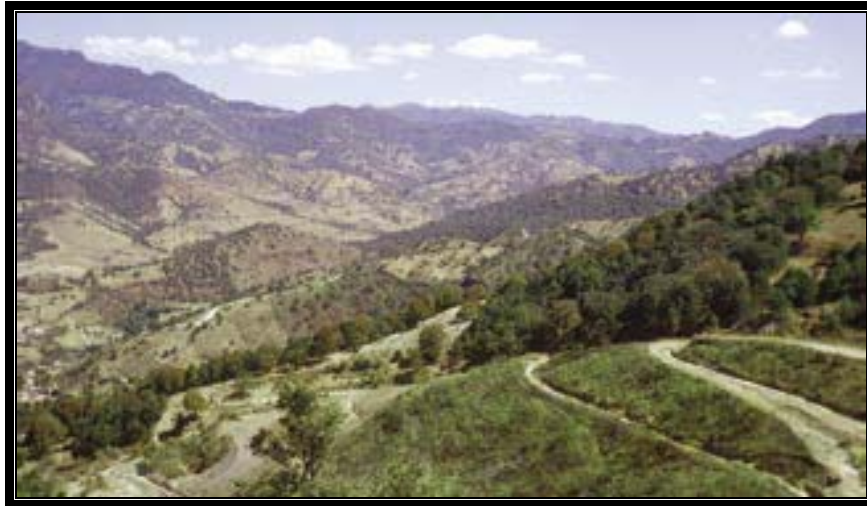


Fotografía 4.- Vista de los trabajos de restauración en la mina Cuale (Huerta, 2005).

Al igual que en la Unidad Cuale, se siguieron varias etapas de restauración (Fotografías 5), aunque se ha puesto más énfasis en vermas y canales para el desvío de agua de las zonas de mineralización, como son tepetateras y presas de jales, y en el desarrollo de sistemas de cubierta vegetal con plantas endémicas tales como la *Pluchea symphytifolia*, conocida localmente como nancial, que debido a su gran capacidad de adaptarse a suelos con alto contenido de plomo resulta muy útil para prevenir la erosión del suelo y facilitar el establecimiento de la cubierta vegetal.

El tiempo invertido en la restauración de esta mina fue de siete años, y una inversión de 1.3 millones de dólares.

Un caso distinto fue el de la unidad Proaño que se encontraba en Fresnillo, Peñoles invirtió 5.8 millones de dólares en la construcción de una planta para tratar jales antiguos, en el año de 1998. A partir de 2000 y hasta finales de 2002, la planta de jales ha recuperado los siguientes minerales: zinc, plomo, plata, cobre y hierro. Asimismo, la recuperación de concentrados de minerales económicos fue de 1.18% en peso y representó 28,124 toneladas de concentrado en este tiempo.



Fotografía 5.-Restauración de la Mina Sultepec, Sultepec, Edo. De México.

En México, el Gobierno Federal ha incluido a los jales de Nacozari de García como una de las prioridades en asuntos de remediación (Figura 4). Con el propósito de atender oportunamente el problema de contaminación por residuos peligrosos de éstos sitios considerados pasivos ambientales, entre el 2005 y 2006 continuaron las acciones legales para la remediación de seis sitios específicos: **Metales y Derivados** ubicado en Tijuana, Baja California; **Cytrar** en Hermosillo, Sonora; **La Pedrera** depósito localizado en Guadalcázar, San Luis Potosí; **Cromatos de México** ubicado en Tultitlán, Estado de México; **Mina Nuevo Mercurio** con sede en Mazapi, Zacatecas; **Jales de Nacozari**.

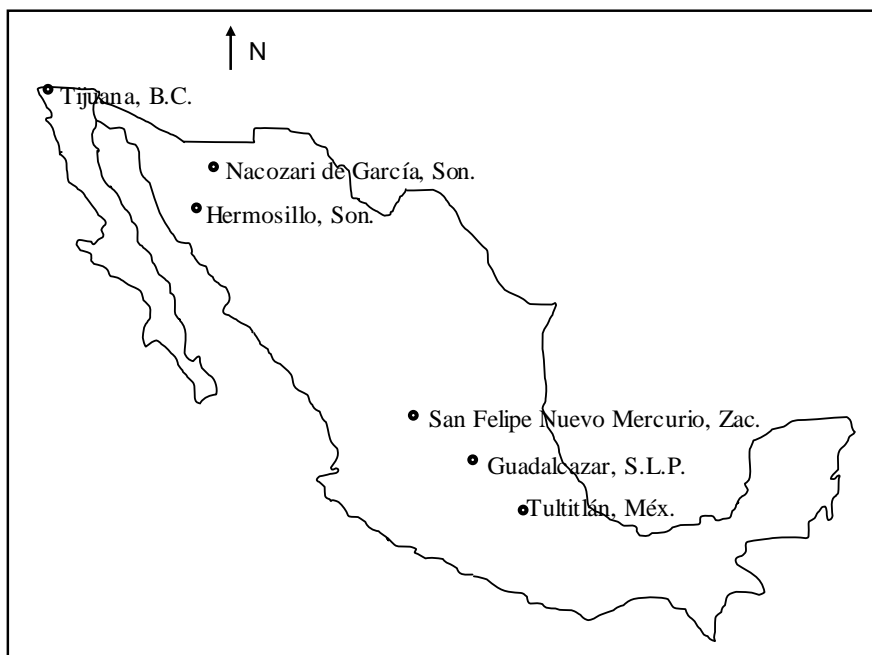


Figura 4.- Localización de los principales pasivos mineros existentes en México.

### III.3. Caracterización, diseño y uso de terrenos recuperados.

En principio, los usos posibles en la recuperación de terrenos son muy amplios, si bien en cada sitio, e incluso para zonas diferentes de una misma explotación, las características de alteraciones, los entornos social, ecológico, paisajístico y los condicionantes técnicos y económicos, son factores a tener en cuenta y que reducen el número de posibilidades de uso, hasta llegar a determinar la opción más adecuada.

Uso recreativo: En este tipo de restauración nos centraremos con más detalle, debido a que es el tipo de orientación que se pretende implementar en la restauración del área de los jales de Nacozari de García. La razón de una orientación de uso recreativo obedece a que para que se destinen recursos federales para remediación de pasivos mineros en México, el uso del terreno remediado debe ser comunitario (SEMARNAT, 2005).

Uno de los métodos más comunes utilizados por los planificadores para clasificar las áreas recreativas es aquel en el que se denominan los terrenos como:

- Recurso Orientado. La naturaleza del recurso físico puede tener un significado escénico, científico o histórico. La escasez del recurso y el grado de interés que despierta dicta si el área debe juzgarse o no como recreativa.
- Usuario orientado. Se refiere a áreas recreativas que están dirigidas principalmente a proporcionar una serie de actividades a un alto número de personas. Estas zonas se caracterizan, por disponer variados lugares de ocio, como por ejemplo los parques urbanos.
- Intermedio. Son generalmente zonas más pequeñas que las características de recursos orientados y mayores que las de usuarios orientados. En ellas se combinan las diferentes zonas con elementos naturales conservados o recuperados y medios de ocio a disposición de los visitantes.

Para determinar si un sitio minero ofrece potencial para uso recreativo, es preciso considerar primero los tipos de usos que tienen los terrenos adyacentes. Basándose en tal conocimiento es posible averiguar el tipo de actividad recreativa más adecuada dentro de la zona a recuperar.

Existen diversos factores que influyen en el potencial recreativo de un sitio minero. Los más importantes son:

- a) Aspectos Morfológicos, tales como superficie, topografía del terreno, profundidad del hueco, etc.

El tamaño del área afecta directamente al tipo de recreo que va a ser posible desarrollar (Tabla 2), ya que cada actividad requiere una cierta superficie mínima.

b) Aspectos Hidrogeológicos e Hidrológicos, tales como calidad de agua, volumen de recursos, variaciones estacionales de caudal, etc.

La utilización recreativa de una laguna residual depende fundamentalmente de su profundidad, longitud de costa, claridad y limpieza del agua o sustrato de la orilla.

c) Aspectos Geotécnicos, tales como estabilidad de los frentes y de las orillas, necesidades de saneamiento, etc.

La cantidad y calidad de la tierra vegetal disponible, de material de cobertera y de estéril reutilizable, pueden condicionar la selección de uso.

d) Aspectos Climáticos y Ecológicos. El baño y algunas actividades de recreo pasivo requieren temperaturas suaves y un nivel de insolación suficiente. Los terrenos dedicados a ellas deberán estar protegidos de los vientos.

e) Aspectos Diversos, que incluyen desde características de la zona que puedan disminuir la seguridad del área, tales como líneas de alta tensión o la existencia de depósitos de combustible cercanos, hasta otros que prestan valor al área, como la existencia de recursos culturales o naturales de especial interés dentro del perímetro del sitio minero o en su entorno mas inmediato.

Una vez tomada la decisión de que la alternativa más adecuada de recuperación de los terrenos de un sitio minero es darle uso recreativo, se debe proceder al diseño final de la zona de forma coordinada con el propio proyecto de explotación cumpliendo las etapas de programación, planificación, diseño conceptual y diseño detallado.

Durante la etapa de programación hay que tener en cuenta la demanda local y regional de actividades de ocio, y las ofertas actuales que existen.

En la planificación es necesario determinar las zonas específicas y localización de medios necesarios para cada uso recreativo previsto. Lógicamente habrá que relacionar cada uno de esos usos con los demás, en términos de espacio, localización, temporada de uso y tipo de actividades.

| Tipo              | Tamaño   |
|-------------------|--|
| Juegos infantiles | 230-900m <sup>2</sup> .                        |
| Jardín infantil   | 0.5ha/800 personas:<br>superficie mínima 1-2ha |

*Continuación.*

|  |  |
|--|--|
| Campos de juego                                  | 0.5ha/800 personas<br>4 a 8 ha para poblaciones de 15,000 a 25,000 habitantes                                |
| Grandes áreas recreativas urbanas                | Superficie mínima 40ha<br>6 ha/1,000 personas  |
| Parques municipales                              | 0.5ha/250 personas u 8ha para poblaciones de 5,000 habitantes  |
| Áreas recreativas locales y regionales           | 8 ha/1,000 personas<br>Superficie mínima 20ha/5,000 habitantes   |
| Camping  | Superficie mínima 3-5 ha<br>25-45m <sup>2</sup> /campista  |
| Picnic. Recreo informal                          | Superficie mínima 2ha<br>200-500 usuarios/ha<br>15-40 unidades de picnic/ha                                  |
| Contemplación de la naturaleza (zonas naturales) | 4 personas/ha<br>10 personas/km de sendero   |
| Pesca  | 1 punto de pesca/10ml (zonas intensivas)<br>1km/pescador (zonas naturales)                                   |
| Baño   | Superficie mínima por usuario 15-25m <sup>2</sup><br>2-4m <sup>2</sup> agua/usuario<br>800-1,500 usuarios/ha |

*Tabla 2.- Capacidad de acogida de diferentes actividades (Tomada del Instituto Geológico y Minero de España, 2000).*

El diseño conceptual es similar al plan director, pero proporciona más detalles sobre los tipos de medios previstos para cada uso recreativo; además ilustra los diferentes tipos de usos, y refleja las dimensiones generales y las relaciones existentes entre los medios e infraestructura a construir.

El diseño detallado consiste en la preparación de todos los planos constructivos y especificaciones que se requieren para contratar los trabajos o ejecutar la obra. En los documentos elaborados se reflejarán todos los aspectos cualitativos y cuantitativos del proyecto.

Para acondicionar los terrenos para un uso final recreativo, es necesario proceder a la nivelación y compactación de la superficie de ser necesaria, seguido por la colocación de obras adecuadas de drenaje si se quiere conservar un área seca.

En zonas donde se vayan a realizar actividades como son juegos infantiles o lugares para almorzar o merendar se elegirán especies herbáceas resistentes al pisoteo. En áreas orientadas hacia un uso recreativo pasivo se podrán implantar, además, árboles o arbustos, aunque las especies utilizadas deben ser adecuadas al entorno paisajístico del sitio minero y a las condiciones ambientales de la zona. Pueden utilizarse con fines de aumentar el



atractivo visual del área, para separar zonas con distinto uso o en alineación bordeando caminos para dirigir a los visitantes hacia puntos determinados.

Dependiendo del tipo de actividades recreativas que se hayan elegido, y del número y clase de usuarios, se necesitarán diferentes instalaciones y medios básicos, como son: baños, vestuarios, agua potable, estacionamientos, refugios, etc.

Para el apantallamiento visual son muy efectivas las barreras de árboles y arbustos. Al seleccionar las especies para su creación, deberá tenerse en cuenta que es necesario incluir especies de hoja caduca para que durante el invierno sigan siendo efectivas.

## **IV. DESCRIPCION DEL AREA**

### **IV.1 Área de estudio.**

El poblado de Nacozari de García se encuentra ubicado en el municipio del mismo nombre en el noroeste del Estado de Sonora, México, contando con 11,961 habitantes (INEGI, 2006), de los cuales 2,700 viven en los alrededores de los jales. Este municipio colinda con los de Agua Prieta al norte, al este con Bavispe, al sureste con Bacerac, al sur con Villa Hidalgo y Cumpas, al oeste con Arizpe y al noroeste con Bacoachi y Fronteras, siendo la cabecera del municipio el poblado Nacozari de García, se localiza en el paralelo 30°22' de latitud norte y a los 109°41' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, a una altura de 1,100 metros de altura (*Figura 5*).

El acceso a Nacozari de García, es siguiendo la ruta del río Sonora a 99 km de Hermosillo hasta llegar al poblado de Mazocahui, continuando por la ruta de la sierra rumbo a Agua Prieta aproximadamente 60 km después de Moctezuma.

El depósito de jales de este estudio (depósito de jales I) se ubica en la parte Sur dentro del poblado Nacozari de García; que a su vez está localizado en el noreste del estado de Sonora (*Figura 6*), la altura varía entre 1,090 a 1,152 metros de altura y abarca una extensión aproximada de 18.7 has.

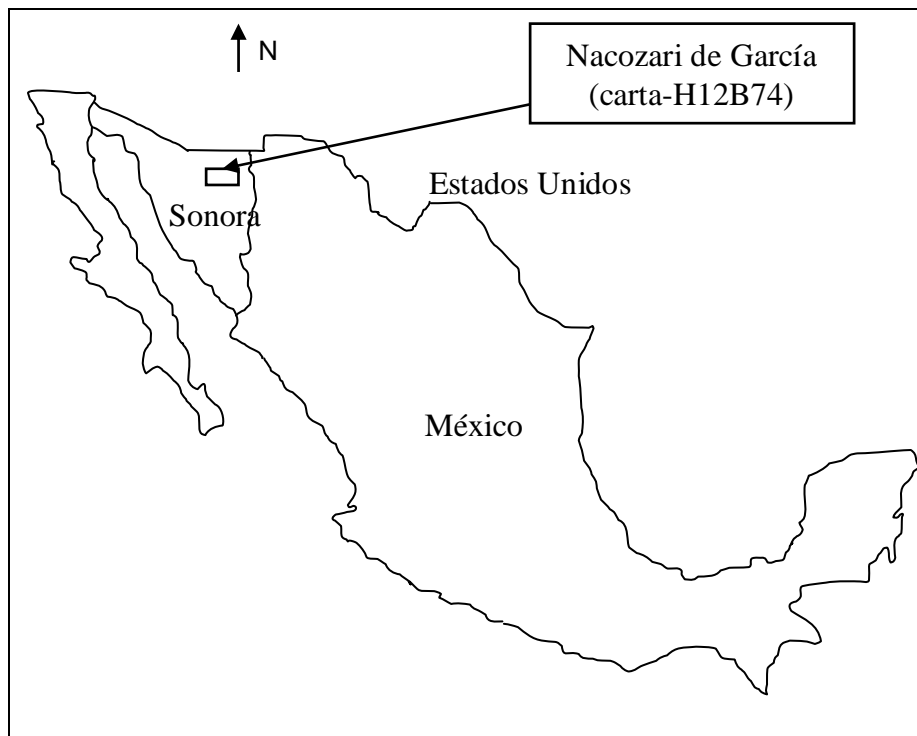


Figura 5.- Ubicación de Nacoziari de García en la República Mexicana.

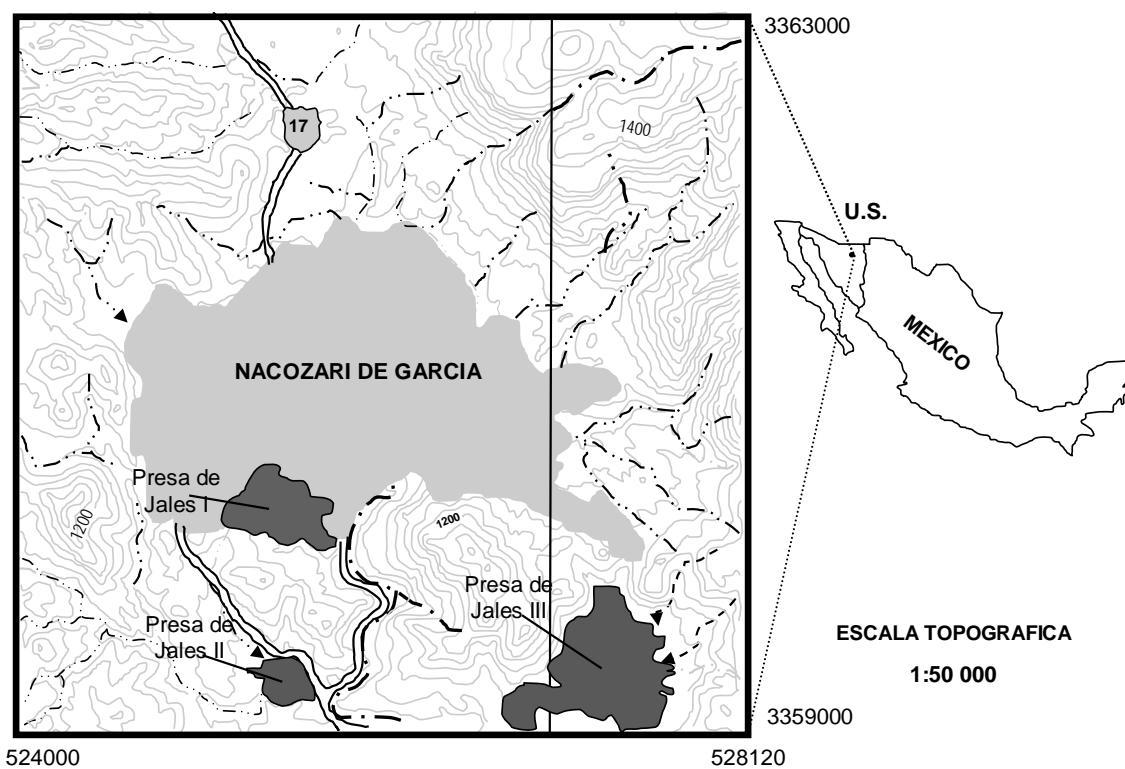


Figura 6.- Localización de las tres presas de jales existentes en Nacoziari de García (INEGI, 2000).

## IV.2 Clima.

El tipo de clima que corresponde al poblado de Nacozari de García es semi-árido semi-cálido (*Figura 7*), con una temperatura media mensual de 27°C, en verano, en los meses de julio y agosto, y una temperatura media mínima mensual de 10.8°C (INEGI 2000); el régimen de lluvias se presenta en los meses de agosto a septiembre, con una precipitación media anual de 490 milímetros. Dentro de los criterios para la clasificación de los climas áridos y semi-áridos, el más importante es el de la precipitación, el cual corresponde a un intervalo de 100-300mm y 300-700mm respectivamente a diferencia de los climas templados cuyo intervalo esta en el orden de entre los 1000-2000mm anualmente (Méndez y Maier, 2008).

Según lo que podemos observar en el mapa de climas de INEGI (2006) del estado de Sonora, a Nacozari de García le corresponde un clima semi-seco semi-cálido, correspondiendo con la clasificación antes mencionada.



Figura 7.- Climas predominantes en el Estado de Sonora (INEGI, 2006).

La temperatura promedio mensual en Nacozari de García, varía desde los 11°C en el mes de enero, hasta los 27°C en el mes de julio, siendo el período de junio a septiembre los meses con más altos promedios en la temperatura, superando el orden de los 25°C. La Figura 8 muestra los promedios para temperaturas registradas en la estación Nacozari de García con clave de identificación 26059 perteneciente a CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), obtenidos el 2007 y comprende el periodo de 1943-2006.

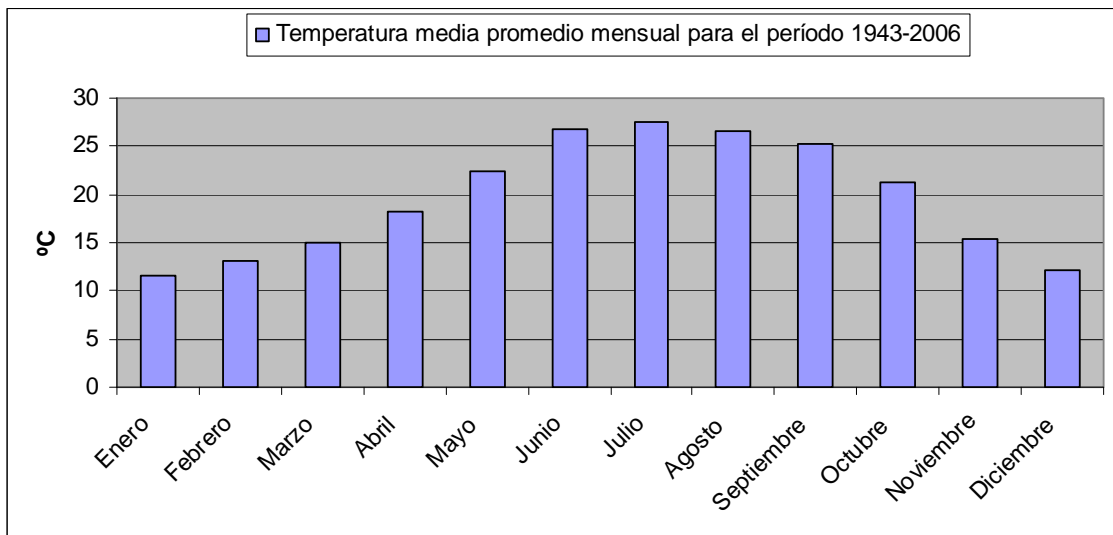


Figura 8.- Temperatura media promedio mensual para el período comprendido de 1943-2006, datos obtenidos la estación Nacozari de García por medio de CONAGUA.

La precipitación acumulada mensual promedio más alta, ocurre en los meses de julio y agosto concentrando más del 50% de la precipitación total anual; caso contrario ocurre con los meses de abril y mayo cuyos valores en la precipitación, no llegan a alcanzar los 10mm en promedio (Figura 9).

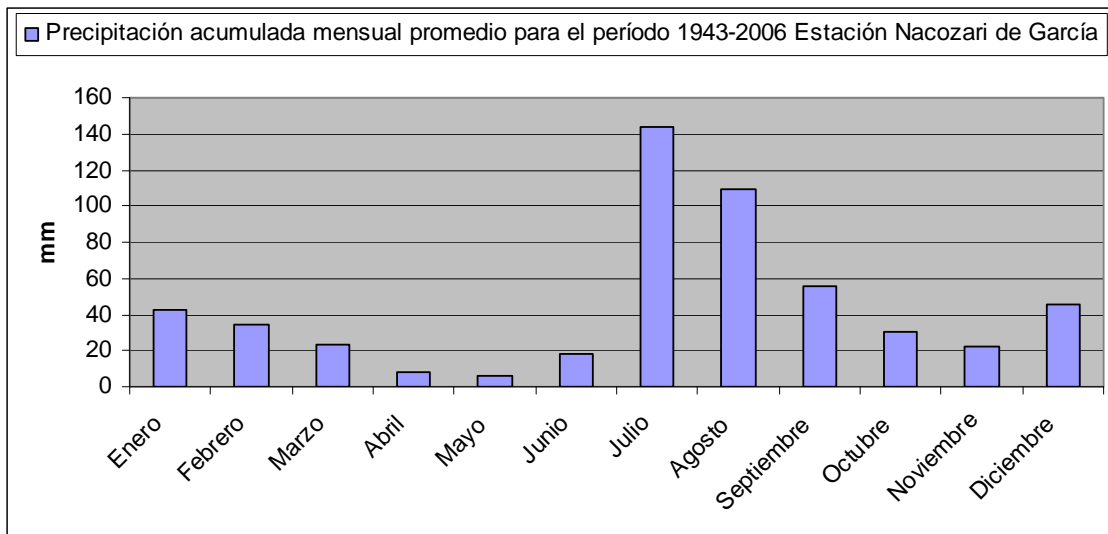


Figura 9.- Precipitación acumulada promedio mensual para el período comprendido de 1943-2006, datos obtenidos de la estación Nacozari de García por medio de CONAGUA.

Consecuentemente, ligado a las máximas temperaturas mensuales promedios registradas en el año, en conjunto con las precipitaciones promedios mensuales son base para el cálculo de la evapotranspiración teórica cuyos resultados tienen una relación directa en el comportamiento de las barras de los gráficos. La evapotranspiración teórica calculada sobrepasa aproximadamente en un 5% a las precipitaciones (Figura 10).

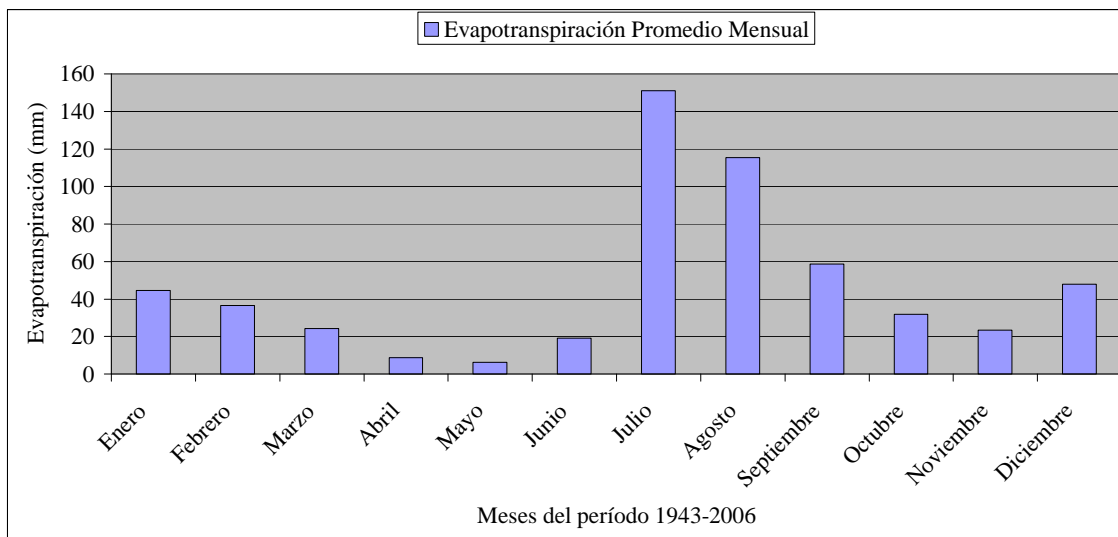


Figura 10.- Evapotranspiración promedio mensual calculada a partir de los datos históricos de temperatura y evaporación de la zona proporcionados por CONAGUA.

### IV.3. Hidrografía

Fisiográficamente, la región donde se encuentra el sitio de estudio pertenece a la provincia Sierra Madre Occidental y a la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos, lo que

explica el relieve montañoso y muy accidentado que es característico de la región (INEGI, 2006). En particular este sitio se ubica en una especie de valle que está rodeado por sierras de 1300 – 1500 de altura en la parte este y oeste (Gutiérrez, 2005). En algunas de las quebradas que se desarrollan entre las sierras que están al oriente y al poniente del poblado Nacozari de García, fueron depositados los jales de las actualmente presas inactivas entre las cuales se encuentra el depósito que es objeto de este estudio.

La región está asociada a la Región Hidrológica RH-9 (Figura 11), denominada Sonora Sur que comprende las cuencas de los ríos Mayo, Yaqui, Matape, Sonora y Bacoachi. Regionalmente destacan los ríos Bavispe que fluye de norte a sur por la parte oriental del municipio de Nacozari de García y el río Moctezuma que corre de norte a sur en la parte occidental del mismo municipio (Gutiérrez, 2005). El arroyo Nacozari en la parte sur se une al río Moctezuma que finalmente descarga sus aguas en el río Yaqui, formando parte de unas de las fuentes de abastecimiento de éste último, cuya desembocadura se encuentra en el Golfo de California.

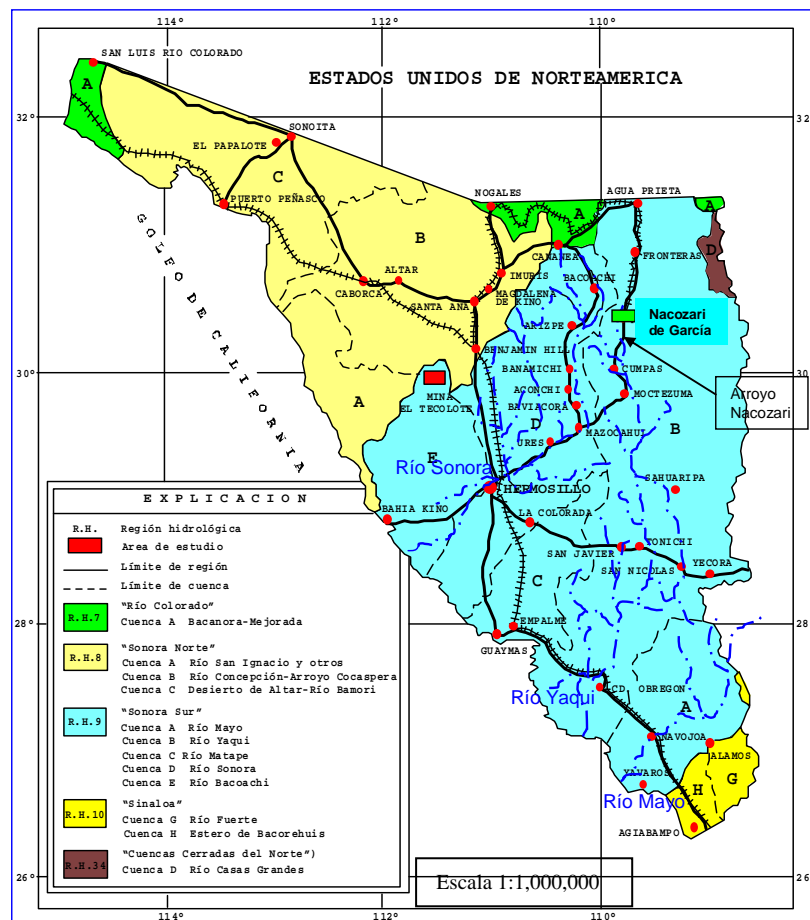


Figura 11.- Regiones hidrológicas y cuencas del Estado de Sonora ( INEGI, 2006).

Localmente, por el sitio de estudio fluye el denominado arroyo Nacozari (*Figura 12*), cuya corriente es intermitente, y al cual confluyen otras corrientes, que bajan de las sierras que están al oriente y poniente del poblado de Nacozari; por lo que se puede inferir que los principales patrones de drenaje de la zona son los que bajan del este y oeste hasta unirse al drenaje mayor que es el arroyo Nacozari con sentido de norte a sur.

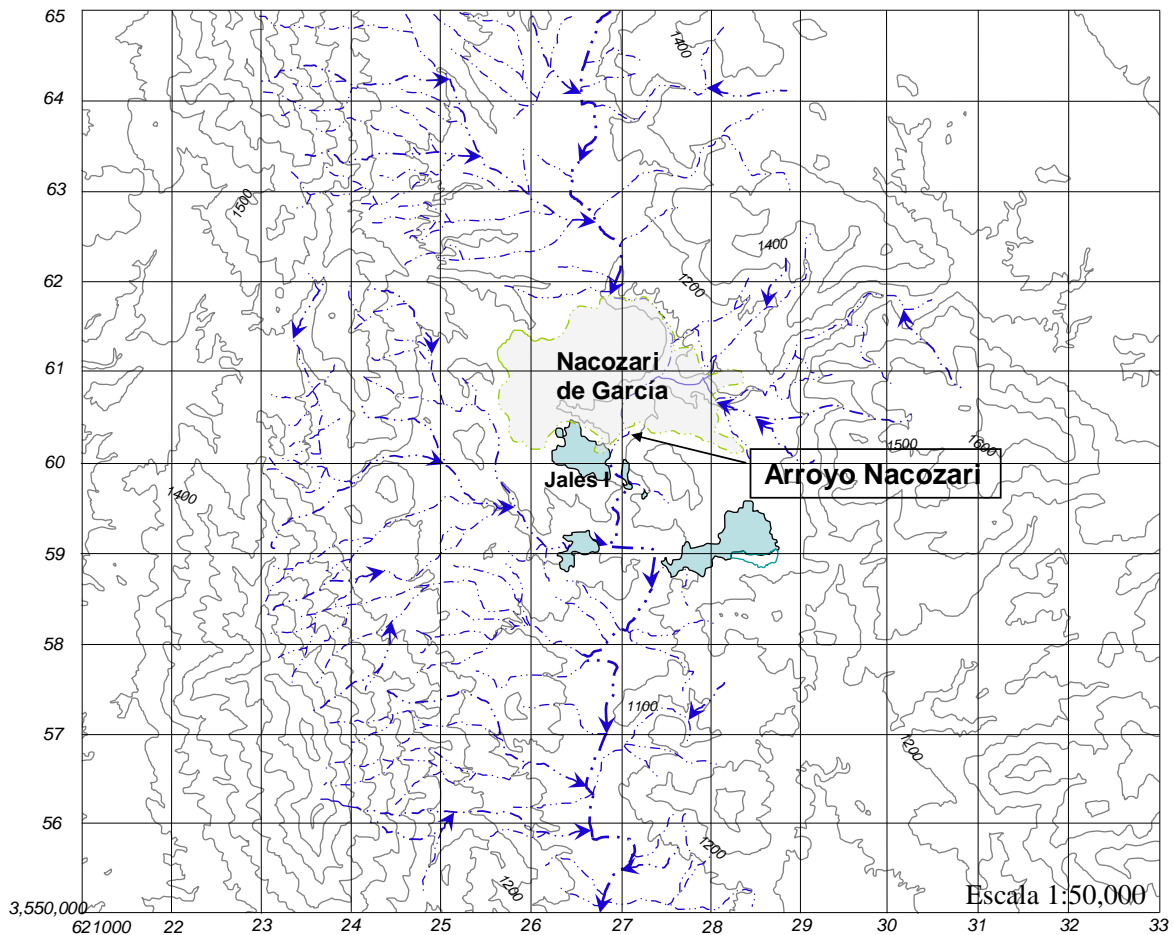


Figura 12.- Mapa topográfico incluyendo la Hidrología de la zona (Modificada de carta de INEGI, 2000).

## V. METODOLOGIA.

A continuación se muestra el procedimiento metodológico empleado en este trabajo, para llegar a generar los resultados finales que incluyen el diseño conceptual de la preparación del sitio (*Figura 13*).

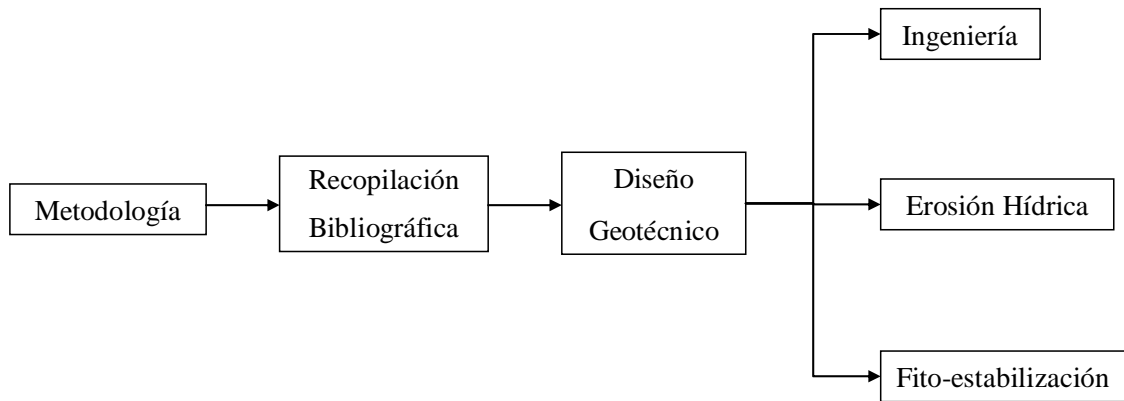


Figura 13.- Metodología general desarrollada en este trabajo para un diseño estable.

Diagrama de flujo indicando la información a generar en este trabajo y la cual contribuye a la propuesta del diseño conceptual para la remediación de un pasivo minero.

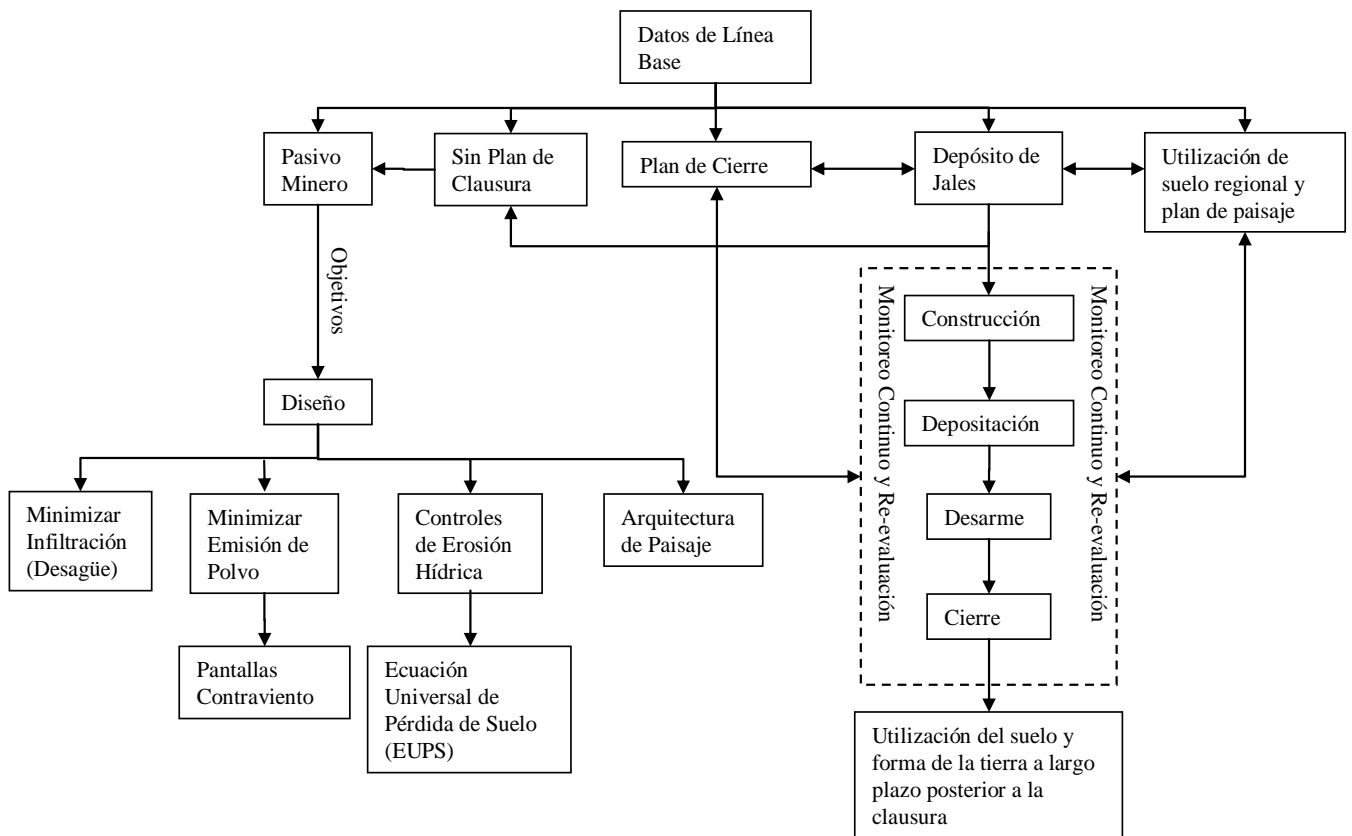


Figura 14.- Diagrama de flujo indicando la información a generar en este trabajo y la cual contribuye a la propuesta del diseño conceptual para la remediación de un pasivo minero (Modificado de Rademeyer, 2008).

## V.1 Caracterización física del sitio.

1.- Se realizó un levantamiento topográfico para representar la topografía de los jales en forma digital (Figura 15), partiendo de las cotas reales y de una referencia para la



comparación de la topografía actual con la topografía deseada en el diseño, esta labor se llevo a cabo con la ayuda de una estación total de marca Trimble, 5700 proporcionado por el Departamento de Ingeniería Civil y Minas de la Universidad de Sonora, para disminuir al máximo posible el margen de error, que en éste equipo es de  $\pm 15\text{mm}$ . Los componentes del equipo son:

- 1.- Controladora TSCe.
- 2.- Antenas ZEPHYR (fija y móvil).
- 3.- Adaptadores, tripiés, soportes (SECO).
- 4.- Radio modem Trimmark 3.
- 5.- Estación (base) Trimble 5700.

El equipo tiene instalado el software Trimble Survey Controller mismo en el que se hizo la configuración para que se registraran puntos a distancia fija (cada 5 metros) durante todo el recorrido de la zona.

2.- Se trabajó con los resultados arrojados por el levantamiento topográfico de la manera que lo muestra el diagrama de flujo de la Figura 15. Con el accesorio CivilCAD del software AutoCAD 2004, en la cual se emplea el algoritmo de triangulación de Delauney con los puntos obtenidos en el levantamiento topográfico con el fin de recrear una superficie a la que se le añaden curvas de nivel que fueron a cada dos metros (suficiente para detallar la superficie generada) de diferencia en la elevación.

3.- Una vez obtenida la altimetría, con la topografía obtenida de los jales, se determinan las líneas de flujos de escorrentía, para la estimación de la redirección del agua captada por el área de la cuenca de los jales.

4.- Al no contar con la topografía del terreno antes de la depositación de los jales, se construye una plataforma considerando algunos puntos del contacto entre el jal y el suelo, con esto el programa recrea una plataforma uniendo dichos puntos en un plano, considerando sus diferencias de elevación; así con la función volumen por seccionamiento el software cuantifica en unidades de metros cúbicos todo lo que esté por encima de la plataforma.

5.- Como trabajo previo al cálculo de la erosión hídrica del área de Nacozari de García, se hizo un análisis de datos del historial de clima, retomando los registros históricos de la temperatura mensual promedio, evaporación mensual promedio y la precipitación mensual promedio del período comprendido de 1943-2006, proporcionados por la estación Nacozari de García con número de identificación 26059, perteneciente a la CONAGUA. Con estos

datos y el cálculo del área de la cuenca a la cual pertenecen los jales, se estimó la cantidad de agua captada en la cuenca de los jales (Presa I).

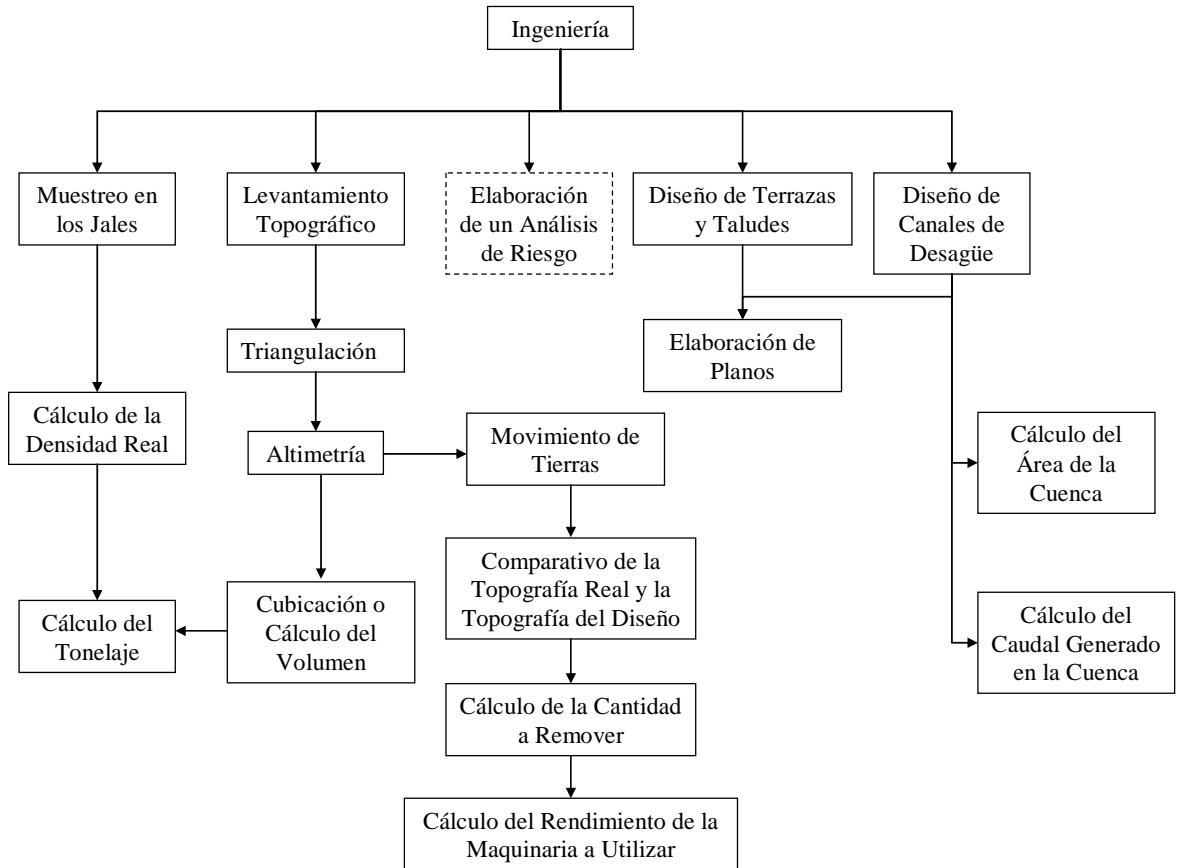


Figura 15.- Metodología desarrollada en el área de ingeniería.

6.- Se realizó un muestreo en 5 laderas de los jales destinadas a pruebas físicas y geoquímicas. Estos puntos fueron elegidos a una distancia equitativa a partir del primer punto de muestreo considerando el perímetro total de los jales. El muestreo consistió en tomar 4 muestras en puntos equidistantes a lo largo del talud de cada una de las 5 laderas, la secuencia de toma de muestra fue siempre de la base a la cima. Las muestras se secaron, separaron y finalmente se colocaron por 5 minutos en el tamizador, usando las mallas de 10, 18, 35, 60, 120, 230. Los porcentajes en peso de las muestras ya clasificadas sirvieron para obtener la granulometría y se tomaron las muestras de las laderas 2 y 4 para el cálculo de la densidad promedio de los jales, con un densímetro electrónico Alfa Mirage, modelo EW-300SG, con error de  $\pm 0.01$  gramos.

El promedio de las densidades de cada muestra, se determina con la siguiente fórmula:

$$Densidad = \frac{\sum(P \times \delta)}{\sum(P)}$$

Donde:

P = Peso de la muestra en gramos.

$\delta$  = Densidad de la muestra en gr/cm<sup>3</sup>.

Inicialmente se calcula la densidad promedio para cada muestra utilizando los pesos y densidades correspondientes a los diferentes tamices, posteriormente se calcula la densidad promedio general, usando los resultados obtenidos de las muestras, aplicando la misma fórmula.

7.- Con los resultados obtenidos en cada uno de los pasos anteriores, se creó un diseño digitalizado en el software AutoCAD 2004 buscando satisfacer los parámetros antes mencionados.

8.- Se estimó la maquinaria necesaria (tractor, motoconformadora, retroexcavadora y camión de volteo) para desarrollar el trabajo de remoción de tierras, excavación de los canales y acarreo, así como las horas efectivas de trabajo de cada equipo a invertir para la preparación del sitio. En los anexos de cálculos aparecen las especificaciones y criterios de selección de la maquinaria.

## **V.2 Análisis de riesgo.**

Analizando aspectos geotécnicos del área, el índice de frecuencia de los eventos que pueden llegar a ocasionar consecuencias graves, su peligrosidad y las condiciones físicas del sitio, se aplicó el método Preliminary Hazard Analisis (PHA), para obtener una clasificación de riesgo, así como el comportamiento o velocidad ante la respuesta, según la importancia del suceso en la zona de los jales de Nacozari de García. Se denomina así porque puede ser la primera tarea necesaria para aplicar otros procedimientos, o bien, es un sistema que busca priorizar los riesgos de ocurrencia de resultados no deseados.

Se eligió éste método sobre los demás, porque su principal ventaja es que suministra un inventario completo para todo sistema peligro/riesgo, además identifica de modo general las componentes o eventos de riesgo con prioridad, a menudo para determinar la necesidad

de otro estudio mas detallado. Aunque no es cuantitativo debido a que no suma los riesgos e ignora los efectos combinados de los peligros.

El método Preliminary Hazard Analisis (PHA) es inductivo, es decir, consiste en obtener conclusiones generales a partir de premisas que contienen datos particulares. Establece una conclusión para todos los eventos de la misma naturaleza, no es deductivo.

Un sistema PHA identifica los peligros y sus consecuencias potenciales y valora el riesgo como una pérdida esperada:

$R = P \times S$ , donde,

R = Riesgo (pérdida/unidad de tiempo de la actividad)

P = Probabilidad (suceso de pérdida/unidad de tiempo)

S = Severidad (dinero perdido/suceso de pérdida).

El primer paso es identificar todos los resultados indeseados importantes que vayan unidos a las operaciones analizadas.

La siguiente fase consiste en asignar un orden de magnitud a cada uno de los efectos no deseados que fueron identificados con anterioridad. En realidad, es una línea de inventario de todos los peligros y sus riesgos.

Se podría calificar el sistema en base a las preguntas siguientes:

Qué: listado de todos los sistemas de peligros con una valoración subjetiva de severidad/probabilidad/riesgo para cada uno.

Cómo: juicio ingenieril/habilidades, intuición.

En general, un listado como el que sigue puede ayudar en esta necesidad, hablando de un pasivo minero:

- El sentido intuitivo de la ingeniería.
- El examinar sistemas similares.
- Revisión de códigos, especificaciones y estándares.
- Revisar sistemas de seguridad y estudios de sistemas similares.
- Revisar documentación, histórica: OSHA Injury Data, National Safety Council Data, Manufacturers' Reliability Analysis, etc.
- Considerar influencias externas tales como climatología local, el medio ambiente y las tendencias personales.
- Considerar causas comunes.

- Considerar toda clase de energía: ¿Qué es necesario mantener bajo control?, ¿Qué ocurriría si el control se pierde?

### V.3 Cálculo de la erosión hídrica.

1.- Se realizó el cálculo de erosión hídrica para cada tipo de suelo existente en el área según la carta edafológica de INEGI (2000), correspondiente a este sitio (*Figura 16*). Este cálculo se llevo a cabo a partir de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo evaluada a partir de la formula de Morgan (1979) y Kirkby & Morgan (1980):

$$A = 0.224RKLSCP$$

Donde,

A = Pérdida de suelo en toneladas/hectárea al año.

R = Factor de erosión por precipitación.

K = Factor de erodabilidad del suelo.

L = Factor de longitud de pendiente.

S = Factor de gradiente de pendiente.

C = Factor de vegetación.

P = Factor de tipo de cultivo.

Donde R es el factor de erosividad por precipitación pluvial, K es el factor de erodabilidad del suelo, LS Factor de longitud y gradiente de pendiente, C es el factor de cobertura de suelo y P factor del método de control de erosión.

**Valor de R:** este valor se calculó para cada uno de los meses a partir de un promedio anual de los últimos diez años, donde el valor de R se determino a partir de la formula de Lombardi Neto y Moldenhauer (1980).

**Valor de K:** se consideraron los valores de variables proporcionados por la carta Edafológica de INEGI (2000) escala 1:50,000, para determinar la variables texturales, contenido de materia orgánica, estructura y drenaje interno. Esto con la finalidad de determinar el factor K a partir del nomograma de Wischmeier et al., (1971).

**Valor de LS:** para realizar el cálculo del factor L.S. utilizado en suelos, primero se eligieron dos distancias en las que ocurre una posible depositación de sedimentos en la carta topográfica del sitio.

En el caso particular de los jales, se realizó un promedio de perfiles a lo largo de una sección, en cada uno de los tipos de jales según su tamaño de partículas, aplicándose la fórmula siguiente:

$$P = \left| \frac{\sum_{k=1}^n (d_k \times p_k)}{\sum_{k=1}^n d_k} \right|$$

Donde,

P = Pendiente promedio.

p = Pendiente por tramo en %.

d = Longitud en metros correspondiente a cada tramo.

Por motivo de que algunas pendientes son negativas, el resultado en la fórmula, se expresa en valor absoluto.

**Factor de vegetación:** el cálculo consistió en la contabilidad de matorrales y arbustos en un metro cuadrado de suelo, esto se llevo a cabo tres veces y se obtuvo un promedio que se utilizará en los cálculos de erosión hídrica para suelos.

Así se encontraron los valores de A para suelos.

El mismo procedimiento se aplicó para el cálculo de la erosión hídrica en los jales gruesos y finos, definiendo cada variable con información producto del trabajo en la granulometría y cálculo del promedio de pendientes de los jales.

2.- Para poder determinar que zonas dentro del área de los jales de Nacozari sufren mayor erosión hídrica, se efectuó un estudio de densidad de cárcavas, el cual consistió en observar y medir dichas cárcavas en imágenes satelitales a escala 1:146m, delimitando cada una de las zonas que visualmente presentan mayor densidad de cárcavas, posteriormente se sustituyeron cada una de las variables en la siguiente fórmula.

$$\text{Densidad de cárcavas} = \frac{\text{Longitud real total de cárcavas de una zona determinada}}{\text{Área real total de la zona}}$$

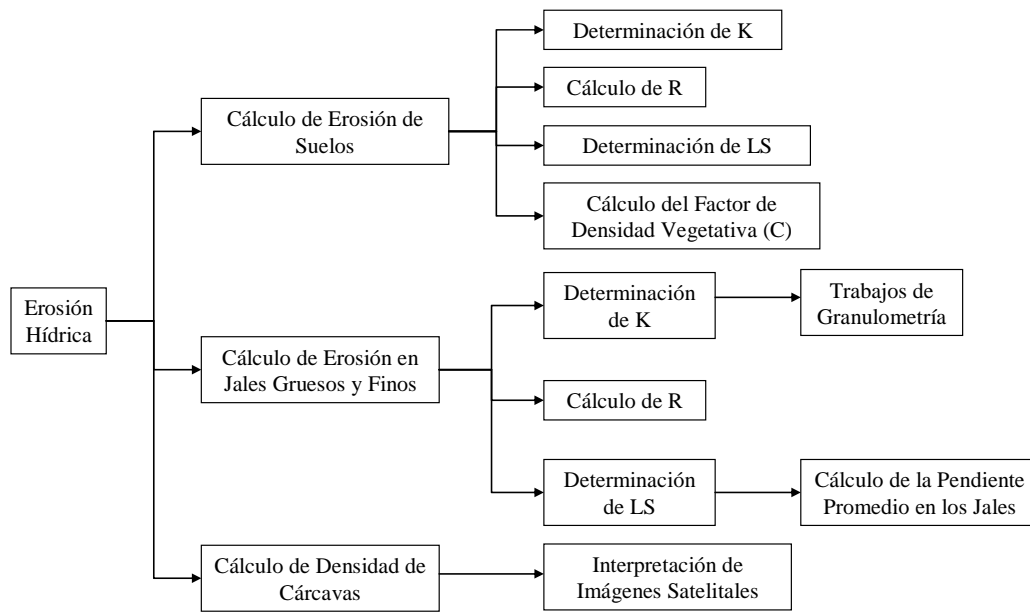


Figura 16.- Metodología desarrollada para la obtención de la erosión hídrica.

#### V.4 Muestreo y análisis geoquímico.

Utilizando un analizador portátil de fluorescencia Innov-X XT400 Series, se obtuvieron resultados de concentraciones en muestras *in situ* de los jales así como en muestras del posible suelo de préstamo destinado como cubierta para el jal, en el cual se llevará a cabo la revegetación. Esto con el fin de conocer si el suelo es apto para dicha función.

El análisis fue realizado usando un equipo de fluorescencia de rayos X (XRF) portátil Innov-XT400, cuya fuente de excitación consiste en un tubo de rayos x, además utiliza un Hewlett-Packard (HP) iPAQ ayudante personal para el almacenaje de datos. El XT400 tiene capacidad para analizar elementos desde el potasio hasta el uranio, cerca de 25 elementos simultáneamente. El estándar certificado NIST SRM-2702 (Inorgánicos en sedimentos marinos) fue analizado por el XRF XT400, así como el 10% de las muestras y los blancos de laboratorio, usando digestión con ácido se analizaron por espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), de acuerdo al método 3050B/6010B de la EPA. Los análisis en el ICP-AES se obtuvieron usando simultáneamente un equipo Perkin-Elmer 4200 DV, acoplado con un nebulizador ultrasónico.

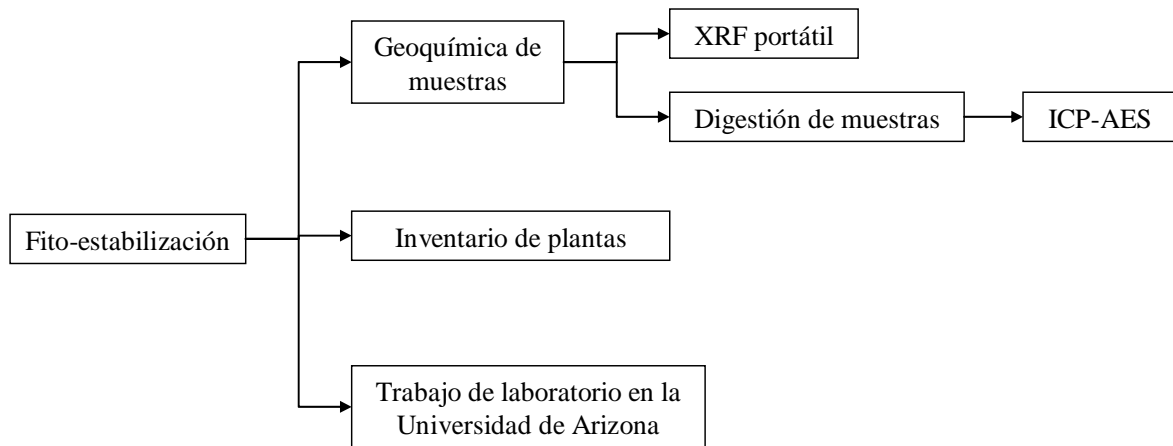
Las 73 muestras sólidas de jales se obtuvieron a una profundidad aproximada de 0.3 metros, las cuales fueron analizadas en campo (*in situ*) usando el XRF portátil después de tamizarlas usando malla 10, al igual que se analizaron 4 muestras de sales eflorescentes y 2

de suelos; el muestro fue llevado a cabo de acuerdo a los métodos estandarizados por sólidos contaminados (EPA, 1991).

Los análisis químicos (vía húmeda) fueron realizados en 10 submuestras (mayor del 10% del total de muestras analizadas con el XRF portátil) usando un ICP-AES. La variación de resultados entre el ICP-AES y el XRF XT400 estuvo dentro del 10%.

## V.5 Fitoestabilización.

1.- Para obtener información acerca de trabajos previos de fitoestabilización fue necesario llevar a cabo una recopilación bibliográfica que englobara temas de todas las soluciones posibles y aspectos necesarios para llevar a cabo una fitoestabilización en zonas semi-áridas y áridas (*Figura 21*).



21.- Metodología desarrollada en los trabajos para la propuesta de fito-estabilización.

2.- Para mantener opciones en cuanto al posible tipo de planta que se empleará, se organizó un inventario de plantas nativas del sitio y sus alrededores que puedan crecer y ajustarse al conjunto de condiciones muy características de los jales de Nacozari de García (pH, contenido de materia orgánica, grado de salinidad, etc.), con el propósito de evitar introducir plantas invasoras y competidoras (plagas) que pueden alterar y modificar el ecosistema del área, así como un comparativo con trabajos similares en zonas semi-áridas en México. Y en base a esto proponer familias de plantas potenciales para llevar a cabo una fitorremediación de los jales de Nacozari.



## **VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **VI.1 Caracterización de los jales.**

Los jales de Nacozari son un pasivo minero. Se desconocen registros de los detalles de los métodos de beneficio y las características topográficas previas al depósito de los jales. Por estas razones y para desarrollar un diseño para remediación del sitio es necesario realizar una caracterización de los jales considerando los siguientes estudios: 1) La distribución granulométrica de los jales proporciona información tanto de los tipos de depósito (mecánico o hídrico) así como datos útiles para estimar la erosión de los mismos. 2) La estimación de la erosión hídrica de suelos y jales permite: i) comparar los niveles de erosión en función de una cubierta vegetal (suelos) y la ausencia de esta (jales). 3) Los estudios de altimetría y densidad de jales ayudan a: i) definir la topografía de los jales, ii) estimar escorrentía, iii) calcular tanto el volumen como el tonelaje. 4) Los estudios geoquímicos proporcionan información de los siguientes aspectos: i) niveles de metales en los jales, ii) distribución de metales en las superficies de los jales, iii) características de los posibles suelos de préstamo para la remediación.

#### **VI.1.1 Altimetría y características hidrológicas.**

El volumen de agua captado en la zona de los jales no solo esta en función del área de los mismos jales sino que también influenciada por una pequeña cuenca o área de captación en la que el agua colectada producto de las precipitaciones fluye hasta la zona de interés.

Además la Figura 18 nos muestra las direcciones naturales en función de la topografía de los jales, sobre las cuales fluye la mayor cantidad de agua de escorrentía.

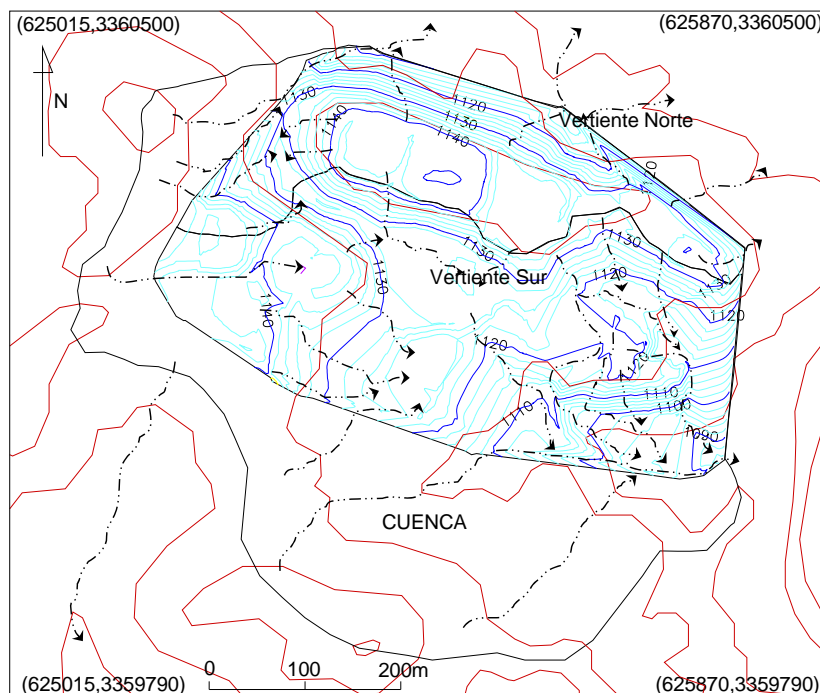


Figura 18.- El área delimitada de color negro en la figura nos muestra el área de la cuenca que influye directamente sobre los jales, y las líneas punteadas el flujo de escorrentía.

#### VI.1.1.1 Levantamiento topográfico de los jales de Nacozari de García.

Para representar la altimetría de los jales depositados en el sitio de Nacozari de García en forma digital, y partir de las cotas reales, de una referencia para la comparación de la topografía actual y la topografía a la que se desea llegar para el diseño es necesario realizar un levantamiento topográfico con una estación total (Fotografía 6); esto para reducir el margen de error al máximo posible.



Fotografía 6.- Componentes de la estación total de GPS, usada en el levantamiento topográfico de los jales de Nacozari de García (Controladora, antenas, radio MODEM y estación base).

El equipo tiene instalado el software Trimble Survey Controller mismo en el que se realizó la configuración para registrar puntos a distancia fija (cada 5 metros) durante el recorrido completo de la zona. La Figura 19 muestra los puntos registrados durante el recorrido sobre los jales del poblado Nacozari de García.

Los puntos obtenidos producto del levantamiento topográfico antes mencionado, se descargan en formato dxf para continuar trabajando en la cubicación en el software AutoCAD, ya que este software facilita y agiliza el trabajo de la altimetría de la zona.

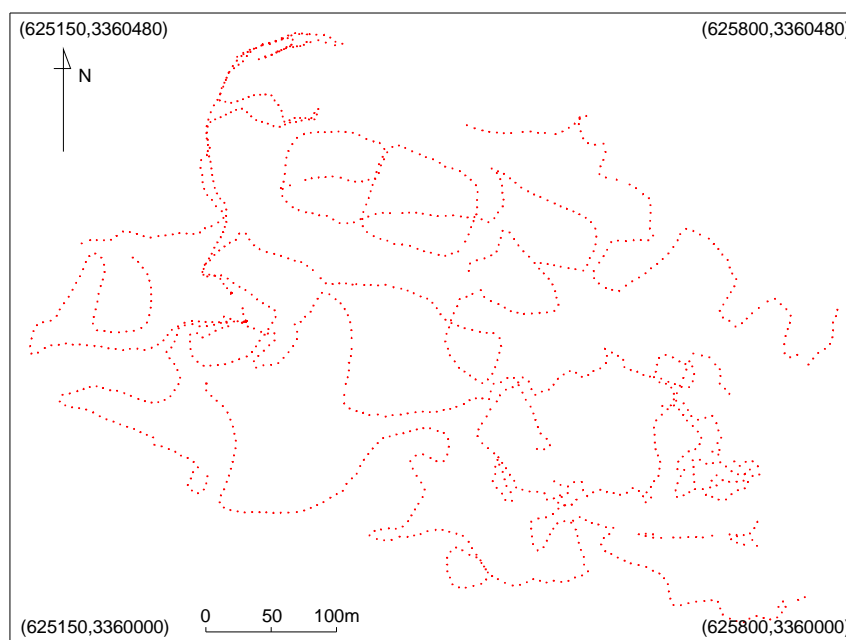
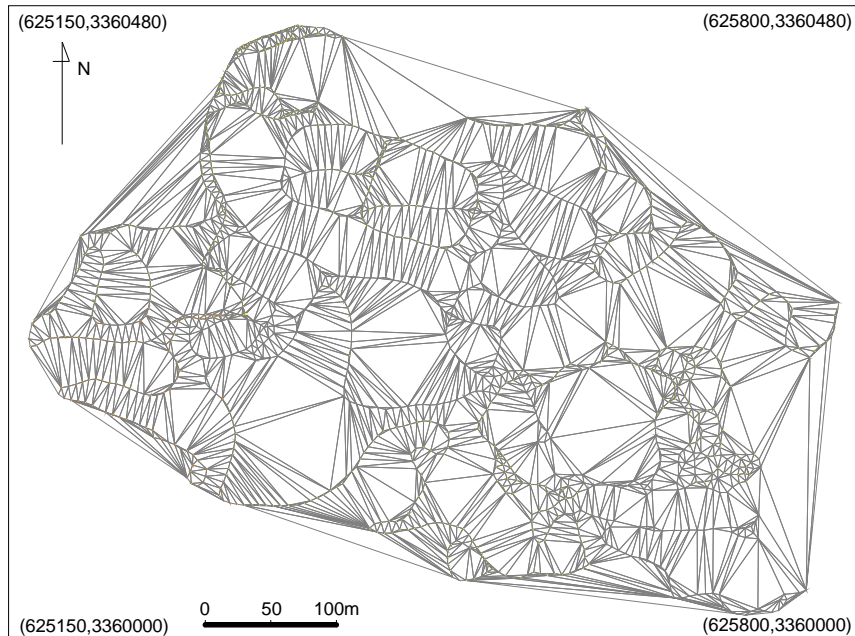


Figura 19.- Puntos registrados por la estación durante el recorrido sobre los jales de Nacozari de García.

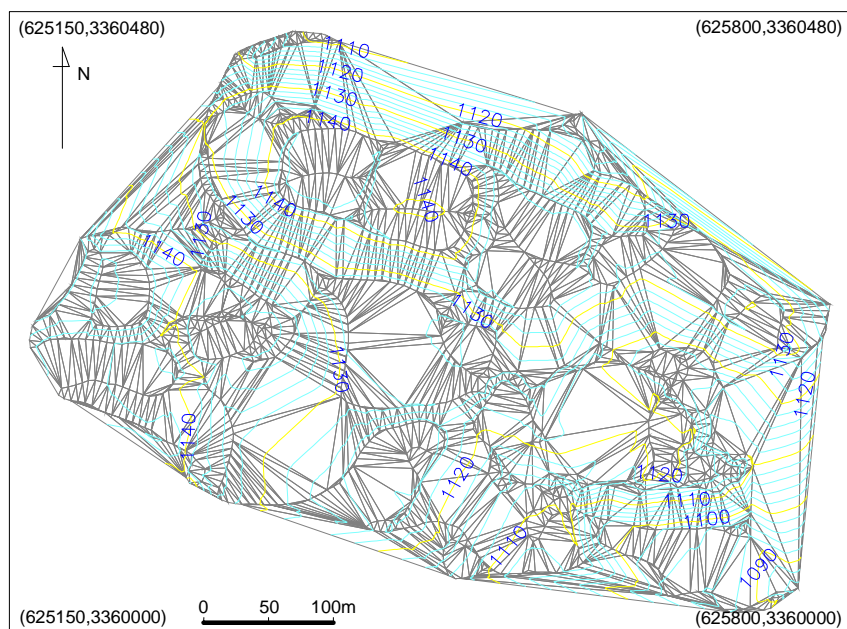
Para calcular el volumen aproximado de los desechos mineros en cuestión, primeramente se apoya en el accesorio CivilCAD del software AutoCAD y así seleccionar y convertir a puntos de terreno, posteriormente el software realiza una triangulación utilizando el algoritmo de triangulación de Delauney, recreando una superficie formada de triángulos producto de una interpolación antes de añadir las curvas de nivel como se muestra en la Figura 20.

La superficie generada por medio de la triangulación sirve de base para construir las curvas de nivel haciendo uso de la función altimetría en la que se configura de tal manera que aparezcan las curvas secundarias cada 2 metros, con esta diferencia de elevación es

suficiente para observar los detalles en la altimetría; y las curvas primarias a cada 10 metros de diferencia de elevación entre ellas (*Figura 21*).



*Figura 20.- Trabajo de triangulación generado por el programa AutoCAD 2004.*



*Figura 21.- Curvas de nivel superpuestas en la triangulación de los puntos. Las curvas amarillas nos indican las curvas primarias y las azules las curvas secundarias.*

### VI.1.1.2 Escorrentía.

El volumen total de agua captado en los jales es igual a el volumen captado por la cuenca (el área de la cuenca ya se incluye el área de los jales) (Figura 18).

Considerando las tendencias principales del flujo del agua producto de la topografía del sitio, existen dos drenajes naturales principales que se pueden aprovechar para redirigir el agua, uno en la parte noroeste (NW) y el otro en la parte sureste (SE), (Figura 22).

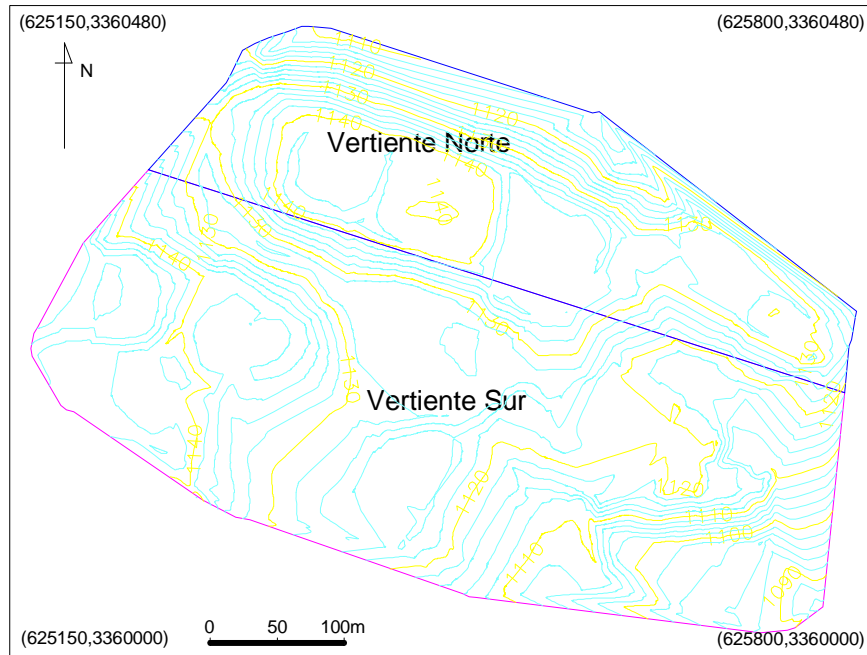


Figura 22.- La imagen nos muestra la delimitación de ambas vertientes (Vertiente Norte y Vertiente Sur).

Para determinar la cantidad total de agua captada en la cuenca de los jales de Nacozari de García, se considerará, la precipitación máxima histórica registrada en un día en la estación Nacozari de García perteneciente a la CONAGUA (1943-2006), es de 93mm y el área de la cuenca del sitio donde se encuentran los jales de Nacozari de García es de  $314,282\text{m}^2$ , así tenemos que el volumen total de agua captado en metros cúbicos es,

$$\text{Volumen} = 29,288.2\text{m}^3.$$

Así tenemos que para cada vertiente el volumen es de:

Volumen de agua captada en la vertiente norte igual a  $7,721\text{m}^3$ .

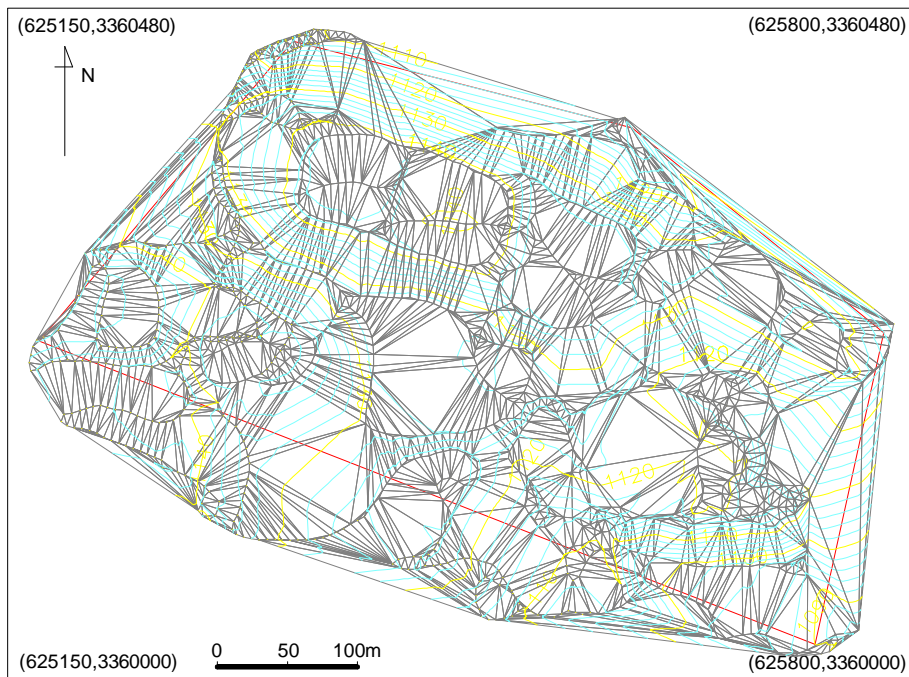
Volumen de agua captada en la vertiente sur igual a  $21,461\text{m}^3$ .

Esta información es importante para poder diseñar los canales de desagüe que además cumplen la función de reducir la erosión hídrica.

### VI.1.1.3 Cubicación de los jales de Nacozari de García.

Al no contar con la topografía del terreno antes de la depositación de los jales, se construye una plataforma considerando algunos puntos de contacto entre el jal y el suelo (pata de los montículo), con esto el programa genera una plataforma uniendo los puntos de los contactos en un plano, considerando las diferencias de elevación de los montículos con respecto a la plataforma (*Figura 23*); así con la función volumen por seccionamiento el software cuantificará en unidades de metros cúbicos todo lo que este por encima de ésta plataforma. Lo que este encima de la plataforma se considerará como volumen positivo y el volumen que se encuentre debajo de la plataforma se considerará como negativo. Así la diferencia de estos volúmenes no proporcionará el volumen real cuantificado por el software, cuyo resultado es **1,505,633.08 m<sup>3</sup>**.

a)



b)

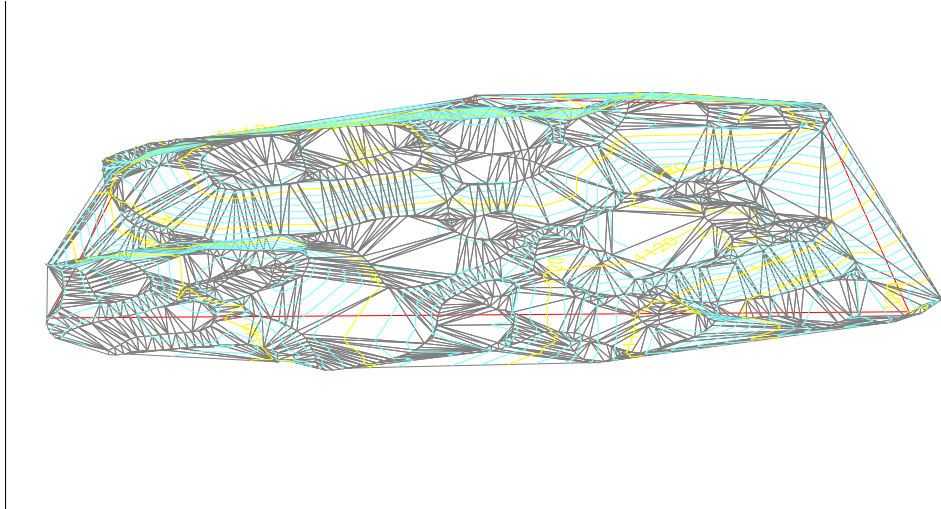


Figura 23.- La figura a) nos muestra en color rojo la plataforma dibujada debajo de la superficie de los jales en vista de planta y la figura b) nos muestra una vista isométrica de la misma figura.

### **VI.1.2 Propiedades físicas y geoquímicas de los jales.**

Para poder realizar algunas evaluaciones y consideraciones como resolver los problemas de erosión y selección de cubiertas de suelo, es necesario determinar previamente algunas propiedades físicas y químicas en los jales de Nacozari.

#### **VI.1.2.1 Determinación de la granulometría de los jales de Nacozari de García.**

En este trabajo se realizó un muestreo en los jales de Nacozari. Se tomaron 4 muestras de cada una de las 5 laderas escogidas a distancia equidistante en el perímetro de la zona de los jales depositados, cada muestra se colectó con secuencia de la base a la cima de la ladera, a distancias iguales entre sí (*Figura 24 y Fotografía 7*), colectando un total de 20 muestras, las cuales fueron preparadas de acuerdo a la metodología mencionada en el Capítulo V (*Fotografía 8*). Los resultados se encuentran plasmados en la Tabla 4.

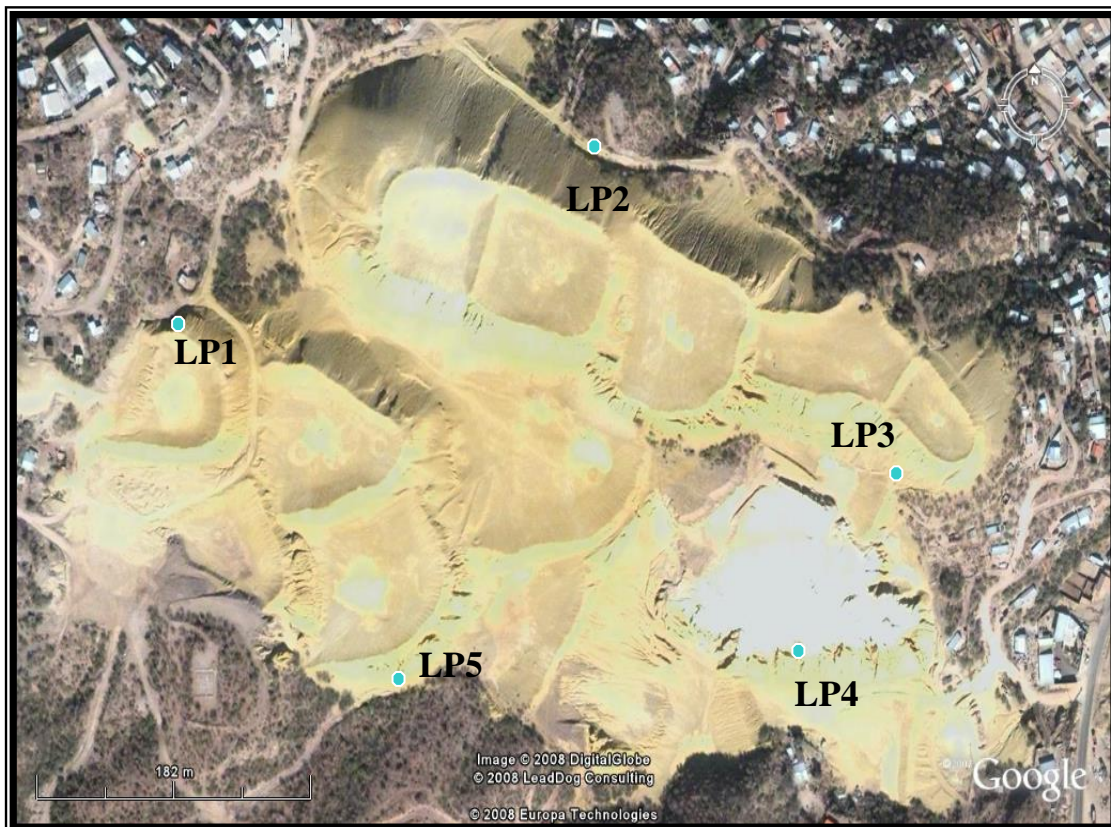


Figura 24.- Ubicación en la imagen satelital de las estaciones de muestreo.



Fotografía 7.- Estaciones de muestreo LP1, LP2, LP3, LP4 y LP5 correspondientemente, además se puede observar en la estación LP1, la metodología de muestreo siempre de abajo hacia arriba.

En términos generales las partículas de los jales localizados en el poblado Nacozari de García entran en la clasificación de arenas gruesas, la Tabla 4 se muestra los porcentajes



de partículas de cada muestra y de cada estación de muestreo que entran en los distintos tamaños o clasificaciones.



Fotografía 8.- Muestreo realizado en jales de granulometría gruesa.

Dos muestras cuyos máximos valores en porcentaje se colocan en la clasificación de arenas finas, además de tener muy altos porcentajes también en arenas muy finas y limos. Esto debido a que existe un apilamiento más reciente de desechos producto de otro sistema de beneficio (flotación), los cuales fueron sometidos a una molienda mucho más fina que los jales en los apilamientos iniciales. Las partículas finas cubren un área aproximada de  $13,454.2\text{m}^3$  (Figura 25). Éste pequeño apilamiento posterior a la depositación de los jales gruesos, fue introducido de forma hídrica, construyendo un dique con material de jales gruesos para su vaciado, por éste motivo las diferencias entre los porcentajes en la clasificación de las muestras LP4-M3 y LP4-M4, con respecto a las demás resultan tan diferentes, ya que fueron realizadas sobre el depósito de jales finos (Fotografía 9).

En muchos casos los jales de sulfuros muy finos, manifiestan un comportamiento cohesivo similar al del sedimento natural de grano fino (Mian & Yanful, 2007). Los desechos finos pueden fácilmente ser erosionados, contaminando las áreas de los alrededores (Tamás & Kobács, 2003).

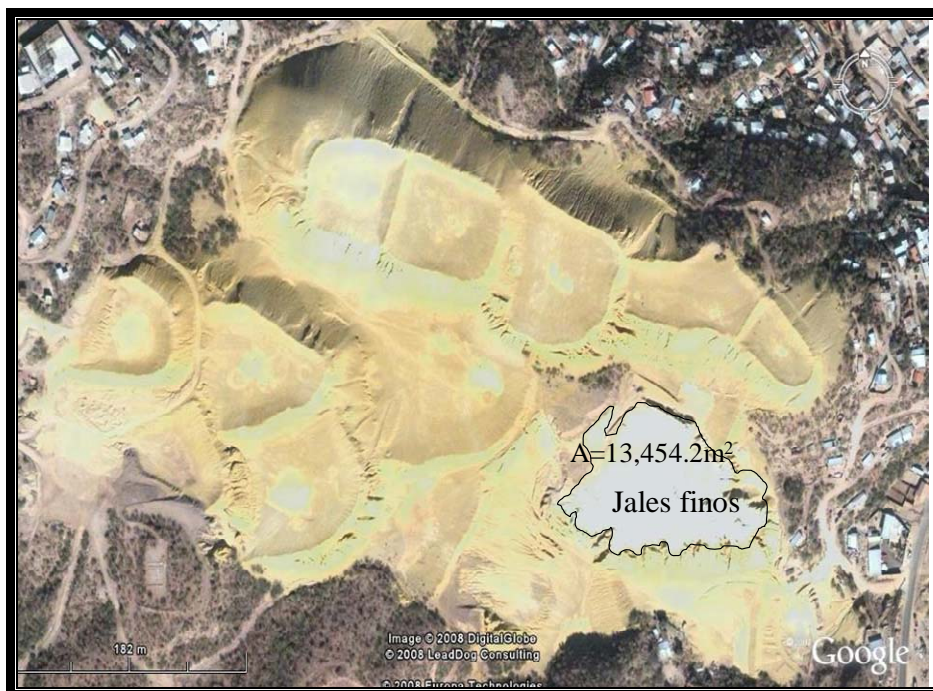


Figura 25.- Ubicación y extensión que cubren los jales de flotación (granulometría fina), dentro del depósito de jales de Nacozari.



Fotografía 9.- Muestreo en la zona de jales finos.

En condiciones áridas extremas, según Dold y Fontboté (2002), el agua tiene dos funciones en la oxidación del sulfuro: reactivo y medio de transporte; cuando entra en los depósitos de jales en combinación con la relación Ácido-Base de la zona primaria favorece

a la migración ascendente vía capilar de sales y a la formación de minerales de sulfato solubles en agua en la superficie de los jales, haciendo los metales disponibles para la removilización con cada precipitación.

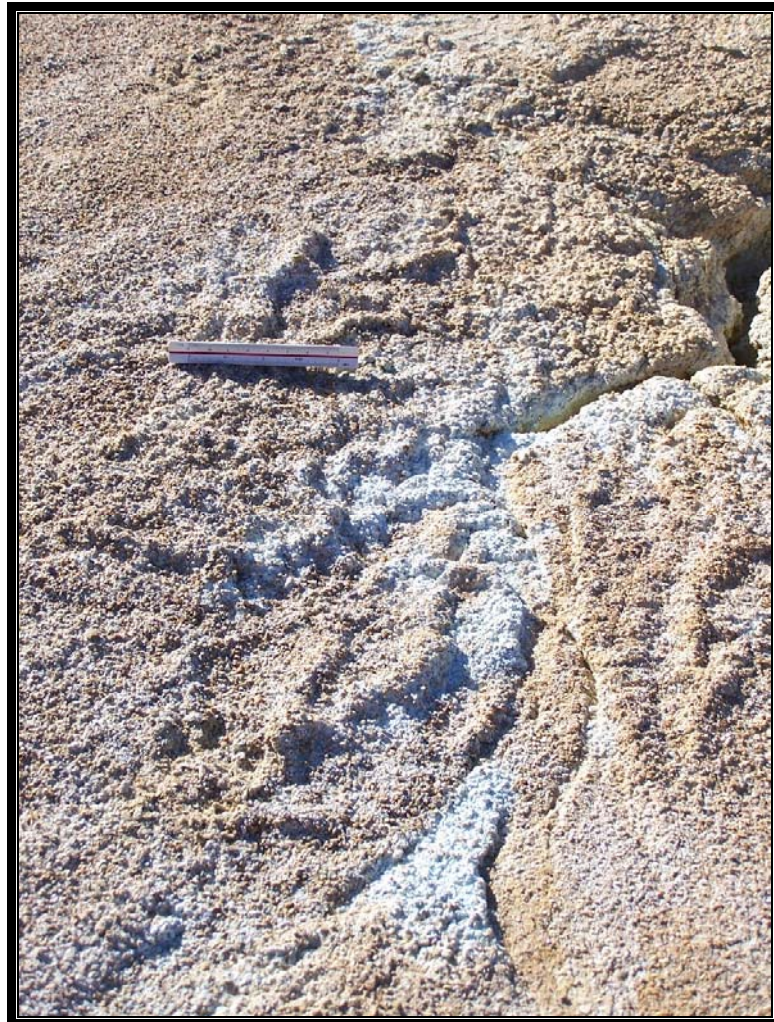
| Muestra | Guijarros                   | Grava | Arena muy gruesa | Arena gruesa | Arena media | Arena fina | Arena muy fina | Limos |
|---------|-----------------------------|-------|------------------|--------------|-------------|------------|----------------|-------|
| LP1-M1  | 0.09                        | 7.39  | 27.27            | 29.23        | 17.91       | 5.64       | 1.44           | 0.96  |
| LP1-M2  | 0.14                        | 7.96  | 29.65            | 38.8         | 20.45       | 5.67       | 1.46           | 0.86  |
| LP1-M3  | 0.17                        | 10.43 | 29.59            | 32.4         | 18.85       | 5.3        | 1.43           | 1.31  |
| LP1-M4  | 0.11                        | 12.39 | 33.13            | 30.34        | 15.93       | 4.713      | 1.49           | 1.45  |
| LP2-M1  | 0                           | 5.74  | 28.09            | 29.04        | 19.29       | 10.99      | 4.24           | 1.95  |
| LP2-M2  | 0                           | 3.93  | 36.02            | 32.6         | 16.51       | 7.42       | 2.15           | 0.96  |
| LP2-M3  | 0                           | 3.93  | 36.02            | 32.6         | 16.51       | 7.42       | 2.15           | 0.96  |
| LP2-M4  | 0                           | 7.12  | 30.48            | 32.57        | 18.77       | 6.96       | 2.28           | 1.52  |
| LP3-M1  | 0.13                        | 7.19  | 26.39            | 30.12        | 18.44       | 10.88      | 4.01           | 2.47  |
| LP3-M2  | 0                           | 8.78  | 28.46            | 27.07        | 16.73       | 11.87      | 4.66           | 2.06  |
| LP3-M3  | 0.09                        | 8.51  | 25.33            | 28.7         | 18.63       | 11.65      | 4.44           | 2.29  |
| LP3-M4  | 0                           | 8.36  | 27.11            | 28.23        | 18.04       | 11.42      | 4.52           | 2.09  |
| LP4-M1  | 0                           | 10    | 25.64            | 26.29        | 20.71       | 11.9       | 3.85           | 1.47  |
| LP4-M2  | 0                           | 9.42  | 25.46            | 25.82        | 20.38       | 11.92      | 4.21           | 1.9   |
| LP4-M3  | 0                           | 1.91  | 1.35             | 1.41         | 5.46        | 42.77      | 30.33          | 16.6  |
| LP4-M4  | 0                           | 1.24  | 1.09             | 1.58         | 6.94        | 36.01      | 31.28          | 21.15 |
| LP5-M1  | 0                           | 7.97  | 29.1             | 30.47        | 17.66       | 9.16       | 3.5            | 2.09  |
| LP5-M2  | 0                           | 7.93  | 30.06            | 31.76        | 17.71       | 8.47       | 2.54           | 1.4   |
| LP5-M3  | 0                           | 8.07  | 29.9             | 28.73        | 17.66       | 9.91       | 3.55           | 1.72  |
| LP5-M4  | 0                           | 11.18 | 31.65            | 27.64        | 15.54       | 8.98       | 3.29           | 1.51  |
|         | Valores máximos por muestra |       |                  |              |             |            |                |       |

Tabla 4.- Clasificación granulométrica de las partículas de cada muestra de los jales de Nacozari de García en base a su porcentaje.

El comportamiento de las zonas de oxidación es dependiente del clima y tamaño de grano. Por ejemplo, en climas húmedos, los horizontes gruesos de las zonas de bajo pH, presentan una oxidación y una movilización más fuerte de los sulfuros que los horizontes finos, esto gracias a la abundante y constante precipitación. Por otra parte, la carencia de agua en el clima árido (poca precipitación y alta evaporación) disminuye la oxidación de sulfuros en granos gruesos debido a la alta evaporación que no da el tiempo necesario para que ocurran altos niveles de oxidación (Razo et al., 2003); no así en los granos finos que por motivo de la alta capacidad de retención de agua gracias a su baja porosidad y permeabilidad, proporciona mas tiempo para que el agua oxide por hidrólisis la superficie

de las partículas que al ser éstas mas pequeñas el área de ataque es mucho mayor que en el caso de partículas gruesas.

Hablando particularmente de los jales finos apilados en una zona por encima de los jales gruesos en Nacozari; poseen una pequeña cubierta de sales eflorescentes en su superficie, esto debido a un fenómeno de acarreo de sales solubles por capilaridad, transportados a través del vapor transpirado a través de los poros de los jales (*Fotografía 10*). Estas sales al ser muy finas, son muy susceptibles a la erosión eólica, pudiendo tener una zona grande de influencia en cuanto a su depositación.



*Fotografía 10.- Acumulación de sales eflorescentes en la superficie de los jales finos.*

### VI.1.2.2 Cálculo de la densidad.

Para conocer el tonelaje total de los desechos requiere de la necesidad antes que nada del cálculo de la densidad promedio del material; motivo por el cual se realiza un muestreo mencionado anteriormente. Se pesaron todas las cantidades retenidas en las diferentes mallas incluyendo el fondo. A lo anterior prosiguió la toma de una pequeña cantidad representativa de cada muestra y su peso en el densímetro (*Fotografía 11*), como se explica en el punto V.1.1.



Fotografía 11.- Densímetro Electrónico Alfa Mirage EW-300SG.

Los resultados de las densidades resultantes así como de los promedios se muestran en la Tabla 5.

| Malla 10 |                          |                           |                             |
|----------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Muestras | Peso total de la muestra | Peso en el densímetro(gr) | Densidad gr/cm <sup>3</sup> |
| LP4-M1   | 89.2                     | 7.79                      | 2.28                        |
| LP2-M1   | 63.4                     | 3.08                      | 2.78                        |
| LP4-M2   | 90.5                     | 2.58                      | 2.32                        |
| LP2-M2   | 35                       | 2.31                      | 2.02                        |
| LP4-M3   | 7.8                      | 0.7                       | 2.06                        |
| LP2-M3   | 126.6                    | 2.62                      | 2.44                        |
| LP4-M4   | 10.4                     | 1.15                      | 1.85                        |

Continuación.

|                  |       |      |      |
|------------------|-------|------|------|
| LP2-M4           | 76.8  | 3.08 | 2.44 |
| <b>Malla 18</b>  |       |      |      |
| LP4-M1           | 236.2 | 1.49 | 2.3  |
| LP2-M1           | 285.4 | 2.2  | 2.68 |
| LP4-M2           | 236.5 | 1.34 | 2.37 |
| LP2-M2           | 312.3 | 1.13 | 2.3  |
| LP4-M3           | 8.9   | 0.46 | 1.45 |
| LP2-M3           | 282.5 | 1.69 | 2.45 |
| LP4-M4           | 6.7   | 0.66 | 1.77 |
| LP2-M4           | 298.2 | 1.92 | 3.12 |
| <b>Malla 35</b>  |       |      |      |
| LP4-M1           | 243   | 2.58 | 2.35 |
| LP2-M1           | 289.5 | 1.76 | 2.3  |
| LP4-M2           | 231.2 | 1.93 | 1.98 |
| LP2-M2           | 327.3 | 2.02 | 2.24 |
| LP4-M3           | 10.6  | 0.78 | 1.64 |
| LP2-M3           | 203   | 2.33 | 2.3  |
| LP4-M4           | 13.3  | 0.85 | 1.52 |
| LP2-M4           | 283.4 | 2.72 | 1.74 |
| <b>Malla 60</b>  |       |      |      |
| LP4-M1           | 178   | 0.91 | 1.9  |
| LP2-M1           | 184   | 1.48 | 1.95 |
| LP4-M2           | 174.4 | 1.4  | 2.36 |
| LP2-M2           | 181.5 | 1    | 1.85 |
| LP4-M3           | 30.8  | 1.08 | 1.71 |
| LP2-M3           | 121.7 | 1.26 | 2.32 |
| LP4-M4           | 50    | 0.88 | 2    |
| LP2-M4           | 147   | 1.27 | 2.46 |
| <b>Malla 120</b> |       |      |      |
| LP4-M1           | 103.5 | 0.98 | 1.84 |
| LP2-M1           | 111.4 | 2.64 | 2.16 |
| LP4-M2           | 107.2 | 1.81 | 2.12 |
| LP2-M2           | 90.5  | 1.24 | 2.06 |
| LP4-M3           | 296.9 | 1.81 | 1.98 |
| LP2-M3           | 77.5  | 1.02 | 2.04 |
| LP4-M4           | 300.2 | 1.89 | 2.07 |
| LP2-M4           | 54.5  | 1.32 | 1.75 |
| <b>Malla 230</b> |       |      |      |
| LP4-M1           | 33.3  | 1.97 | 1.9  |
| LP2-M1           | 40.5  | 1.05 | 1.93 |
| LP4-M2           | 38    | 1.31 | 2.18 |
| LP2-M2           | 28    | 1.44 | 2.2  |
| LP4-M3           | 263.5 | 1.23 | 2.1  |
| LP2-M3           | 28.5  | 0.85 | 1.59 |
| LP4-M4           | 302.2 | 1.17 | 2.14 |
| LP2-M4           | 18.8  | 0.87 | 1.45 |
| <b>Fondo</b>     |       |      |      |
| LP4-M1           | 13    | 0.77 | 1.74 |
| LP2-M1           | 17.5  | 0.7  | 1.72 |
| LP4-M2           | 15.7  | 0.55 | 1.62 |

Continuación.

|                               |                                   |      |                                 |
|-------------------------------|-----------------------------------|------|---------------------------------|
| LP2-M2                        | 9                                 | 0.68 | 2.28                            |
| LP4-M3                        | 142                               | 1    | 1.59                            |
| LP2-M3                        | 13                                | 0.88 | 2.3                             |
| LP4-M4                        | 198.5                             | 2.09 | 2.17                            |
| LP2-M4                        | 10.7                              | 0.88 | 1.52                            |
| Muestras                      | Densidad promedio de cada muestra |      | Peso total de cada muestra (gr) |
| LP4-M1                        | 2.2                               |      | 896.2                           |
| LP2-M1                        | 2.3                               |      | 991.7                           |
| LP4-M2                        | 2.2                               |      | 893.5                           |
| LP2-M2                        | 2.2                               |      | 983.6                           |
| LP4-M3                        | 1.9                               |      | 760.5                           |
| LP2-M3                        | 2.3                               |      | 852.8                           |
| LP4-M4                        | 2.1                               |      | 881.3                           |
| LP2-M4                        | 2.4                               |      | 889.4                           |
| Densidad promedio total = 2.2 |                                   |      |                                 |

Tabla 5.- Densidades obtenidas de cada muestra y la densidad promedio de los jales.

Para el cálculo del tonelaje solo se convierten las unidades arrojadas por el densímetro expresadas en gramos por centímetro cúbico en toneladas por metro cúbico, dando como resultado un tonelaje de **3, 312,392.8 Ton.**

### VI.1.2.3 Erosión hídrica para suelos.

El cálculo de erosión hídrica se realizó para los dos tipos de suelos (*Figura 26*), que rodean al poblado de Nacozari de García, Sonora. Esto con la finalidad de tener un dato base, del comportamiento de la erosión hídrica en condiciones naturales.

Las características de los dos suelos existentes en el sitio de Nacozari de García según datos proporcionados por la misma carta edafológica del área se muestran más adelante.

El cálculo de la erosión hídrica se lleva a cabo empleando la fórmula universal de pérdida de suelos, así como el cálculo de cada una de sus variables, como se describió en el punto V.1.2.

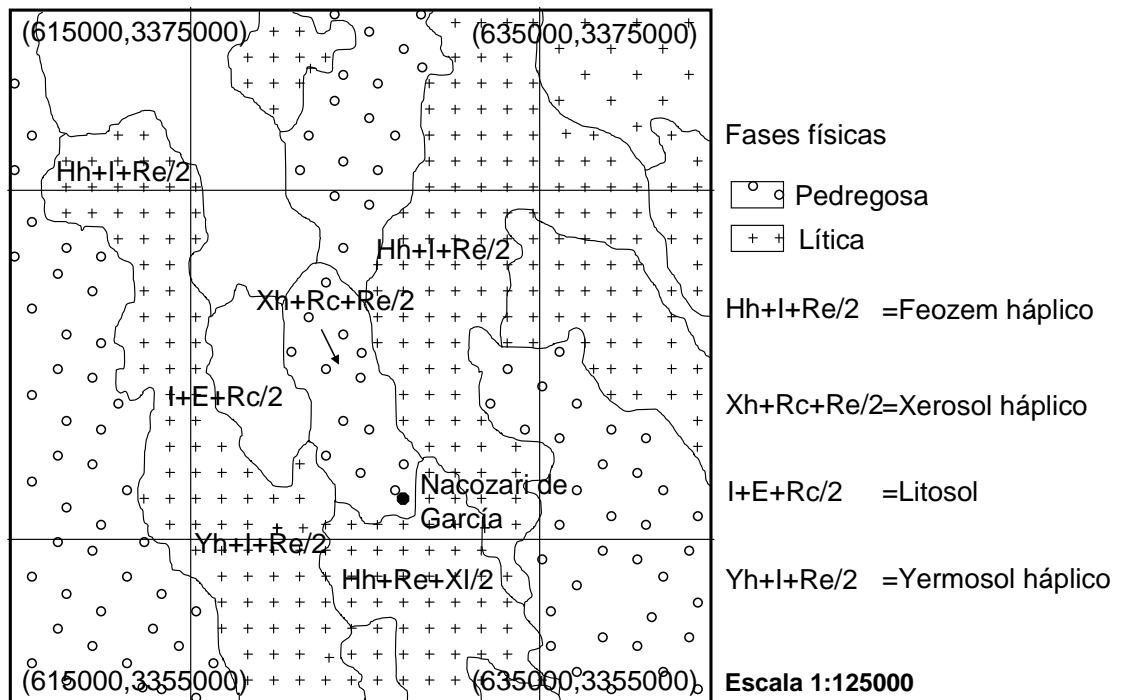


Figura 26.- Carta edafológica ampliada de Nacozari de García y sus alrededores (Modificada de INEGI, 2000).

### 1) Cálculo del factor de erodabilidad por precipitación R.

Para este cálculo se utiliza la base de datos de precipitación diaria, sobre el cual se obtuvieron las precipitaciones acumuladas mensuales históricas registradas por la estación Nacozari de García perteneciente a la CONAGUA; con estos valores se calcularon las precipitaciones promedio mensuales comprendida en el periodo 1943-2006 (Tabla 6).

El cálculo del factor R se realizó mediante la fórmula de Lombardi Neto y Moldenhauer (1980):

$$R = 6.866 (p^2/P)^{0.85}$$

Donde:

p = Precipitación promedio mensual

P = Precipitación promedio anual.

Cabe que mencionar que el resultado final de R, fue determinado para cada mes.



| Precipitación acumulada mensual ,en el Sitio Nacozari de García período 1943-2006 |       |       |       |      |      |       |       |       |       |       |      |       |                 |
|---|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------|
| Año   | Ene   | Feb   | Mar   | Abr  | May  | Jun   | Jul   | Ago   | Sept  | Oct   | Nov  | Dic   | Acumulada anual |
| 1943  | 34    | 0     | 11.5  | 0.0  | 0    | 50    | 96    | 195.5 | 69    | 37    | 0    | 3.4   | 496.4           |
| 1944  | 69.5  | 56    | 56    | 15   | 0    | 3.5   | 98    | 97    | 69.5  | 22    | 37   | 19    | 542.5           |
| 1945  | 22    | 20    | 20    | 0    | 0    | 0     | 106   | 118   | 45    | 64    | 0    | 0     | 395             |
| 1946  | 66.5  | 0     | 11.5  | 10.5 | 3    | 0     | 186   | 111.5 | 154.5 | 24.5  | 2    | 53.5  | 623.5           |
| 1947  | 4     | 2.5   | 24    | 0    | 26   | 0     | 163   | 136.5 | 24    | 2.5   | 49.5 | 10    | 442             |
| 1948  | 0     | 74.5  | 7     | 0    | 0    | 0     | 127.5 | 72.5  | 47    | 22    | 6.5  | 101   | 458             |
| 1949  | 182.5 | 99    | 4.5   | 1    | 0    | 38.5  | 172   | 33    | 113   | 9.5   | 0    | 63.5  | 716.5           |
| 1950  | 13.5  | 18.5  | 0.1   | 0    | 3    | 41.5  | 226.5 | 30.5  | 28    | 6     | 0    | 15    | 382.6           |
| 1951  | 40.5  | 0     | 3.5   | 28.5 | 0    | 0     | 106   | 108.5 | 25.5  | 83    | 16   | 57    | 468.5           |
| 1952  | 0     | 57.5  | 52    | 29   | 38   | 41.5  | 83.5  | 83    | 14    | 0     | 40.5 | 87.5  | 526.5           |
| 1959  |       |       |       |      |      |       |       |       |       | 6     | 20.2 | 74    | 100.2           |
| 1960  | 134.3 | 11    | 0     | 0    | 0    | 5     | 116.1 | 150   | 34    | 11    | 2    | 54    | 517.4           |
| 1961  | 47    | 0     | 0     | 0    |      | 66    | 217.7 | 98.4  | 35.5  | 37.5  | 27   | 70.8  | 564.4           |
| 1962  | 122   | 0     | 22    | 0    | 0    | 9.5   | 199   | 31.5  | 50    | 45    | 32   | 83.9  | 594.9           |
| 1963  | 24    | 22.5  | 0     | 7.5  | 0    | 1.5   | 114.5 | 51.5  | 86.5  | 12.5  | 39.5 | 28    | 388             |
| 1964  | 13    | 3     | 33.5  | 8    | 0    | 6     | 167.5 | 28    | 34    | 152.5 | 1    | 4.5   | 451             |
| 1965  | 44    | 47.5  | 22.5  | 0    | 0    | 26    | 82    | 79.5  | 32.5  | 0     | 0    | 161.2 | 495.2           |
| 1966  | 15    | 78    | 0     | 3.5  | 0    | 27    | 215.5 | 178   | 88    | 0     | 9    | 9     | 623             |
| 1967  | 63.5  | 1     | 0     | 0    | 10.5 | 8.5   | 103   | 90.5  | 26.5  | 0     | 63.5 | 294   | 661             |
| 1968  |       | 66    | 75.5  | 10   | 0    | 0     | 62.8  | 106   | 3.4   | 0     | 35.5 | 23.5  | 382.7           |
| 1969  | 22.5  | 19.5  |       | 0    | 23.5 | 0     | 111   | 115.5 | 82    | 16    | 28   | 57.7  | 475.7           |
| 1970  | 16    | 9     | 43    | 7    | 0    | 27.5  | 102.5 | 204   | 112.5 | 8     | 0    | 0     | 529.5           |
| 1971  | 0     | 74.5  | 0     | 0    | 0    | 0     | 61    | 71    | 11.5  | 76.5  | 13.5 | 30    | 338             |
| 1972  | 1     | 0     | 0     | 0    | 4    | 23    | 119   | 138   | 60    | 96.1  | 45.5 | 43.5  | 530.1           |
| 1973  | 32.5  | 105   | 86    | 0    | 37.5 | 2.5   | 113.5 | 6     | 11.5  | 0     | 0    | 0     | 394.5           |
| 1974  | 73.5  | 0     | 2.5   | 0    | 0    | 0     | 162   | 77.5  | 46    | 60.5  | 31.5 | 6     | 459.5           |
| 1975  | 82    | 1     | 34    | 3    | 0    | 0     | 234   | 28    | 72    | 2     | 1    |       | 457             |
| 1976  |       | 63.5  | 7     | 19   | 12   | 14    | 207.5 | 50    | 35    | 32    | 30   | 15    | 485             |
| 1977  | 58    | 0     | 7     | 4    | 5    | 2     | 140.5 | 196.5 | 27    | 58    | 80.5 | 21    | 599.5           |
| 1979  | 112.8 | 10.2  | 45.3  | 0    | 4.4  | 3.4   | 110   | 65    | 33.7  | 0     | 7.1  | 18.1  | 410             |
| 1980  | 8.7   | 133.1 | 18.1  | 0.2  | 0    | 71.8  | 177.3 | 164.7 | 37.1  | 1.5   | 0.1  | 5.5   | 618.1           |
| 1981  | 77.9  | 57.6  | 65    | 37.7 | 4    |       |       |       | 99.2  | 16    |      | 0.4   | 357.8           |
| 1982  | 50.4  | 1.1   | 0.8   | 0.1  | 10.4 |       | 87.5  | 134.1 | 74.8  | 0.1   | 66.4 | 112.2 | 537.9           |
| 1983  | 51.5  | 67.4  | 104   | 18.8 | 0.2  |       | 130.3 | 193.3 | 152.5 | 126   | 56.2 |       | 900.2           |
| 1984  | 25.5  | 0.1   | 0.1   | 10.6 | 16.9 | 45.9  | 161.8 | 182.7 | 49.7  |       |      | 175.5 | 668.8           |
| 1985  | 61.1  | 47.3  | 16.8  | 98.4 |      |       |       |       |       |       |      |       | 223.6           |
| 1991  |       |       |       |      |      |       | 78.4  | 193.2 | 83.2  | 2     | 18.1 | 113.1 | 488             |
| 1992  | 53    | 20.7  | 102.2 | 19.2 | 9.4  | 0.2   | 246   | 104.7 | 48.5  | 8.5   | 0    | 116.4 | 728.8           |
| 1993  | 141   |       | 18.7  | 8.5  | 30   | 70.4  | 197.7 | 133.8 | 54.4  | 26.7  | 36.7 | 42.3  | 760.2           |
| 1994  | 10.4  | 33.8  | 13.9  | 6    | 0.1  | 25.2  |       | 93.6  | 104.7 | 40.1  | 32.8 | 0.6   | 361.2           |
| 1995  | 47.4  | 92.2  | 31.1  | 1.4  | 0    | 2.5   | 37.7  | 70.4  | 75.8  | 11.7  | 37.3 | 4.9   | 412.4           |
| 1996  | 0     | 5.6   | 2     | 1.1  | 0    | 2.7   | 278.2 | 81    | 53.4  | 13.1  | 19.5 | 0     | 456.6           |
| 1997  | 21.7  | 55.3  | 4     | 15.2 | 24.1 | 3.3   | 97.2  | 122.6 | 65.1  | 16.5  | 52   | 26.9  | 503.9           |
| 1998  | 0.3   | 92.7  | 57.1  | 1    | 0    | 0     | 210   | 108.5 | 12.1  | 62.1  | 20.3 | 8.4   | 572.5           |
| 1999  | 0     | 0     | 3.1   | 4.3  | 0.1  | 21.4  | 189.2 | 169.1 | 52.5  | 7     | 0.1  | 0     | 446.8           |
| 2000  | 0     | 1.8   | 15.6  | 0    | 0.1  | 108.8 | 131.9 | 187.2 | 41.6  | 146.1 | 37.9 | 0.1   | 671.1           |

Continuación.

|           |      |      |       |      |     |      |       |       |      |      |      |      |       |
|-----------|------|------|-------|------|-----|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| 2001      | 51.5 | 17.5 | 20    | 15.8 | 0   | 24.3 | 230.3 | 132.3 | 53.4 | 12.3 | 3    | 17.2 | 577.6 |
| 2002      | 17.6 | 73   | 0     | 0    | 0   | 2    | 121.6 | 118.1 | 27   | 7.9  | 16.6 | 21.2 | 405   |
| 2003      | 0    | 53.4 | 15.5  | 0    | 0   | 4.2  | 90.5  |       |      | 35.1 | 28.5 |      | 227.2 |
| 2006      |      |      |       |      |     |      |       |       |      | 34.8 | 2.6  |      | 37.4  |
| Promedios | 42.5 | 34.6 | 22.96 | 8.2  | 5.8 | 18.1 | 143.8 | 109.8 | 56   | 30.2 | 22.3 | 45.5 | 489.3 |

Tabla 6.- Promedios mensuales y anual de precipitación registrados en Nacozari de García en el periodo comprendido de 1943-2006 (con apoyo de los datos diarios de la estación de la CONAGUA en Nacozari de García con número de identificación 26059).

Sustituyendo los valores de precipitación promedio mensual (p) y precipitación promedio anual (P = 489.3mm) en la fórmula de Lombardi Neto y Moldenhauer (1980), obtenemos los valores de R para cada mes del año (Tabla 7). El valor mensual de R se usó para el cálculo de la erosión hídrica en ambos tipos de suelos.

| Mes        | Valor de R |
|------------|------------|
| Enero      | 1.73       |
| Febrero    | 1.23       |
| Marzo      | 0.61       |
| Abril      | 0.11       |
| Mayo       | 0.06       |
| Junio      | 0.41       |
| Julio      | 13.78      |
| Agosto     | 8.72       |
| Septiembre | 2.78       |
| Octubre    | 0.97       |
| Noviembre  | 0.58       |
| Diciembre  | 1.95       |

Tabla 7.- Valores de R para cada mes del año.

Este dato nos servirá para el cálculo de la erosión, sustituyendo en la fórmula universal de pérdida de suelos, obtenemos las cantidades de erosión para cada mes.

2) **Valor de K:** Como se mencionó en la metodología el valor de K se determina en función del nomograma de Wischmeier et al., (1971) (Tabla 8).

Según la carta Edafológica (INEGI, 2000) del sitio existen dos tipos de suelos en el área del poblado Nacozari de García y sus alrededores, siendo los siguientes:

**Suelo: Xerosol háplico/ Regosol calcárico/Regosol eútrico (Xh + Rc + Re/2):**

**Suelo :Feozem háplico + Regosol eutrico + Xerosol luvico (Hh + Re + XI/2):**

|                       | % de arenas muy finas + limos | % arena | % materia orgánica | Tamaño de la estructura | Permeabilidad | K (Wischmeier et al., 1971) |
|-----------------------|-------------------------------|---------|--------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------|
| Suelo xerosol háplico | 42                            | 58      | 1.9                | 2                       | 3             | 0.3                         |
| Suelo xerosol háplico | 54                            | 46      | 2.9                | 2                       | 2             | 0.22                        |

Tabla 8.- Valores correspondientes para los suelos xerosol h y feozem h, proporcionados por los datos de la carta edafológica (INEGI, 2006).

Para el caso del suelo Xerosol háplico y sus características en la Tabla 13,  $K = 0.3$ , y para el Feozem háplico, tenemos una  $K = 0.22$ .

3) Valor de L.S.: Elegimos dos distancias en función del acarreo constante, hacia donde corre el drenaje fluvial, correspondiendo a los dos tipos de suelos que rodean al poblado de Nacozari de García.

En el suelo Xerosol háplico se consideró 266 metros de distancia horizontal, para una diferencia de 20 metros de elevación entre cada curva de nivel (*Figura 27*). Correspondiéndole así, según el nomograma de Wischmeier y Smith (1978) un factor L.S. de 2.8, mientras que para el suelo Feozem háplico se consideró una distancia de 181 metros en la componente horizontal y una diferencia de elevación de 20 metros, correspondiendo un factor L.S. de 3.9.

4) Valor de C: En función de la densidad de vegetación por metro cuadrado, se obtiene el factor C de cada área (*Tabla 9*), por lo que se determina un promedio de las tres zonas muestreadas donde el valor de C final es 4.67.

|                     | Muestra 1(% de cubierta vegetal) = 60% | Muestra 2 (% de cubierta vegetal) = 80% | Muestra 3 (% de cubierta vegetal) = 100% |
|---------------------|--|---|--|
| Valor promedio de C | 8.7                                    | 4.2                                     | 1.1                                      |

Tabla 9.- Valor de C (coeficiente de vegetación) correspondiente a cada metro cuadrado muestreado.

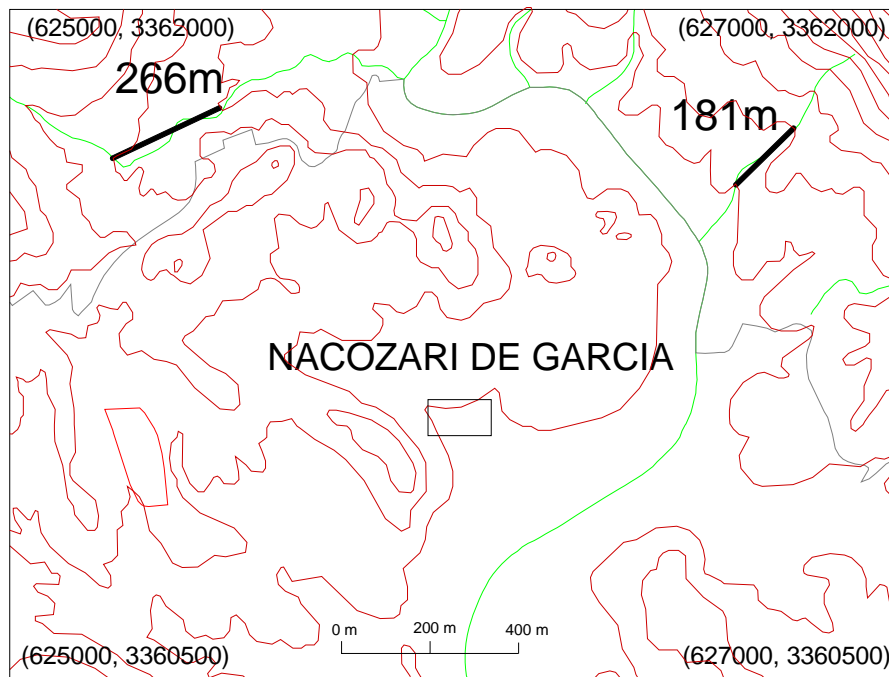


Figura 27.- Carta topográfica de Nacozeni de Garcia donde se muestran las longitudes y ubicación de los dos taludes para determinar los valores del factor L.S (Modificada de INEGI, 2000).

5) Cálculo de Erosión (A). Se obtiene sustituyendo todos los valores calculados de las variables en la fórmula universal de pérdida de suelos, para ambos tipos. Los resultados se pueden observar en la Tabla 10.

| Mes          | Erosión (A) para el Suelo xerosol h en Ton/ha.mes | Erosión (A) para el Suelo feozem h en Ton/ha.mes |
|--------------|---|--|
| Enero        | 1.52  | 1.28   |
| Febrero      | 1.08  | 0.9  |
| Marzo        | 0.54  | 0.45   |
| Abril        | 0.09  | 0.08   |
| Mayo         | 0.05  | 0.04   |
| Junio        | 0.36  | 0.3  |
| Julio        | 12.11   | 10.15  |
| Agosto       | 7.66  | 6.42   |
| Septiembre   | 2.44  | 2.04   |
| Octubre      | 0.86  | 0.72   |
| Noviembre    | 0.51  | 0.43   |
| Diciembre    | 1.72  | 1.44   |
| <b>Total</b> | <b>28.93</b>                                      | <b>24.25</b>                                     |

Tabla 10.- Valores de erosión correspondientes a cada mes y para cada tipo de suelo.

El suelo mas susceptible a la erosión hídrica es el suelo xerosol háplico, con un 14% mas alto que el suelo feozem háplico. Además, como se puede observar en los meses de

julio y agosto ocurre la más grande cantidad de suelo erosionado en promedio en todo el año, para ambos tipos de suelos. Tan solo estos dos meses suman aproximadamente el 68% de la cantidad de suelo erosionada al año. Esto se encuentra directamente asociado a la precipitación promedio de ambos meses, ya que tienen los valores más altos y significativos en el año como se puede observar en la Figura 28. Lógicamente se puede ver en la Figura 29 que los valores más altos de suelo erosionado por período estacional, corresponden al verano.

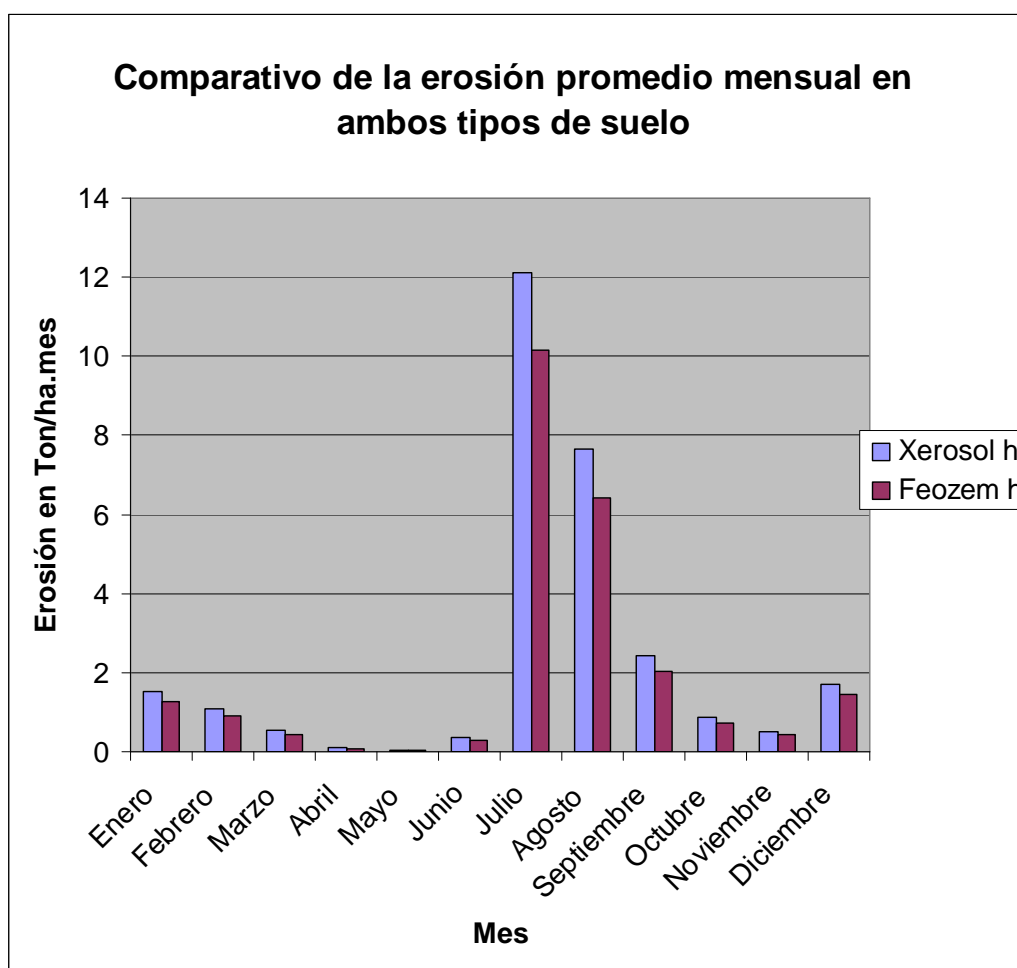


Figura 28.- Cantidad promedio mensual de suelo erosionado en Nacozari de García.

Sumando la erosión de los meses correspondientes para cada período estacional del año y para cada tipo de suelo, se obtienen las cantidades registradas en la Tabla 11.

| Estación  | Erosión Xerosol h | Erosión Feozem h |
|-----------|-------------------|------------------|
| Primavera | 0.5               | 0.42             |
| Verano    | 22.21             | 18.61            |
| Otoño     | 3.08              | 2.58             |
| Invierno  | 3.14              | 2.63             |

Tabla 11.- Cantidad erosionada por período estacional, para cada tipo de suelo.

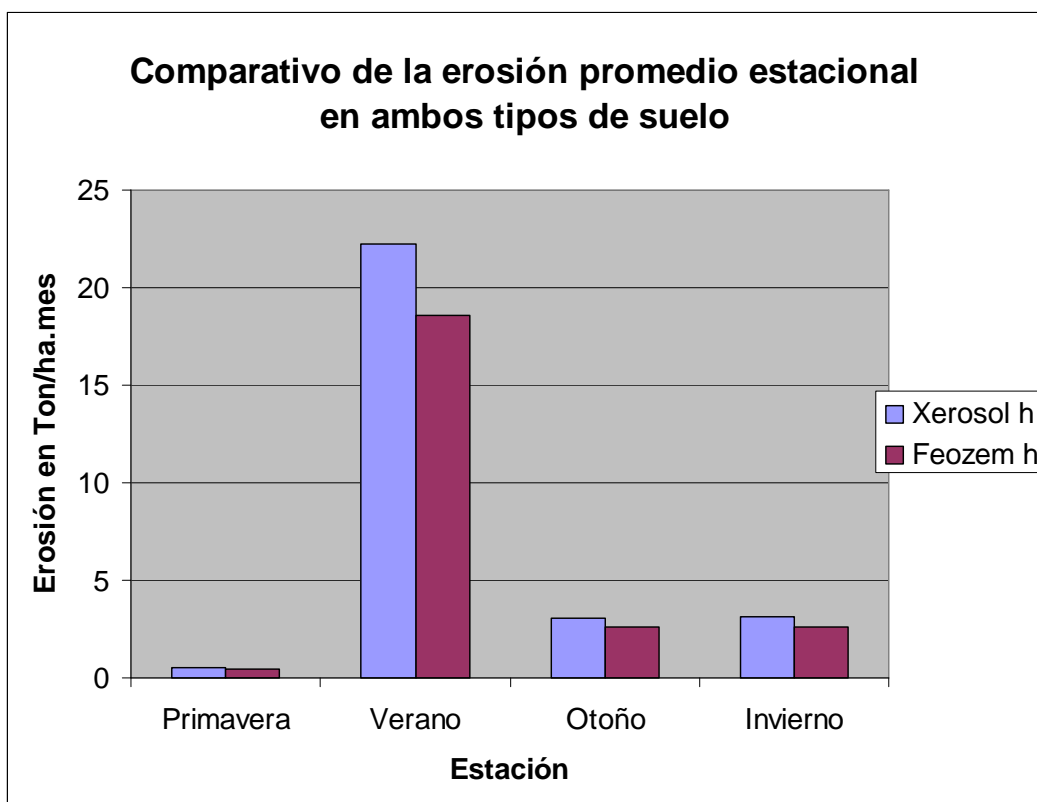


Figura 29.- Cantidad promedio estacional de suelo erosionado en Nacozari de García.

En cuanto a los períodos estacionales se refiere, la cifra es mucho mas significativa para el verano, se incrementa la cantidad y logra sumar el 77% del suelo erosionado en el año, en cambio a la primavera le corresponde el 1.7% del total de material erosionado en el año.

#### VI.1.2.4 Erosión hídrica en los jales del poblado de Nacozari de García.

En función del análisis granulométrico, los jales del poblado de Nacozari de García se dividen en dos zonas, considerándose así la erosión hídrica en dos; la primera se enfoca a la zona con partículas gruesas y la segunda a la de partículas finas.

Al existir diferencias notorias entre el tamaño de grano, contenido de materia orgánica y densidad de vegetación entre los suelos y los jales, algunos parámetros retomarán valores diferentes, mientras que R permanece constante.

En el cálculo del factor de erodabilidad (K), hay que considerar los valores que se dan en la Tabla 12. EL contenido de materia orgánica en los jales de ambas clasificaciones granulométricas es nulo, por lo que consideraremos un porcentaje de materia orgánica igual a 0. En lo que respecta al tamaño de la estructura, la permeabilidad y el porcentaje de arenas gruesas, muy finas y limos se obtuvieron gracias a los datos generados; realizándose el promedio para cada uno (*Tabla 13*). En el caso de la permeabilidad es directamente proporcional al tamaño de partículas, es decir, a menor tamaño de partículas corresponde una permeabilidad mas lenta, de manera contraria, a mayor tamaño de las partículas corresponde una permeabilidad más rápida.

|                          | % arena (0.1-2mm) | % arenas muy finas + limos | % materia orgánica | Tamaño de la estructura | Permeabilidad | K (Wischmeier et al., 1971) |
|--------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|---------------|-----------------------------|
| Jales con arenas gruesas | 86.5              | 4.7                        | 0                  | 3                       | 1             | 0.21                        |
| Jales con arenas finas   | 48.3              | 49.7                       | 0                  | 2                       | 3.5           | 0.53                        |

*Tabla 12.- Características de cada tipo de jal según su clasificación granulométrica, existente en el poblado Nacozari de García.*

Ahora partiendo de los datos plasmados en la Tabla 12 se obtiene K (Wischmeier et al., 1971), dándonos por resultado los siguientes valores:

K para jales gruesos = **0.21**

K para jales finos = **0.53**

Al igual que en el cálculo de la erosión hídrica en suelos, para determinar el factor L.S. fué necesario obtener primero una pendiente promedio a lo largo de la sección A-A´ trazada en las zona donde se encuentran los jales cuyo tamaño de partícula es clasificado como arenas gruesas (*Figura 31*), y la sección B-B´ para los jales con partículas finas (*Figura 32*). Ambas secciones se encuentran representadas en el plano con vista de planta, que aparece en la Figura 30.

| Jales gruesos |           |       |                  |              |             |            |                |       |
|---------------|-----------|-------|------------------|--------------|-------------|------------|----------------|-------|
| Muestra       | Guijarros | Grava | Arena muy gruesa | Arena gruesa | Arena media | Arena fina | Arena muy fina | Limos |
| LP1-M1        | 0.09      | 7.39  | 27.27            | 29.23        | 17.91       | 5.64       | 1.44           | 0.96  |
| LP1-M2        | 0.14      | 7.96  | 29.65            | 38.8         | 20.45       | 5.67       | 1.46           | 0.86  |
| LP1-M3        | 0.17      | 10.43 | 29.59            | 32.4         | 18.85       | 5.3        | 1.43           | 1.31  |
| LP1-M4        | 0.11      | 12.39 | 33.12            | 30.34        | 15.93       | 4.71       | 1.49           | 1.45  |
| LP2-M1        | 0         | 5.74  | 28.09            | 29.04        | 19.29       | 10.99      | 4.24           | 1.95  |
| LP2-M2        | 0         | 3.93  | 36.02            | 32.6         | 16.51       | 7.41       | 2.15           | 0.96  |
| LP2-M3        | 0         | 3.93  | 36.02            | 32.6         | 16.51       | 7.42       | 2.15           | 0.96  |
| LP2-M4        | 0         | 7.11  | 30.48            | 32.57        | 18.77       | 6.96       | 2.28           | 1.52  |
| LP3-M1        | 0.13      | 7.18  | 26.39            | 30.11        | 18.44       | 10.88      | 4.01           | 2.47  |
| LP3-M2        | 0         | 8.78  | 28.46            | 27.07        | 16.73       | 11.87      | 4.66           | 2.06  |
| LP3-M3        | 0.09      | 8.51  | 25.33            | 28.70        | 18.63       | 11.65      | 4.44           | 2.29  |
| LP3-M4        | 0         | 8.36  | 27.11            | 28.23        | 18.04       | 11.42      | 4.52           | 2.09  |
| LP4-M1        | 0         | 10    | 25.64            | 26.29        | 20.71       | 11.9       | 3.85           | 1.47  |
| LP4-M2        | 0         | 9.42  | 25.46            | 25.81        | 20.38       | 11.92      | 4.21           | 1.9   |
| LP5-M1        | 0         | 7.97  | 29.09            | 30.47        | 17.66       | 9.16       | 3.5            | 2.01  |
| LP5-M2        | 0         | 7.93  | 30.06            | 31.76        | 17.71       | 8.47       | 2.53           | 1.4   |
| LP5-M3        | 0         | 8.07  | 29.89            | 28.73        | 17.66       | 9.9        | 3.55           | 1.72  |
| LP5-M4        | 0         | 11.18 | 31.65            | 27.64        | 15.54       | 8.98       | 3.29           | 1.51  |
| Promedios     | 0.04      | 8.13  | 29.41            | 30.13        | 18.1        | 8.9        | 3.07           | 1.61  |
| Jales finos   |           |       |                  |              |             |            |                |       |
| LP4-M3        | 0         | 1.91  | 1.35             | 1.41         | 5.46        | 42.77      | 30.33          | 16.6  |
| LP4-M4        | 0         | 1.24  | 1.08             | 1.58         | 6.94        | 36.01      | 31.28          | 21.15 |
| Promedios     | 0         | 1.57  | 1.22             | 1.49         | 6.2         | 39.39      | 30.81          | 18.88 |

Tabla 13.- Porcentaje promedio para cada tipo de jales correspondiente a cada clasificación granulométrica.

En las Figuras 31 y 32 aparecen los cambios de pendientes mas notorios y representativos de las secciones, así como su denominación, que en caso de ser una bajada le corresponde una pendiente negativa, para el caso contrario tratándose de una subida la pendiente es positiva. A cada pendiente le corresponde una distancia en particular, dicha distancia no es constante, así que para obtener el promedio de pendientes se aplicó el desarrollo plasmado en el punto V.1.2. Los valores para cada pendiente y longitud correspondiente, así como el del valor promedio final, se pueden observar en la Tabla 14.

Utilizando la información antes mencionada se obtuvieron los siguientes valores para el factor L.S. (Wischmeier y Smith, 1978).

L.S. para jales gruesos = 8

L.S. para jales finos = 3.2



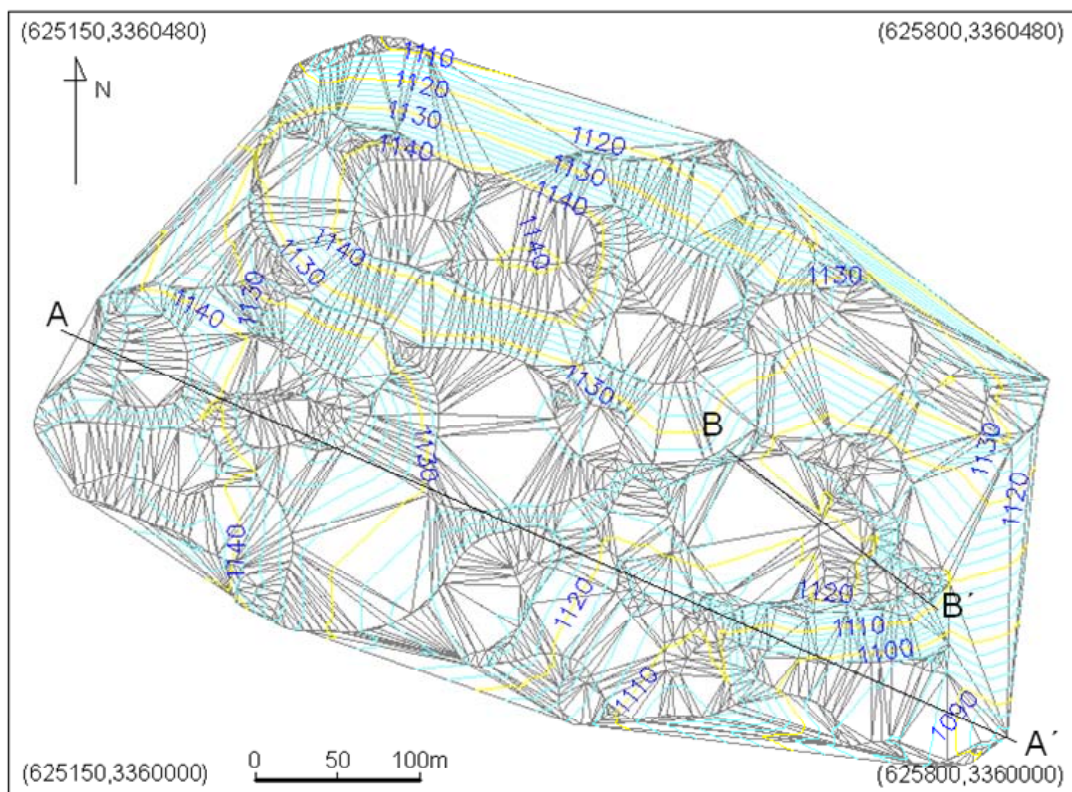


Figura 30.- Representación en vista de planta de las secciones trazadas en el depósito de jales según su clasificación granulométrica.

Los valores del factor de erosividad por precipitación (R) para cada mes, serán los mismos utilizados para suelos naturales, ya que estos no varían (Tabla 7).

En cambio el factor de vegetación (C), si varía, debido a que los jales carecen de cubierta vegetal. Al no existir una clasificación para los valores de C, se aplica el valor de 45 para un suelo desnudo, según Wischmeier (1974).

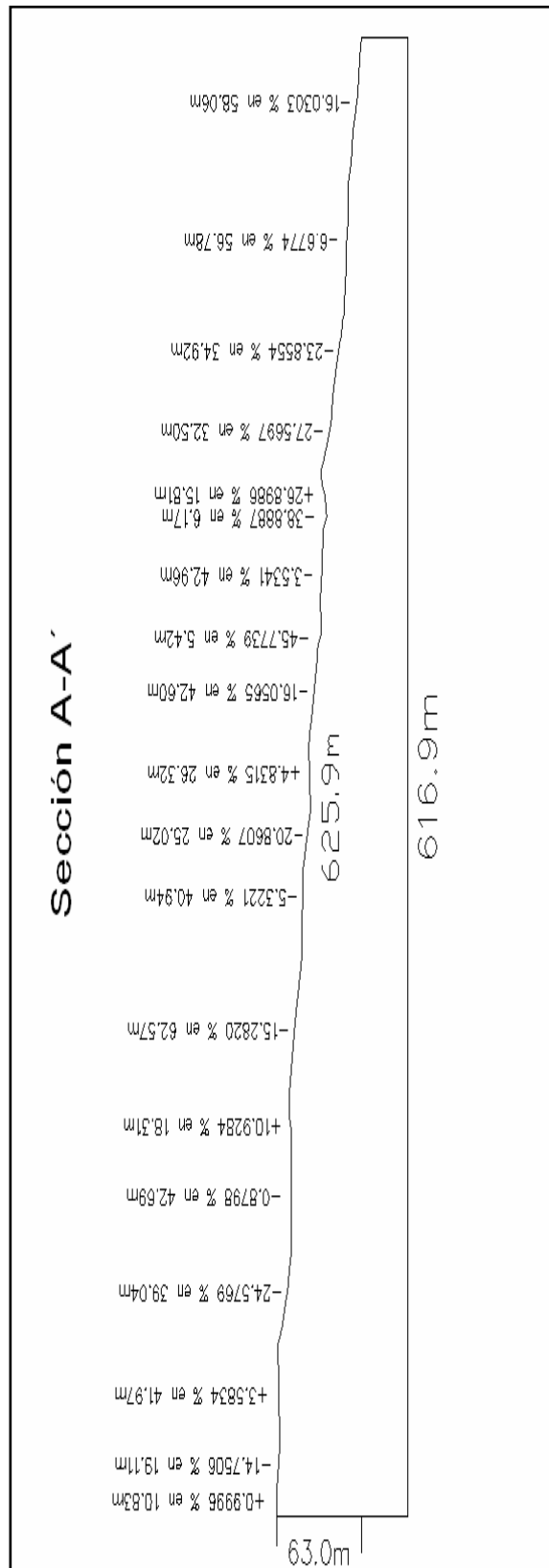


Figura 31.- Sección A-A', mostrando los cambios de pendientes principales a lo largo de la topografía del sitio, donde se encuentran los jales con partículas gruesas.

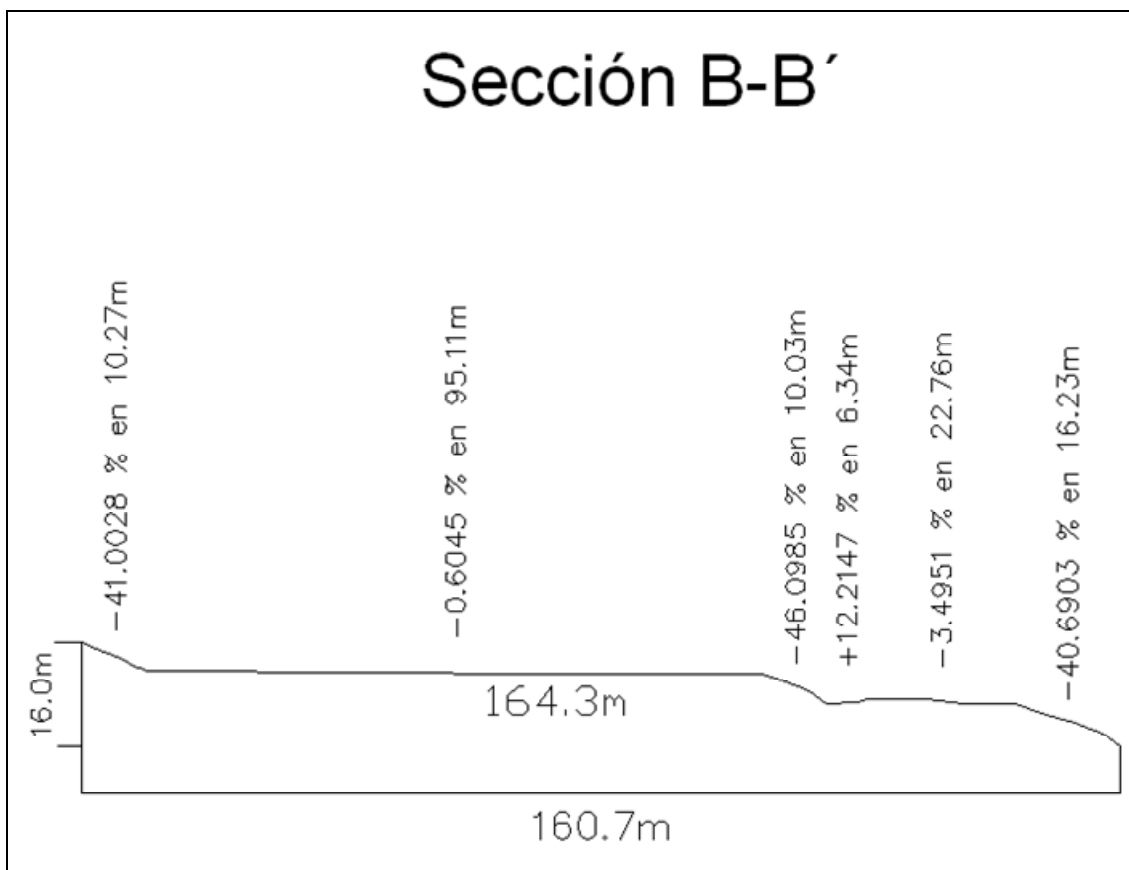


Figura 32.- Sección B-B', mostrando los cambios de pendientes principales a lo largo de la topografía del sitio, donde se encuentran los jales con partículas finas.

Al contar con cada uno de los valores bien definidos, se sustituye en la fórmula de erosión antes utilizada. Donde los resultados de la erosión mensual generados para cada mes del año se muestran en la Tabla 15, así como para cada tipo de jales.

| Sección A-A' |               |              |
|--------------|---------------|--------------|
| Estación     | Pendiente (%) | Longitud (m) |
| 1            | 1             | 10.83        |
| 2            | -14.8         | 19.11        |
| 3            | 3.6           | 41.97        |
| 4            | -24.6         | 39.04        |
| 5            | -0.9          | 42.69        |
| 6            | 10.9          | 18.31        |
| 7            | -15.3         | 62.57        |
| 8            | -5.3          | 40.94        |
| 9            | -20.9         | 25.02        |
| 10           | 4.8           | 26.32        |
| 11           | -16.1         | 42.6         |
| 12           | -45.8         | 5.42         |
| 13           | -3.5          | 42.96        |

Continuación.

|                    |       |       |
|--------------------|-------|-------|
| 14                 | -38.9 | 6.17  |
| 15                 | 26.9  | 15.81 |
| 16                 | -27.6 | 32.5  |
| 17                 | -23.9 | 34.92 |
| 18                 | -6.7  | 56.78 |
| 19                 | -16   | 58.06 |
| Pendiente promedio | -10.3 |       |
| <b>Sección B-B</b> |       |       |
| 1                  | -41   | 10.27 |
| 2                  | -0.6  | 95.11 |
| 3                  | -46.1 | 10.03 |
| 4                  | 12.2  | 6.34  |
| 5                  | -3.5  | 22.76 |
| 6                  | -40.7 | 16.23 |
| Pendiente promedio | -9.97 |       |

Tabla 14.- Pendiente promedio obtenida para cada sección trazada.

| Mes          | Erosión (A) para jales de grano grueso en Ton/ha.mes | Erosión (A) para jales de grano fino en Ton/ha.mes |
|--------------|--|--|
| Enero        | 29.38  | 29.66  |
| Febrero      | 20.74  | 20.94  |
| Marzo        | 10.33  | 10.43  |
| Abril        | 1.78   | 1.8  |
| Mayo         | 1  | 1.01   |
| Junio        | 6.91   | 6.98   |
| Julio        | 233.42   | 235.64   |
| Agosto       | 147.59   | 149  |
| Septiembre   | 47.02  | 47.46  |
| Octubre      | 16.49  | 16.65  |
| Noviembre    | 9.8  | 9.89   |
| Diciembre    | 33.1   | 33.37  |
| <b>Total</b> | <b>557.52</b>  | <b>562.83</b>                                      |

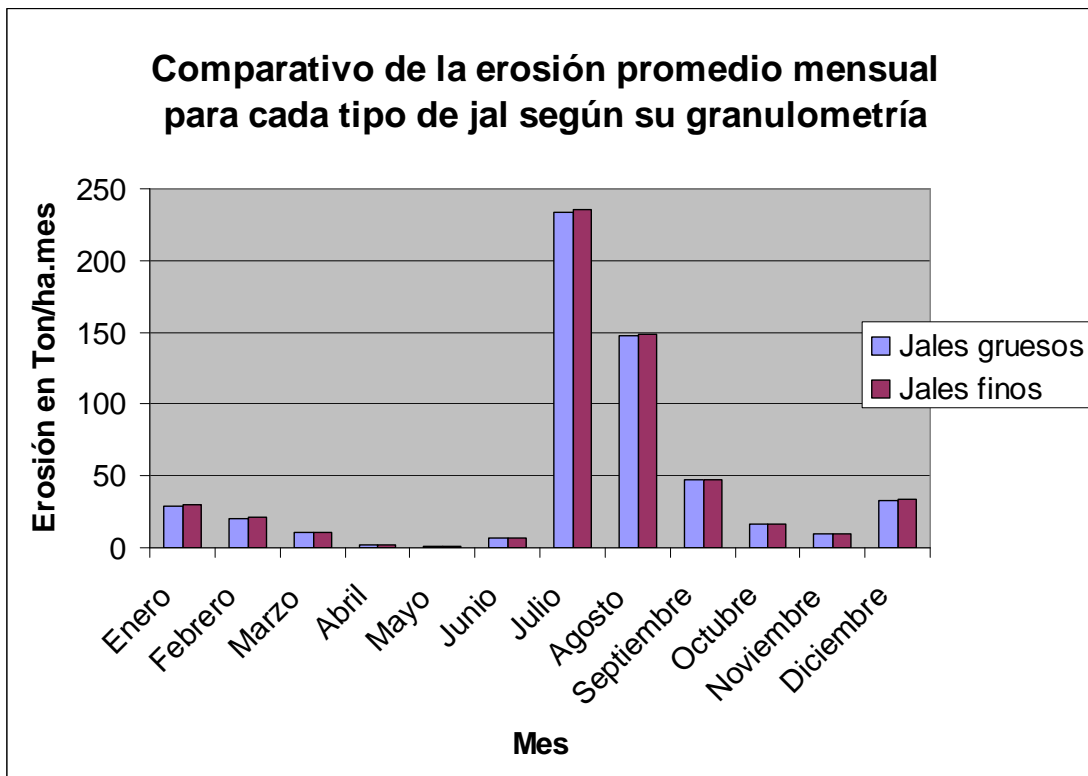
Tabla 15.- Erosión promedio correspondiente a cada mes del año, para cada tipo de jales.

En el gráfico de la Figura 33, se puede observar el notable incremento de la cantidad de jales erosionados en los meses de julio y agosto, que en proporción suman el 68% del total de material erosionado en el año. Haciendo la comparación de erosión estacional registrada tanto en los jales gruesos como en los jales finos (*Figura 34*), lógicamente la estación con mayor erosión de material es el verano, debido a que abarca el período de lluvias o de máxima precipitación de la zona, en cambio la estación donde ocurre la menor

erosión de material es la primavera, donde la proporción de erosión es considerablemente baja comparada con la producida en verano; además la diferencia en las cantidades de erosión en ambos tipos de jales es muy baja (*Tabla 16*).

| Estación  | Jales gruesos | Jales finos |
|-----------|---------------|-------------|
| Primavera | 9.7           | 9.79        |
| Verano    | 428.03        | 432.1       |
| Otoño     | 59.34         | 59.91       |
| Invierno  | 60.45         | 61.03       |

*Tabla 16.- Erosión promedio correspondiente a cada estación del año.*



*Figura 33.- Gráfico comparativo de la erosión promedio mensual para cada tipo de jal según su granulometría.*

El análisis de los resultados en los cálculos de erosión hídrica de los jales con respecto a los resultados obtenidos de los suelos (*Figura 35*), nos indican que la proporción

de las cantidades erosionadas en jales con respecto a los suelos naturales es de aproximadamente 20: 1 a favor de los jales.

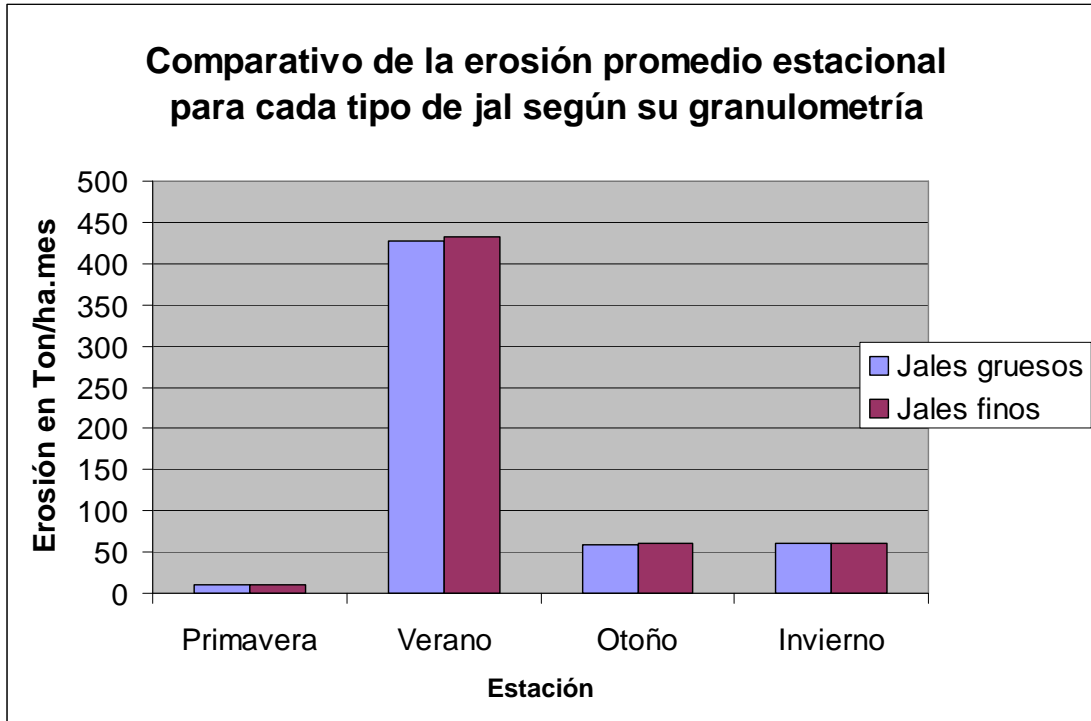


Figura 34.- Gráfico comparativo de erosión promedio estacional registrada para cada tipo de jal según su granulometría.

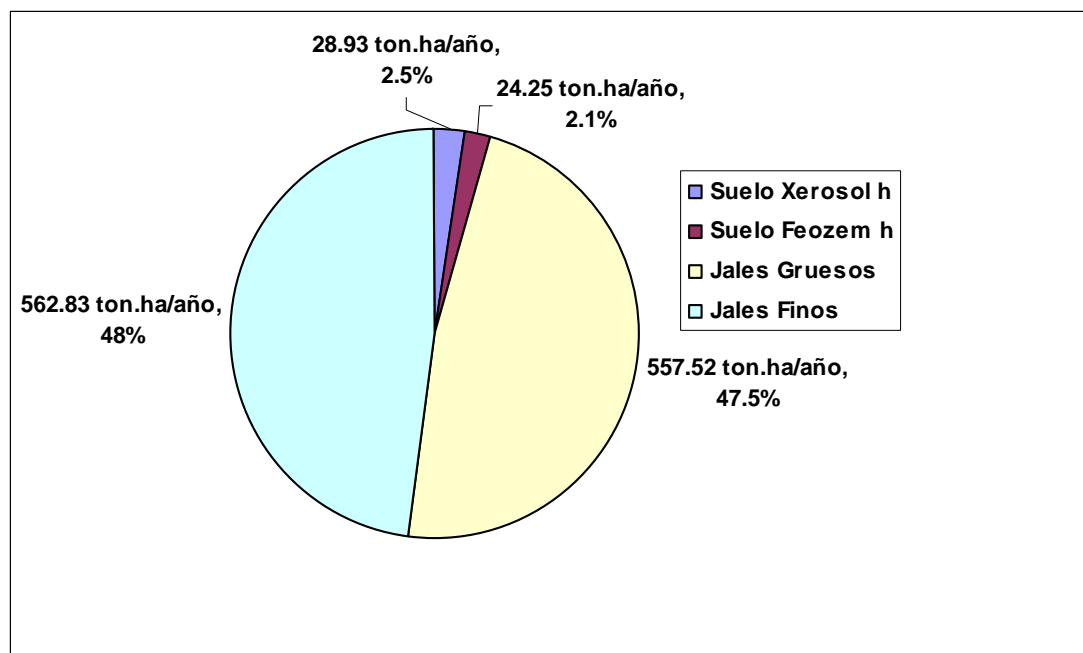


Figura 35.- Porcentajes de cantidades erosionadas correspondientes a suelos y jales del poblado de Nacozari de García.

#### **VI.1.2.5 Estudio de densidad de cárcavas.**

El estudio de densidad de cárcavas se realizó para estimar y contemplar las zonas de mayor erosión práctica y flujo superficial de agua producto de la escorrentía (zonas más erosionadas). Esto con la finalidad de tomar acciones contra la erosión hídrica y con la ayuda de los estudios antes mencionados, se decide dividir el sitio en dos vertientes principales (vertiente norte y vertiente sur), además del sitio en el que se colocarán los canales de desagüe para la redirección del agua captada.

El origen de las cárcavas se produce a causa del fenómeno de la erosión hídrica, que en este caso es totalmente impulsada por el agua producto de las precipitaciones. Aunque no toda el agua escurre, un porcentaje se infiltra. Al comienzo de la lluvia, el agua es infiltrada hasta que la precipitación excede la capacidad de absorción de agua del suelo. En este punto, la superficie se satura y la lluvia que excede la capacidad de infiltración del suelo es asumida como escorrentía.

La escorrentía se comporta diferente en los jales con respecto a los suelos, ya que los jales al no contar con materia orgánica y una cubierta vegetativa, la escorrentía disminuye notablemente incrementándose altamente la infiltración (*Fotografía 12*). Las partículas producto de la molienda de un mismo sistema de beneficio de las minas, produce tamaños de partículas uniformes, cabe mencionar que existen jales de dos sistemas de beneficio diferentes en el sitio, esto hace que existen dos rangos de tamaño de partículas en el área de los jales. En los sedimentos naturales que los tamaños de partículas son variables; aunque los jales y el suelo tienen muy poca diferencia en sus propiedades fisicoquímicas (Mian & Yanful, 2007).

Para conocer las zonas más erosionadas en el sitio de los jales de Nacozari de García, se realizó un cálculo de densidad de cárcavas en el área. Utilizando una imagen del google earth con escala (*Figura 36*), delimitándose el área de las zonas con mayor cantidad de cárcavas (*Tabla 17*). Se calcula el área de cada zona así como la longitud total de cárcavas en cada una de éstas, aquí se aplicó la metodología planteada en el punto V.1.2.



Fotografía 12.- Cárcavas generadas por erosión hídrica a través del agua de escorrentía.

| Cálculo de densidad de cárcavas en los jales de Nacozari de García. |                |                    |                         |                             |  |
|---|----------------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|--|
| Zona  | Longitud en cm | Longitud real en m | Área en cm <sup>2</sup> | Área real en m <sup>2</sup> | Densidad de cárcavas en km/<br>km <sup>2</sup> |
| 1   | 19.67          | 714.41             | 14                      | 18463.76                    | 38   |
| 2   | 8.29           | 301.09             | 3.5                     | 4615.94                     | 65   |
| 3   | 2.38           | 86.44              | 1.25                    | 1648.55                     | 52   |
| 4   | 3.17           | 115.13             | 2.75                    | 3626.81                     | 32   |
| 5   | 7.7            | 279.66             | 4.5                     | 5934.78                     | 47   |
| 6   | 5.2            | 188.86             | 2.7                     | 3560.87                     | 53   |
| 7   | 4.4            | 159.81             | 2.75                    | 3626.81                     | 44   |
| 8   | 0.6            | 21.79              | 0.5                     | 659.42                      | 33   |
| 9   | 2              | 72.64              | 0.75                    | 989.13                      | 73   |
| 10  | 0.7            | 25.42              | 0.3                     | 395.65                      | 64   |
| 11  | 2.95           | 107.14             | 1                       | 1318.84                     | 81   |
| 12  | 10.1           | 366.83             | 6.1                     | 8044.92                     | 46   |
| 13  | 2.25           | 81.72              | 0.75                    | 989.13                      | 83   |
| 14  | 0.4            | 14.53              | 0.25                    | 329.71                      | 44   |
| 15  | 2.15           | 78.09              | 1.9                     | 2505.8                      | 31   |
| 16  | 12.05          | 437.66             | 7.88                    | 10392.46                    | 42   |
| 17  | 6.35           | 230.63             | 3.13                    | 4127.97                     | 56   |
| 18  | 4.65           | 168.89             | 3                       | 3956.52                     | 43   |
| 19  | 10.5           | 381.36             | 7.88                    | 10392.46                    | 37   |
| 20  | 2.9            | 105.33             | 1.6                     | 2110.14                     | 50   |
| 21  | 2.45           | 88.98              | 1.85                    | 2439.85                     | 36   |
| 22  | 8.9            | 323.25             | 6.9                     | 9100                        | 36   |
| 23  | 1.9            | 69.01              | 0.75                    | 989.13                      | 70   |
| 24  | 3.35           | 121.67             | 1.7                     | 2242.03                     | 54   |
| 25  | 1.6            | 58.11              | 1.1                     | 1450.72                     | 40   |
| 26  | 4.45           | 161.62             | 5.67                    | 7477.82                     | 22   |
| 27  | 3.4            | 123.49             | 2.87                    | 3785.07                     | 33   |
| 28  | 3.05           | 110.78             | 3.75                    | 4945.65                     | 22   |

Tabla 17.- Densidad de cárcava que corresponde a cada una de las zonas mostradas en la Figura 36.



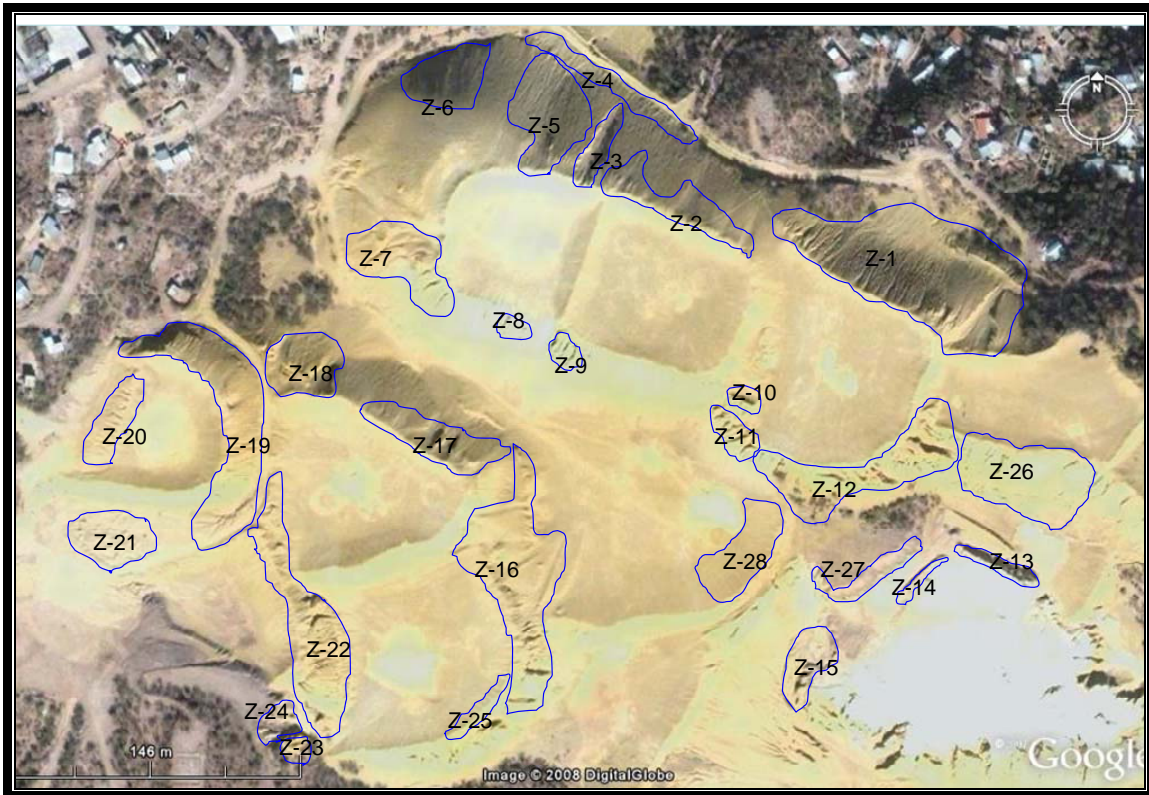


Figura 36.- Zonas de máxima formación de cárcavas.

Donde se obtuvo un área cuya densidad de cárcavas es mayor, corresponde a las zonas 11 y 13 (Z-11 y Z-13), la topografía de los montículos y sus pendientes favorecen las condiciones necesarias para que la mayor cantidad de flujo de escorrentía producto de las precipitaciones en el área norte de los jales, fluya por esas zonas, afectando mas su superficie y produciendo mayor acarreo de partículas.

#### VI.1.2.6 Geoquímica de los jales.

Los trabajos de geoquímica son esenciales para conocer las concentraciones de metales en el sitio de los jales y en las estaciones de posible fuente de suelos naturales de préstamo para llevar a cabo los trabajos de fitorremediación de los jales del poblado Nacozari de García. Los criterios geoquímicos ayudan en el proceso de selección de una familia nativa potencialmente fitoestabilizadora ya que proporcionan información de las condiciones fisicoquímicas en las cuales la planta deberá crecer y desarrollarse.

La Tabla 18, muestra las concentraciones promedios de metales en 73 muestras de jales, 4 de sales eflorescentes (superficie de los jales finos), y 2 de suelos naturales en

distintos puntos (*Figura 37*). Se buscaron dos sitios, uno dentro y otro fuera de la zona urbana, esto para considerar los costos del traslado del material. Lo que se puede observar y es destacable mencionar, es que las concentraciones promedios totales de metales en los jales con granulometría gruesa, no contienen altas concentraciones de metales en comparación con otros sitios de jales en México (Tabla 18, Cananea, Sonora). Sin embargo, las sales que se localizan en parte de la superficie de los jales son fuertemente enriquecidas en metales. Esto es debido a un proceso de acumulación de metales por eflorescencia o transporte capilar hacia la superficie por causa de una elevada tasa de evaporación y la presencia de metales solubles. Este proceso es particular de las zonas áridas y semiáridas y representa la contraparte de la generación del drenaje ácido de mina para climas templados (Dold y Fontboté, 2002). Sin embargo hay muy pocos trabajos publicados al respecto y la legislación mexicana no contempla normas para estos casos.

| Tipo de muestra               | Límite de detección (mg/kg) | Límites permisibles en suelos agrícola/residencial (mg/Kg), NOM-147-SEMARNAT-SSA1 | Jales de Nacozari de García (mg/Kg) | Jales de Cananea, Sonora (Gómez-Álvarez, 2008) (mg/Kg) | Sales eflorescentes (mg/Kg) | SU-1 (mg/Kg) | SU-2 (mg/Kg) |
|-------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------------------|--|-----------------------------|--------------|--------------|
| Número de muestras analizadas |                             |   | 73                                  |  | 4                           | 1            | 1            |
| Ti                            | 400                         | -   | 1508.1                              | -  | 150                         | 3895         | 3209         |
| Cr                            | 45                          | -   | 25                                  |  | 219.3                       | <45          | <45          |
| Mn                            | 80                          | -   | 158.5                               | 136.5  | 31084                       | 1382         | 558          |
| Fe                            | 100                         | -   | 31739                               | 158369.5   | 9298                        | 29350        | 31238        |
| Ni                            | 70                          | 1600  | 69.5                                |  | 204                         | <70          | 55           |
| Cu                            | 50                          | -   | 400.5                               | 4523.6   | 68751                       | 47           | 96           |
| Zn                            | 30                          | -   | 78.8                                | 225.5  | 17858                       | 55           | 125          |
| As                            | 10                          | 22  | 29.3                                |  | 30                          | 11           | 14           |
| Se                            | 9                           | 390   | 5.9                                 | -  | 13.5                        | <9           | <9           |
| Rb                            | 11                          | -   | 298.4                               | -  | 175                         | 57           | 116          |
| Sr                            | 13                          | -   | 68.6                                | -  | 8                           | 593          | 421          |
| Zr                            | 10                          | -   | 49.8                                | -  | 6                           | 12           | 57           |
| Mo                            | 10                          | -   | 58.3                                | -  | 10.8                        | <10          | <10          |
| Ag                            | 75                          | -   | 47.9                                | -  | 321                         | 33           | <75          |
| Ba                            | 240                         | -   | 423.1                               | -  | 1671                        | 429          | 537          |
| Hg                            | 14                          | 23  | 28.1                                | -  | 11                          | 11           | <14          |
| Pb                            | 16                          | 400   | 39                                  | 511.4  | 12                          | 22           | 46           |

Tabla 18.- Concentración promedio de elementos en los jales y en suelos de Nacozari. Todas las concentraciones se expresan en mg/Kg.

Se reporta el contenido de metales en cuatro muestras de sales eflorescentes tomadas de la superficie de la zona sureste de los jales (*Fotografía 13*); esta zona se caracteriza por un medio de depósito hídrico (jales de flotación), mientras que el resto de los jales se caracterizan por un medio de depósito mecánico. Los resultados se reportan en la Tabla 18 y muestran una acumulación significativa de metales, por ejemplo, el cobre, cuyos contenidos



*Fotografía 13.- Análisis de jales y sales eflorescentes utilizando fluorescencia de rayos X (XRF) portátil Innov-XT400.*

totales en los jales es de 400 mg/Kg y se eleva hasta casi 69,000 mg/Kg en la costra de sales superficiales. Los metales que se incrementan son Zn, Mn, Cr y Cu lo que indica que se asocian a sales solubles. La formación de estas sales es dependiente del clima ya que se producen por un fenómeno de evaporación y transporte vía capilar.

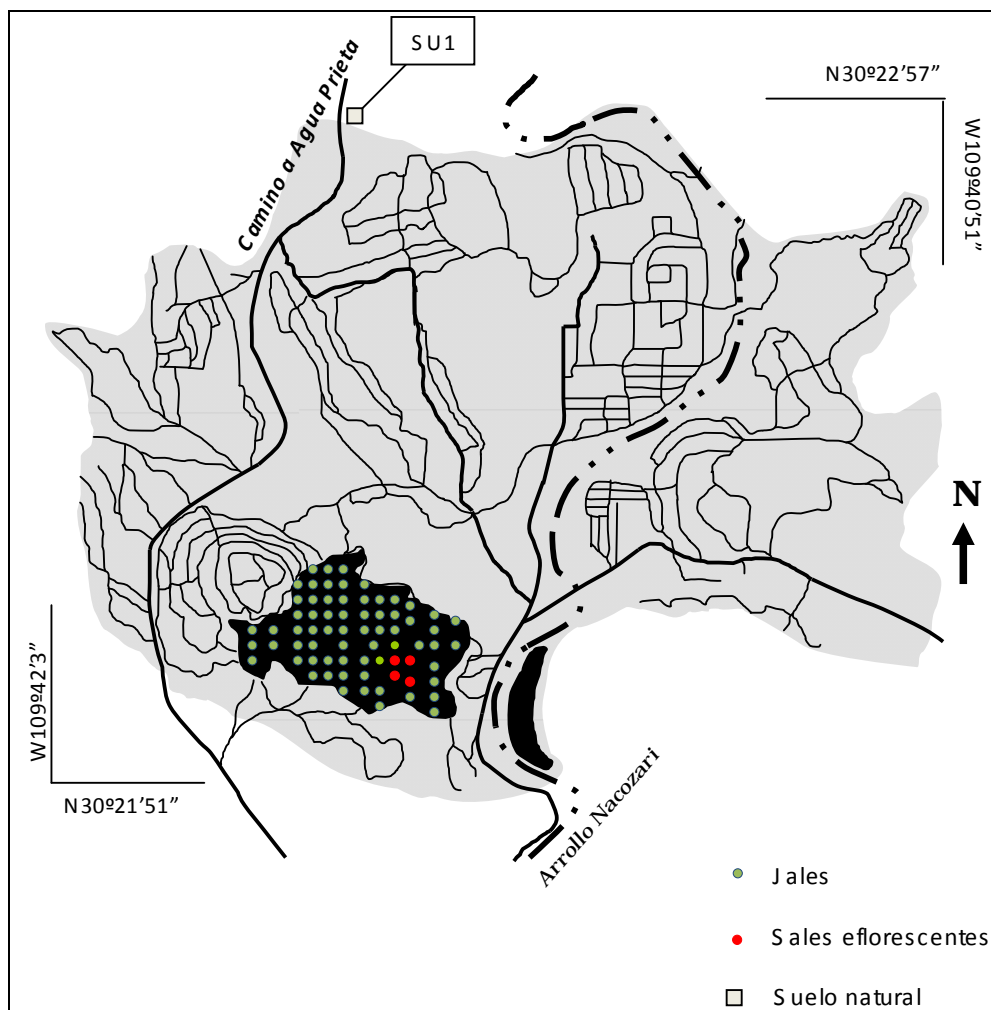


Figura 37.- Localización de los puntos de muestreo en jales, sales y suelos.

Analizando la Tabla 22, observaremos los patrones de comportamiento de elementos traza para los jales; sales eflorescentes y suelos naturales. Las diferencias mas significativas en el comportamiento de las cuatro concentraciones, ocurren con la que representa las cantidades en mg/Kg de elementos en las sales eflorescentes, las concentraciones de elementos como Cu, Zn, Mn y Cr en la columna de sales se encuentran muy por encima de las concentraciones registradas en jales y suelos naturales, ésta anomalía sugiere que los elementos antes mencionados son solubles. Por otra parte, elementos asociados a minerales comunes formadores de roca como el Zr, Ti, Rb y Sr exhiben un comportamiento diferente: Ti, Sr y Zr son mayores en suelos que en jales, ya que se asocian a fases minerales insolubles en las condiciones de los jales y su distribución es en función de la granulometría de los jales.

## **VI.2 Aplicación del análisis de riesgo para el sitio.**

Los cambios en una pendiente existente, pueden crear problemas ambientales asociados con el incremento de erosión y fuerte precipitación. La descarga en las pilas de jales, roca estéril u otros materiales depositados en los depósitos de jales pueden ser tóxicos, formando ácidos o reactivos. La saturación de desechos puede también desencadenar fallas en los taludes ayudada por la infiltración resultante de la incontrolada precolación de agua producto de las precipitaciones; además la estabilidad estructural depende de las características físicas del material desechado, la configuración física de cada desecho, y condiciones del sitio (EPA, 2000).

Según Espí, 2007, existen varios métodos, sistemas de apreciación y sistemas de cálculo del riesgo de las actividades humanas, además de la presencia de los peligros naturales. Muchos de ellos se han desarrollado al amparo de la necesidad de cuantificar los riesgos de operaciones industriales, sobre la calidad de la producción, sobre la determinación del riesgo de accidentes en los sistemas de transporte y la industria.

En el caso del sitio de los jales de Nacozari de García en particular, es interesante la aplicación de un método de análisis de riesgo, ya que algunos taludes son inestables, y presentan síntomas de desplazamiento.

Algunos de los métodos existentes más importantes para la apreciación y el cálculo del riesgo de las actividades humanas son los siguientes:

- a) Preliminary Hazard Analysis (PHA).
- b) Hazard and Operability Study (HAZOP).
- c) Failure Mode Effect and Critically Analysis o Modo de Fallo (FMEA).
- d) Fault Tree Analysis o Árbol de Fallos (FTA).
- e) Even Tree Analysis o Árbol de Sucesos (ETA).

### **VI.2.1 Zona de inestabilidad crítica.**

Las laderas escarpadas o de alta pendiente de suelos permeables con poca o ninguna vegetación favorecen la ocurrencia de avalanchas. En términos generales la susceptibilidad a los deslizamientos corresponde a susceptibilidad a las avalanchas; sin embargo la alta pendiente es un prerrequisito para que los deslizamientos puedan convertirse en avalanchas. El ángulo mínimo requerido para la iniciación de un flujo de residuos es de 25 grados (Suárez, 2001).

En la parte NW de los jales correspondiente al área de la zona de la Vertiente Norte existe un bloque que se está desplazando (*Figura 38*), el cual resulta riesgoso debido a que existen casas habitadas a una distancia demasiado cercana a el bloque en cuestión.

Una de las posibles razones de su aún leve desplazamiento es que existe la probabilidad de haberse formado un plano impermeable producto de la compactación en la zona más baja del montículo debido a la gran columna de peso, ya que es en esta zona donde se encuentra la diferencia de altitud más grande entre la cresta del montículo y la zona de contacto del jal con el suelo siendo de más de 30 metros en su componente vertical comparado con el resto, con estas características en conjunto con la pendiente del orden de los  $50^\circ$  siendo la más inclinada del área (*Fotografía 14*), se reúnen las condiciones propicias para formar un plano impermeable producto de la compactación en la parte baja e interna del montículo, afectado por el agua infiltrada proveniente de las precipitaciones, aunado con la fuerza de gravedad puede desencadenar un desplazamiento producto de un posible plano de deslizamiento con movimiento en dirección a la cara libre del bloque.

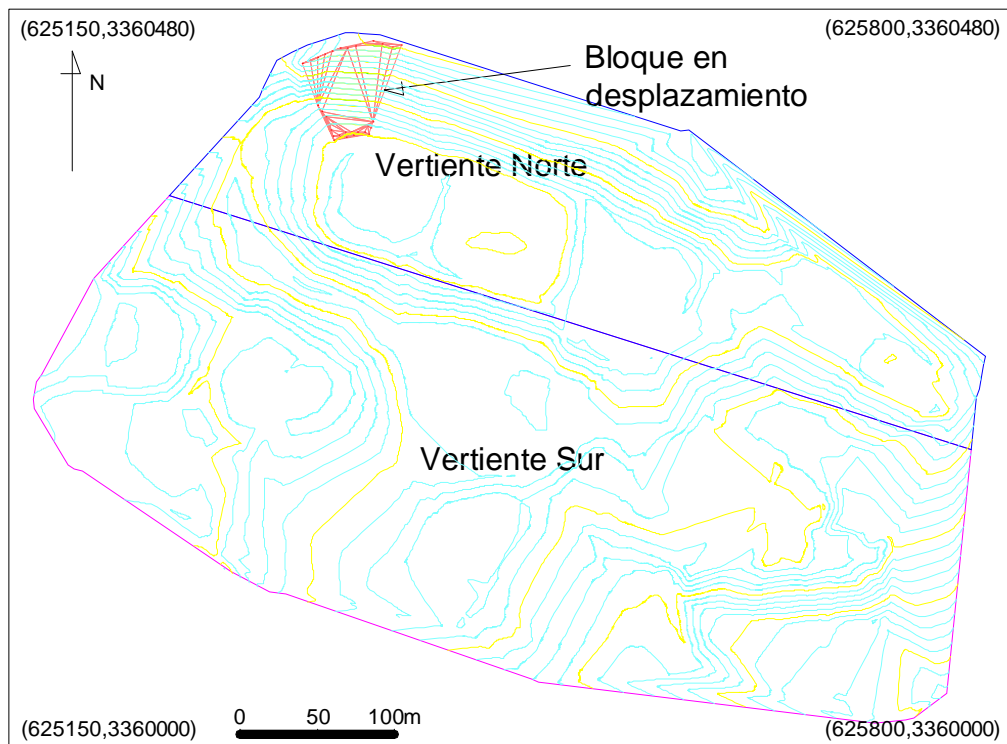


*Fotografía 14.- Alta pendiente del bloque de inestabilidad crítica en el noroeste del sitio de los jales.*

El cálculo del volumen del bloque de inestabilidad crítica se hizo por medio de análisis geométricos, considerando la forma de la base que desglosada da lugar a un par de figuras geométricas (a y b), un rectángulo y una porción de un cono circular (*Figura 39*). El área de la base del rectángulo considerando las dimensiones reales obtenidas del levantamiento topográfico de este bloque. El área del rectángulo es igual a 1,289.7 m<sup>2</sup>.

El volumen de la figura geométrica se calculó utilizando la pendiente igual a 50° (obtenida in situ) y la altura arrojada en el bloque fue de 27m, resultados arrojados por el levantamiento topográfico.

Así el volumen obtenido fue de **17,411m<sup>3</sup>**.



*Figura 38.- Se puede observar el bloque que se está desplazando en la parte noroeste (NW) de la Vertiente Norte.*

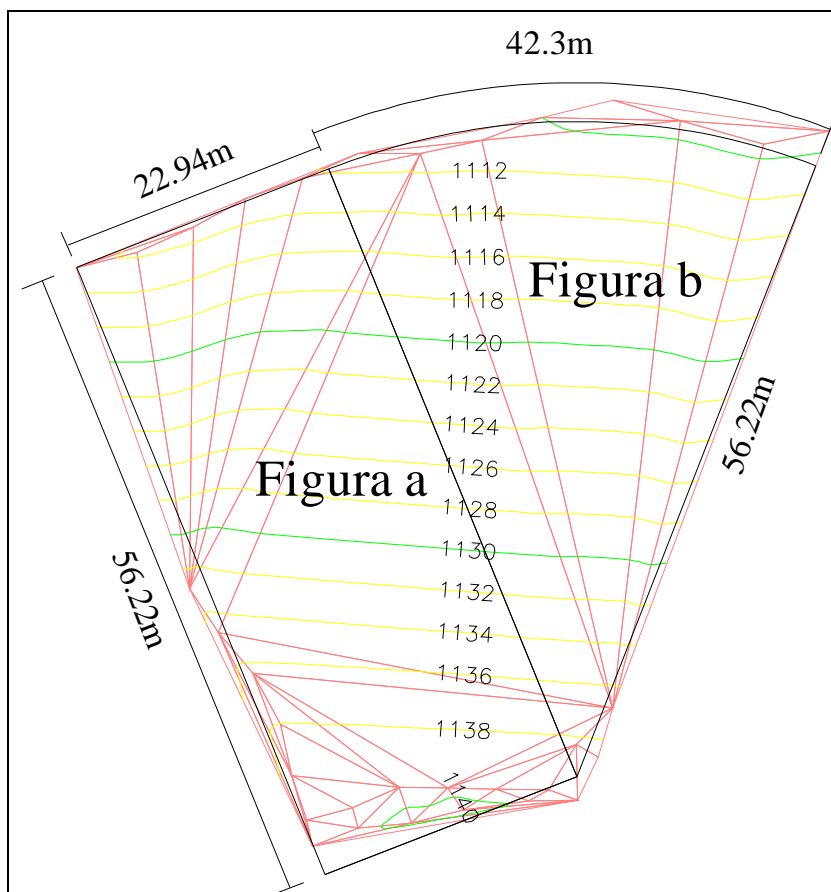


Figura 39.- Figuras geométricas desglosadas a partir de la forma real del bloque de inestabilidad crítica.

La proporción de la base de la fracción del cono respecto a la base del cono completo es igual a la proporción del perímetro del arco de la porción con respecto al perímetro del círculo completo,

Perímetro del círculo completo = 353.2m

Perímetro del arco de la porción = 42.3m

Porcentaje de la porción con respecto al círculo = 11.98 %.

Ahora considerando la altura = 29m para el cono, y que la longitud del radio es igual a la mitad de la longitud mayor del rectángulo, tenemos que:

Volumen de la porción = **2,875m<sup>3</sup>**.

El volumen total del bloque = **20,286m<sup>3</sup>**.

Tonelaje del bloque = **44,629.2 Ton.**

La gran cantidad de material que comprende este bloque aunado a que al pie de éste habitan varias familias, clasifica al sitio como una zona de alto riesgo, ya que cualquier



deslave puede ocasionar pérdidas humanas; además conforme pasa el tiempo la pendiente del bloque se incrementa como se puede observar en la Fotografía 15 donde se puede apreciar el cambio en la superficie de éste a lo largo de un año. Motivos por los cuales se decidió aplicar un análisis de riesgo del sitio de los jales de Nacozari de García, contemplando los aspectos geotécnicos.



*Fotografía 15.- La imagen de la izquierda nos muestra la vista del bloque en el mes de Noviembre del 2007, y la imagen de la derecha fue tomada en Diciembre del 2008, las imágenes muestran un cambio de pendiente significativo en el bloque.*

### **VI.2.2 Aplicación del método Preliminary Hazard Analisis (PHA).**

Al hablar de cualquier estudio de riesgo, resulta una obligación referirse a los conceptos de peligrosidad y riesgo, que se definen a continuación:

**Peligro:** Es la presencia de una circunstancia o condición que puede causar potencialmente pérdidas o daños.

**Riesgo:** Es la combinación de la severidad de las consecuencias y la probabilidad de ocurrencia de los efectos no deseados.

El método Preliminary Hazard Analisis, se ajusta a las necesidades de cada zona en particular, así como a las reglamentaciones en cuanto a lo que se tiene que basar y cubrir en materia de elaboración de análisis de riesgo. En este caso en particular, el método se ajusto a las especificaciones de la NOM-141-SEMARNAT-2003-PRESAS DE JALES en México.

Los objetivos principales de este método son: valoración de seguridad, registro del peligro o riesgo, determinación de aceptabilidad del riesgo, controles críticos/indicadores de rendimiento, información para planes de riesgo, información para guías operacionales, información para planes de mantenimiento, opción/selección, cambio de plan de gestión.

La probabilidad de la ocurrencia de cada resultado indeseado puede imaginarse como un puente entre la severidad y el riesgo. Un resultado con una severidad dada tendrá un mayor riesgo si es más probable, un menor riesgo si resulta menos probable. Cuanto mas frecuente sea un resultado indeseado, mejor será la estimación que puede hacerse de la magnitud de su probabilidad.

Atendiendo a una serie de peligros enlistados en éste trabajo, se organiza una selección de daños elaborándose una aplicación a las condiciones de los jales de Nacozari de García, centrándonos en los aspectos de mayor dimensión. En principio, se construye un inventario de causas y efectos relacionados con los peligros detectados basándonos en la NOM-141-SEMARNAT-2003-PRESAS DE JALES (Espí, 2007) (Tabla 19).

| Peligros  |
|---|
| 1. Incorrecta interpretación de los cimientos                           |
| 2. Materiales de construcción inapropiados                              |
| 3. Lugar de situación inapropiado                                       |
| 4. Balance de aguas incorrecto  |
| 5. Consideración sísmica no apropiada                                   |
| 6. Topografía y densidad de vegetación no favorable                     |
| 7. Composición química del material y condiciones físicas desfavorables |

Tabla 19.- Inventario de peligros que ajustan el método PHA a el sitio de Nacozari de García.

Para continuar, es necesario establecer una referencia de valoración respecto a la importancia de los peligros, midiendo y calificando sus consecuencias. La Tabla 20 se elaboró para calificar los peligros en cuatro categorías, según los costos de los daños tanto personales, de bienes y efectos en el ambiente, en ese orden de importancia respectivamente.

| Categoría de la denominación   | Daños personales                             | Daños a los bienes            | Efectos ambientales  |
|--------------------------------|--|-------------------------------|--|
| I<br>Catastrófica              | Accidente fatal, al menos a una persona      | >9 Millones de dólares        | Daños al medio ambiente de forma permanente, al menos durante 5 años. Se invierte en corregirlo >9 millones de dólares |
| II<br>Crítica o muy importante | Daños personales importantes pero no fatales | 900 mil-9 millones de dólares | Daños al medio con periodo de recuperación entre 1 a 5 años. Se invierte en corregirlo de 900mil-9 millones de dólares |
| III<br>Marginal                | Daños personales leves                       | 90mil-900mil dólares          | Daños al medio con periodo de recuperación cercano al año. Se invierte en corregirlo 90mil-900mil dólares              |

Continuación.

|                            |                             |                |  |
|----------------------------|-----------------------------|----------------|--|
| <b>IV<br/>Despreciable</b> | No existen daños personales | <90mil dólares | Daños al medio con período de recuperación menos del año. Gasto en corregirlo <90mil dólares |
|----------------------------|-----------------------------|----------------|--|

Tabla 20.- Severidad de las consecuencias.

En la Tabla 21 tenemos la probabilidad de ocurrencia de los resultados no deseados registrados, y puesto que el problema planteado resulta muy general, también lo serán las categorías de la probabilidad de suceso, cuya clasificación es en niveles de ocurrencia.

| Nivel | Denominación | Definición  |
|-------|--------------|---|
| A     | Frecuente    | Se ha repetido varias veces en los últimos años y seguramente lo seguirá haciendo |
| B     | Probable     | Se ha detectado en los diques antiguos. Probablemente ocurrirá en alguna ocasión  |
| C     | Ocasional    | No se ha detectado con claridad, pero puede ocurrir                               |
| D     | Remota       | No se ha detectado ni es probable que ocurra                                      |
| E     | Improbable   | Racionalmente no debería ocurrir  |
| F     | Imposible    | No se dan las condiciones físicas para que ocurra, ni remotamente                 |

Tabla 21.- Probabilidad del percance.

Inmediatamente después de que se tiene el valor del peligro tomado del inventario de causas y efectos de la Tabla 22, así como las probabilidades o frecuencia de su ocurrencia de la Tabla 21, donde también aparece especificada la definición de cada nivel y denominación probabilística; el producto de ambas nos dará la magnitud del riesgo incurrido en un valor cualitativo y no cuantitativo. Pero antes, debemos calificar las categorías de los riesgos según las condiciones de sensibilidad del territorio, del grado de adaptación o rechazo de la población involucrada, de la gravedad del suceso, de la magnitud de las consecuencias, etc.

| Peligro   | Causas potenciales                       | Consecuencias   | Posible impacto  | Importancia  | Nivel | Evento |
|---|--|---|------------------|--------------|-------|--------|
| <b>Incorrecta interpretación de los cimientos</b> | Baja calidad soportante de los cimientos | Problemas en la estabilidad de los montículos y su base | Rotura del talud | Catastrófica | C     | (1)    |

Continuación.

|   |   |  |   |                |   |     |
|---|---|--|---|----------------|---|-----|
| <b>Materiales de construcción inapropiados</b>                              | Baja calidad geotécnica de los materiales                       | Problema de estabilidad de los taludes de los montículos                     | Rotura de taludes de los montículos y desplazamientos                 | Muy importante | C | (2) |
| <b>Lugar de situación inapropiado</b>                                       | Investigación inadecuada  | Problemas de estabilidad de los taludes y erosión, desplazamiento de bloques | Rotura de los taludes, deslizamiento de bloques                       | Catastrófica   | B | (3) |
| <b>Balace de aguas incorrecto</b>   | Hidrología incorrecta   | Problemas de estabilidad de los taludes y erosión                            | Deslaves y rotura de taludes y la base                                | Marginal       | D | (4) |
| <b>Consideración sísmica no apropiada</b>                                   | Ignorancia de las cargas sísmicas                               | Problema de estabilidad de los taludes                                       | Rotura de los taludes   | Catastrófica   | D | (5) |
| <b>Topografía y densidad de vegetación no favorable</b>                     | Falta de pantallas naturales contraviento                       | Problemas de erosión eólica  | Dispersión de partículas de los jales sobre un gran área poblada      | Marginal       | A | (6) |
| <b>Composición química del material y condiciones físicas desfavorables</b> | Bajo pH, condiciones de alta humedad, altos niveles de sulfuros | Generación de drenaje ácido  | Incorporación de aguas ácidas a la red hidrológica natural de la zona | Muy importante | E | (7) |

Tabla 26.- Peligros de diseño y operación del depósito de jales de Nacozari de García.

Esta calificación suele ir acompañada del comportamiento o velocidad ante la respuesta, según la importancia del suceso. En nuestro caso se han determinado tres categorías (Tabla 23), pero ordinariamente puede haber muchas más.

| Severidad de las consecuencias | PROBABILIDAD                              |              |          |             |            |             |
|--------------------------------|---|--------------|----------|-------------|------------|-------------|
|                                | F Imposible                               | E Improbable | D Remota | C Ocasional | B Probable | A Frecuente |
| I Catastrófica                 |   |              | (5)      | (1)         | (3)        |             |
| II Crítica o muy importante    |   | (7)          |          | (2)         |            |             |
| III Marginal                   |   |              | (4)      |             |            | (6)         |
| IV Despreciable                |   |              |          |             |            |             |
| 1                              | Acción obligatoria para reducir el riesgo |              |          |             |            |             |
| 2                              | Operación con vigilancia constante        |              |          |             |            |             |
| 3                              | Operación admisible sin reparos graves    |              |          |             |            |             |

Tabla 23.- Tipo de acción que se debe aplicar según la distribución espacial de los posibles peligros.

La acción obligatoria para reducir el riesgo aplica para la incorrecta interpretación de los cimientos y el lugar de situación inapropiado, según la Tabla 23, siendo este último el más importante. En cuanto a los materiales de construcción inapropiados, consideración sísmica no apropiada y topografía y densidad de vegetación no favorable, es suficiente con la operación con vigilancia constante, al resto le corresponde una operación admisible sin reparos graves.

### **VI.3 Diseño Geotécnico.**

Un diseño aplicado a la restauración o recuperación de un sitio, es independiente de cada lugar; según las condiciones particulares y específicas de cada zona se debe de realizar ajustes y adaptaciones (Conesa et al., 2007) de forma que cumpla con todos los requerimientos demandados por el lugar.

Un aspecto muy importante a tomar en cuenta es el aspecto social, sobre todo si se quiere restaurar sitios inmersos en áreas urbanas, como es el caso de los jales de Nacozari, que por las características del lugar y la demanda de comunidad se contempló una restauración del sitio con orientación a uso recreativo. En la Figura 40 se muestra el plan director con zonificación de usos en el área de los jales, proporcionándonos una idea clara y bastante general de la división y función de las distintas áreas de los jales con miras a su pronta restauración.

Para el caso de Nacozari de García el diseño contempla los resultados obtenidos de los aspectos geotécnicos, de erosión hídrica, geoquímicas, topografía y datos climatológicos realizados anteriormente. Considerando cada uno de los aspectos anteriores, sobre todo el hidrológico y topográfico y sin dejar a un lado la orientación del tipo de restauración, se decide dividir en términos de estabilidad física, el sitio en dos zonas: Vertiente Norte y Vertiente Sur.

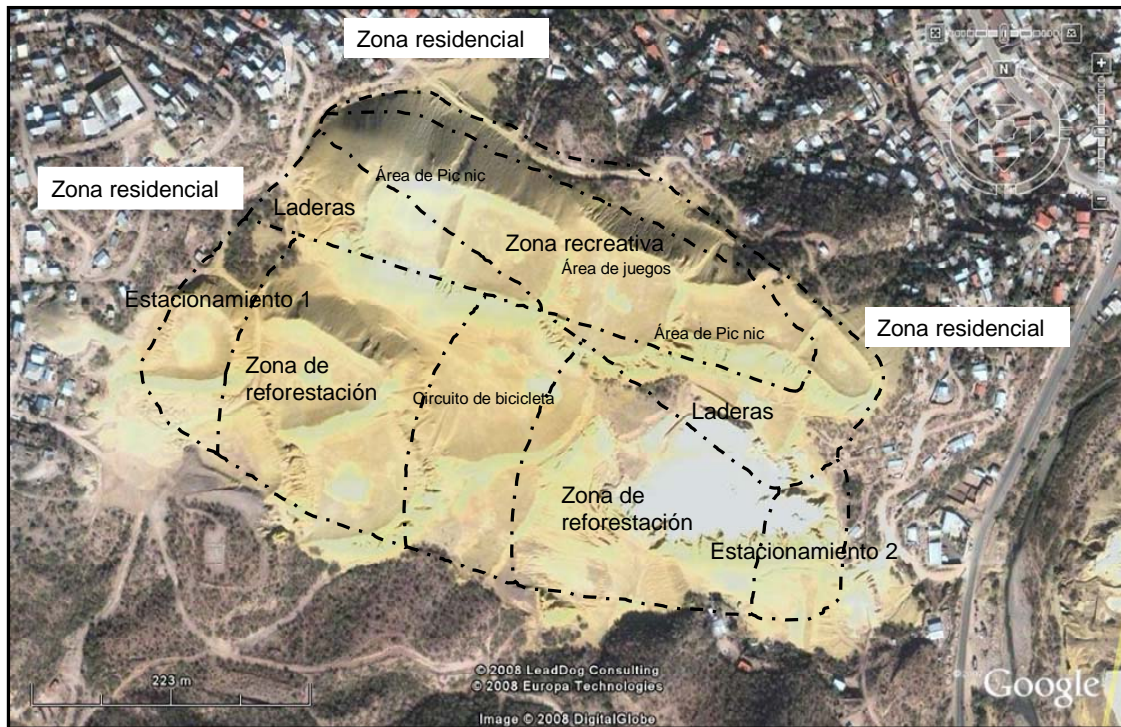


Figura 40.- Plan director con zonificación de usos.

### VI.3.1 Vertiente Norte:

El área de la Vertiente Norte es de  $62,023.2\text{m}^2$ , y se pensó en un sistema de terrazas partiendo de los 1136m de altura en la parte E y va disminuyendo conforme se aproxima al extremo W hasta llegar a los 1118m. con una diferencia de elevación de 2m entre terrazas, mas adelante se darán mas detalles.

El sentido de la disminución de alturas se hizo de E-W por tres razones:

- 1) Existen unos cerros en la parte E sobre los cuales puede descansar el peso de los jales y así darles estabilidad.
- 2) En el extremo occidente de la Vertiente Norte existe un drenaje natural principal por donde se pueden dirigir los  $7,721\text{m}^3$  de agua (considerando la precipitación máxima registrada en un día) que se acumula en toda la vertiente por medio de colectores hacia ese punto.
- 3) En la parte NW de los jales existe un bloque que se esta desplazando (*Figura 38*). Este bloque tiene un volumen aproximado de  $20,286\text{m}^3$ , que son 44,629.2 Toneladas, y una diferencia de elevación entre pata y cresta de entre 28 y 30m, además de una pendiente aproximada de  $50^\circ$ . La intención del diseño es reducir esta

diferencia de elevación hasta un promedio de 5m con el propósito de darle más estabilidad al talud y que la carga se reduzca.

### **VI.3.2 Vertiente Sur:**

Es la Vertiente que cubre una mayor área y es de  $124,916.6\text{m}^2$ , al contrario de la Vertiente Norte en ésta la disminución de altura va de W-E; existen dos razones que justifican esta propuesta además de la estética paisajística que proporciona.

- 1) La topografía natural del sitio tiene una pendiente en declive en la dirección W-E, esto provoca que el drenaje natural principal se localice en la parte SE que es por donde se hará el desagüe del agua captada que es de  $21,461\text{m}^3$  y canalizada a ese punto.
- 2) Se sigue la dirección de la topografía natural para evitar taludes demasiado altos ya que entre mayor sea la altura y la pendiente menor es la estabilidad; de esta forma aseguras taludes pequeños, con una pendiente menor y se disminuye el índice de desplazamientos.

El desarrollo del diseño fue dividido en tres partes para facilitar su comprensión, la secuencia inicia con el diseño de las terrazas, diseño de los canales de desagüe, movimiento o remoción de tierras y cálculo del área real del sitio posterior al diseño, a continuación se desarrollan cada uno de estos puntos.

### **VI.3.3 Diseño de Terrazas y taludes centrales.**

Para coleccionar el agua de una manera más uniforme y que causara el menor índice de erosión posible se optó por diseñar un sistema de terrazas, con esto se suaviza la pendiente y se evita que el agua producto de la escorrentía erosione mas fuerte los taludes.

El número de terrazas así como el ancho de las mismas estará en función de la longitud y de la diferencia de elevaciones en los extremos de cada vertiente.

Para que las terrazas tengan la capacidad de coleccionar  $428\text{m}^3$  de agua en la vertiente norte y  $491\text{m}^3$  en la vertiente sur, estas deberán tener un pendiente de 1.5% a partir del pie de banco hasta donde termina (*Figura 41*), con una pendiente de la cara de banco de 5:2 (sin incluir la corrección en la diferencia de elevación), además las terrazas tendrán forma de

arco abriendo con dirección a la bajada (*Figura 42*), con esto se pretende manipular la dirección del flujo del agua hacia el pie de banco donde fluirán a unos canales de desagüe localizados en las orillas de cada vertiente (mas adelante se darán detalles de los canales). Para que se pueda llevar a cabo esta dirección del flujo del agua acumulada al pie de banco hacia los canales, toda la superficie de ambas vertientes tendrá un pendiente de 3% con orientación de S-N.

#### Vertiente Norte.

Para el diseño de las terrazas en la Vertiente Norte se asignarán las cotas de 1136m en el extremo E y 1118m en el extremo W tomando como referencia un eje trazado sobre la parte plana del diseño (sin incluir taludes) de ambas vertientes, teniendo una diferencia de elevación de 18m y una longitud de dicho eje de 485.2m, el número de terrazas y el ancho de cada una viene dado de la siguiente forma:

No. de terrazas = 10 terrazas.

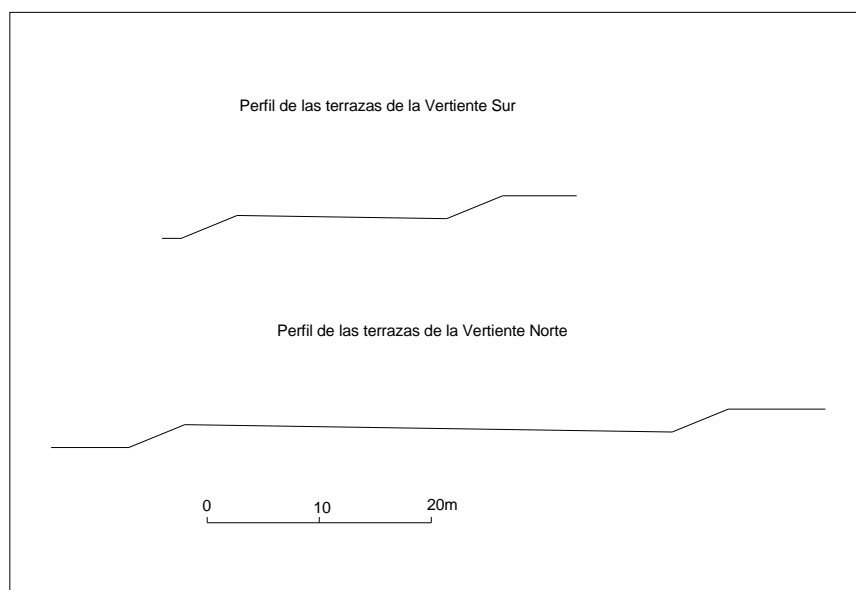
Ancho de terraza en vista de planta = 43.52m,

Ahora solo hay que hacer una corrección entre la diferencia de elevación de ambos extremos debido a el 1.5% de pendiente que tienen las terrazas, es decir, a la altura de banco se le sumará 1.5% de pendiente como se muestra en la *Figura 43*.

La corrección en cada desnivel es = 0.65m

La altura de la cara de banco será = 2.65m.

La primer y última terraza no se corregirá por causas en la irregularidad de su forma.



*Figura 41.- Perfiles de las terrazas en la Vertiente Norte y la Vertiente sur.*



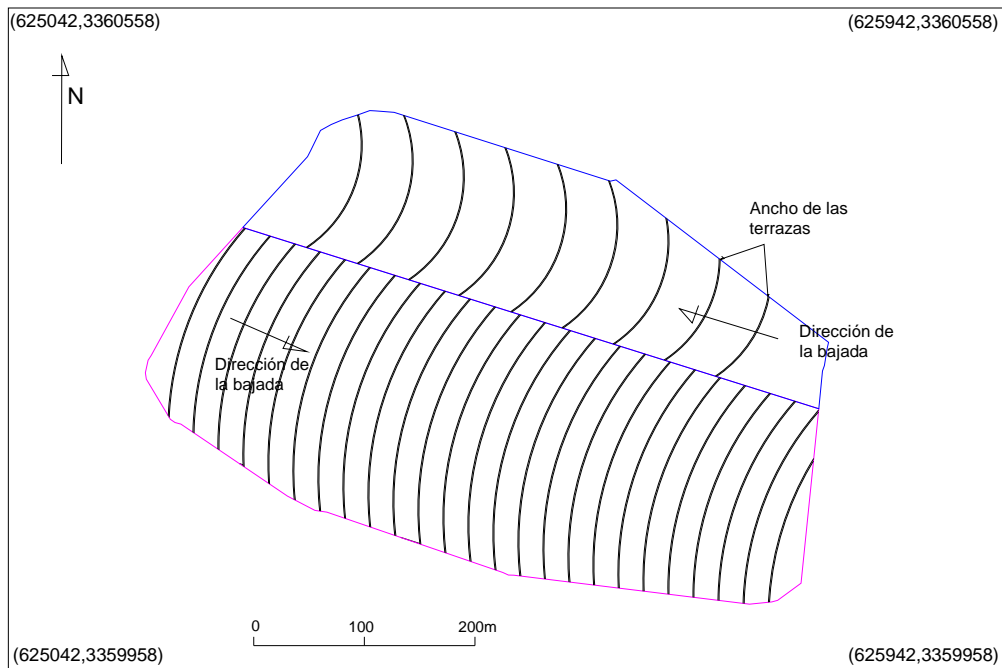


Figura 42.- Forma y dirección de los arcos de las terrazas.

### Perfil de las terrazas



Figura 43.- Altura real del banco.

#### Vertiente Sur.

Para el diseño de las terrazas en la Vertiente Sur se asignarán las cotas de 1152m en el extremo W y 1102m en el extremo E tomando como referencia el eje mas largo de la vertiente sur, teniendo una diferencia de elevación de 50m y una longitud de dicho eje de 592.72m, el número de terrazas y la longitud de cada una como se realizó en la vertiente anterior viene dado de la siguiente forma:

No. de terrazas = 26 terrazas,

Debido a lo irregular de la forma del área de la Vertiente Sur para efectos de la longitud de terrazas, la longitud total se dividirá entre 25 y no entre 26 para efectos de estética, ya que si se divide entre 26 las terrazas de los extremos quedarán más anchas e irregulares en su forma.

Ancho de terraza = 23.71m,

Pero como la longitud del banco en su componente en x = 5m debido a que la pendiente es 5:2, tenemos,

Ancho de terraza real = 18.71m,

Ahora solo hay que hacer la corrección entre la diferencia de elevación influenciada por la pendiente del 1.5% que tienen las terrazas, nos queda = 0.28m

La primera y última terraza no llevan la inclinación del 1.5% de pendiente, ya que tienen una forma irregular:

Siendo así la altura del banco es 2.28m.

#### Taludes centrales.

Existe un desnivel entre ambas vertientes donde solo coinciden en un punto en cuanto a la elevación se refiere. Este desnivel será dividido y suavizado por medio de taludes con una pendiente de 3:1, dando como resultado tres taludes:

- a) Talud 1: Nacerá en el extremo oeste y en el límite de ambas vertientes, su falda cubre parte de la Vertiente Norte, cuando el desnivel cuando la Vertiente Norte tiene una menor elevación que la Vertiente Sur (*Figura 44*),

Si la pendiente tiene que ser 3:1, y la diferencia de elevación en el extremo W de las vertientes es  $1152 - 1118 = 34\text{m}$ , entonces la componente horizontal viene dado por  $(34\text{m}) (3) = 102\text{m}$ ,

Para el cálculo del volumen retomaremos la fórmula de una pirámide triangular,

$$V = (\text{Área de la base}) (\text{altura})/3,$$

Sustituyendo tenemos:

$$V = 140,875.94\text{m}^3.$$

- b) Talud 2: Esta nace a partir del punto donde ambas pendientes poseen la misma altitud, a partir de este punto se prolonga hacia el oeste, su falda se encuentra sobre la Vertiente

Sur y cubre el desnivel cuando la Vertiente Norte tiene mayor altitud que la Vertiente Sur (*Figura 44*),

Aquí la diferencia de elevación esta a favor de la Vertiente Norte y es de  $1136 - 1108 = 28\text{m}$ , teniendo en su componente horizontal una distancia de  $(28\text{m}) (3) = 84\text{m}$ .

Así pues para el cálculo del volumen será el mismo procedimiento que se empleo en el Talud 1,

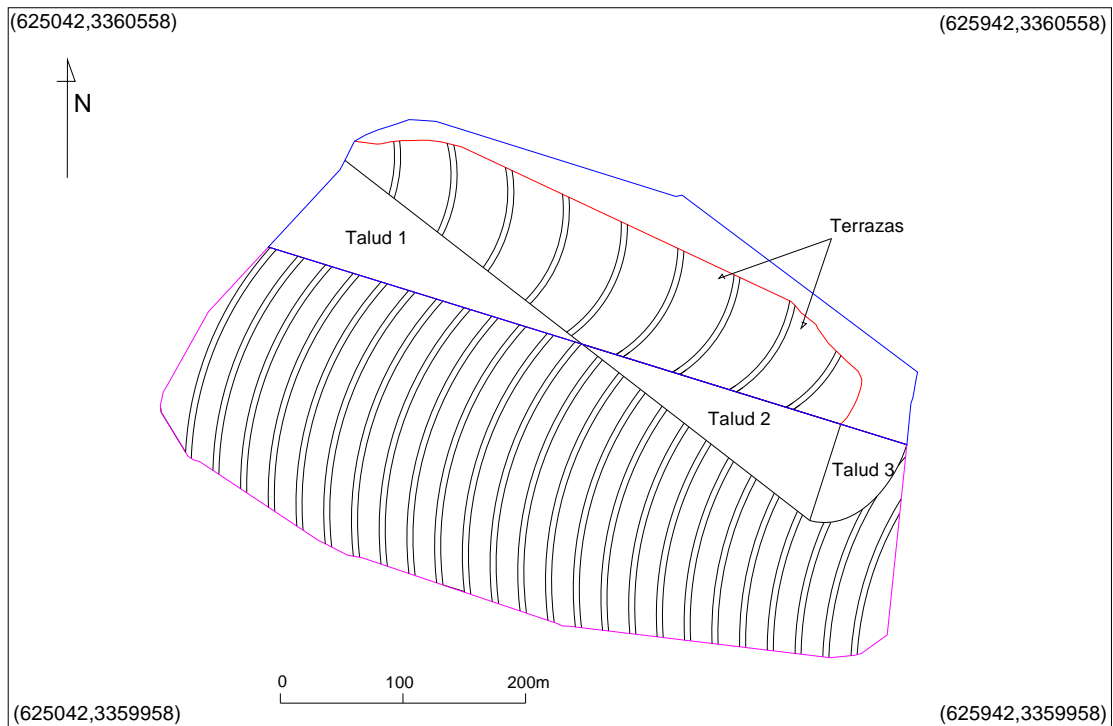
$$V = 86,965.2\text{m}^3.$$

- c) Talud 3: Este talud comunica el Talud 2 con el talud de la orilla del jal en su parte este, se encuentra dentro de la Vertiente Sur igual que el Talud 2 y tiene la forma de un cuarto de elipse en vista de planta (*Figura 44*),

$$\text{Volumen} = 29,804.16\text{m}^3$$

A la cantidad resultante se le tiene que sumar los volúmenes que genera el espacio de las terrazas 24 y 25,

$$\text{Volumen total del Talud 3} = 36,834.34\text{m}^3.$$



*Figura 44.- Muestra los 3 Taludes centrales además de las terrazas en vista de planta.*

### VI.3.4 Diseño de canales de desagüe.

Cualquier tipo de diseño destinado a una obra civil debe de incluir un buen sistema de drenaje y en el caso de este diseño en particular no puede ser la excepción, ya que está poblado a su alrededor.

Utilizando una imagen que nos represente la altimetría original del terreno se puede prever la dirección del flujo de escorrentía (Tamás & Kobács, 2003). Esta información ayuda al diseño de canales para la redirección del agua (Figura 18).

Debido a que en el diseño se contempla una suave bajada con pendiente del 3% con dirección N-S, esto provocará que el agua acumulada fluya intencionalmente rumbo al sur, con el fin de colocar dos canales de desagüe, uno en cada extremo sur de la periferia de las vertientes como se muestra en la Figura 45, a continuación se explicaran detalles de los diseños de canales de desagüe para cada vertiente.

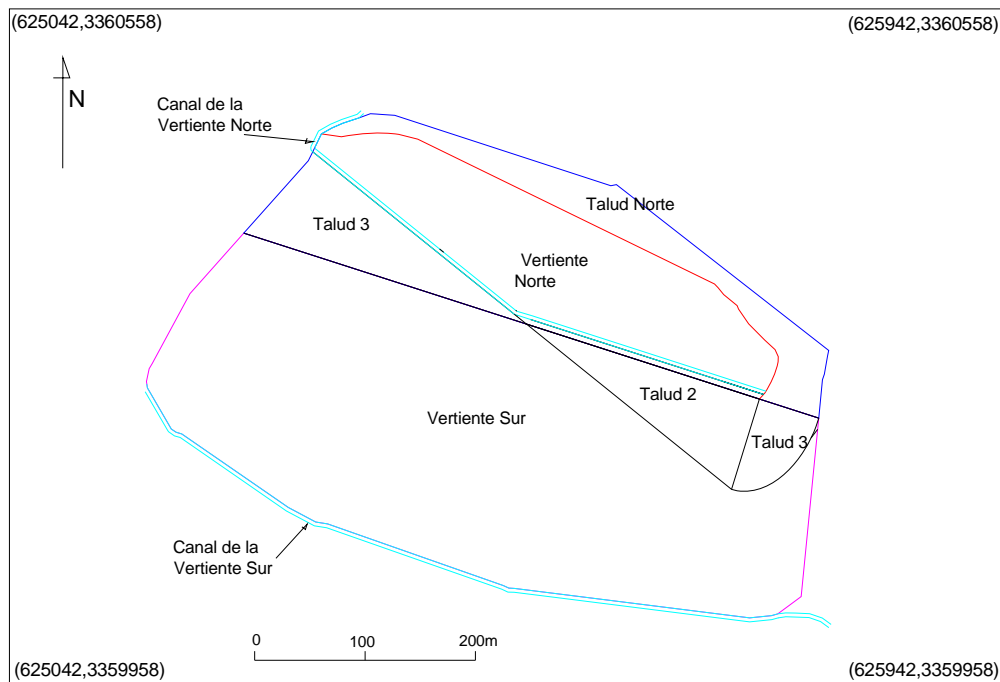


Figura 45.- Vista de planta que nos muestra la ubicación de los canales en ambas vertientes.

#### Canal en la Vertiente Norte:

Esta vertiente colinda con el talud 1 y el talud 2. El canal de desagüe nace en el extremo E de la vertiente. La cima del talud 2 nace en el extremo S de la vertiente Norte y para evitar infiltración hacia la cara del talud del agua que circule por el canal se colocará a

una distancia de 5m al N de la orilla de la vertiente, es decir, a 5m de la línea donde nace el talud 2, (Figura 46). En cuanto al talud 1 se refiere, no es necesario dejar un margen de longitud para evitar infiltración debido a que el talud aumenta su elevación de N-S, por lo tanto, el canal se puede colocar justo al pie del talud y así el agua captada por este será colectada por el canal, (Figura 47).

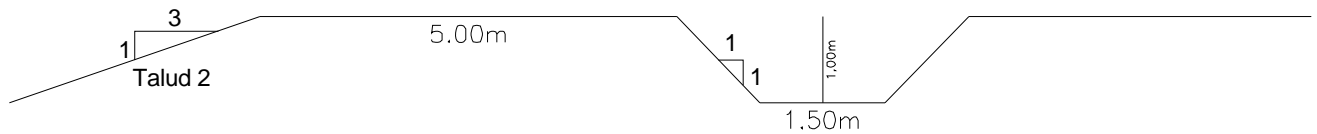


Figura 46.- Sección transversal del canal de desagüe en la Vertiente Norte, tramo en el cual el canal se encuentra en la cima del Talud 2.

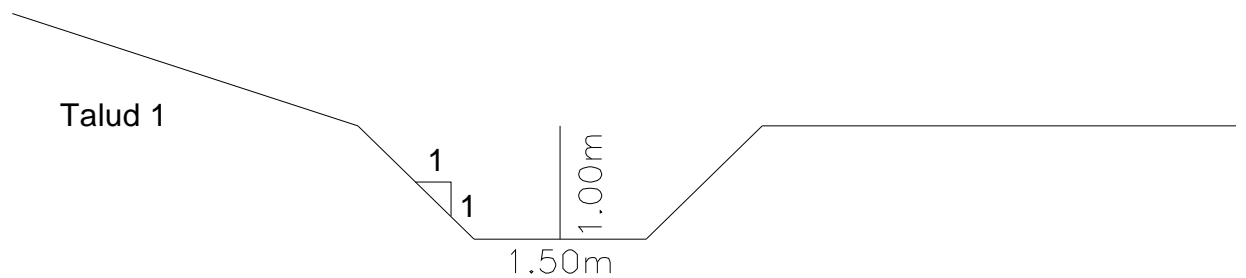


Figura 47.- Sección transversal del canal de desagüe en la Vertiente Norte, tramo en el cual el canal se encuentra al pie del Talud 1.

Las dimensiones del canal serán 1m de profundidad en el punto de inicio, aunque esta variará conforme avance la terraza afectada por una pendiente del 3%, para volver a coincidir en el inicio de la siguiente terraza después del desnivel entre las mismas (Figura 48), 1.5m de ancho de la base y con unas paredes laterales con una pendiente 1:1, y para darle un factor de seguridad se considerará una infiltración nula. El canal está dividido en dos tramos, al variar el sentido del perfil rumbo a donde se incrementa la elevación, empiezan a variar también los anchos de las terrazas en el perfil.

Se contempla colocar una capa de piedra en el fondo para combatir la erosión de partículas por consecuencia del agua. Las dimensiones del canal se realizaron contemplando la máxima precipitación registrada en la zona durante 1 día que fue el 13 de Julio de 1996, durante los últimos 63 años, cuando a lo largo de las 24 horas se tuvo una precipitación de 93 mm. La intención del cálculo es estimar el caudal para el diseño de canales de desagüe y

considerar escenarios extremos para proteger a la comunidad de una inundación o entrada de agua a las casas asentadas en los alrededores de los jales.

Para justificar las dimensiones de la sección transversal de los canales, es necesario calcular el caudal o descarga de agua máxima. Retomando la fórmula de manning, se calculará la velocidad a la cual el agua se desplazará dentro de los canales.

$$V = 4.65m/s$$

Para determinar la capacidad máxima de descarga del canal, se calcula el caudal resultando:

$$Q = 11.63m^3/s$$

Al conocer que el volumen total de agua captada en la cuenca de los jales es de:

$$Volumen = 29,288.2m^3.$$

El tiempo de descarga del volumen total de agua considerando un caudal constante y a la máxima capacidad de un solo canal es de:

$$Tiempo de descarga = 42min$$

Considerando que son dos canales y el caudal es constante e igual para ambos canales, el tiempo de descarga para cada canal es de:

Tiempo de descarga en el canal de la vertiente norte = 11min.

Tiempo de descarga en el canal de la vertiente sur = 31min.

El resultado anterior nos indica que aún si los 93mm hubieran sido producto de una sola lluvia de forma constante sin considerar las 24 horas del día, la capacidad de un solo canal es suficiente para evacuar el total de agua en solo 42 minutos.

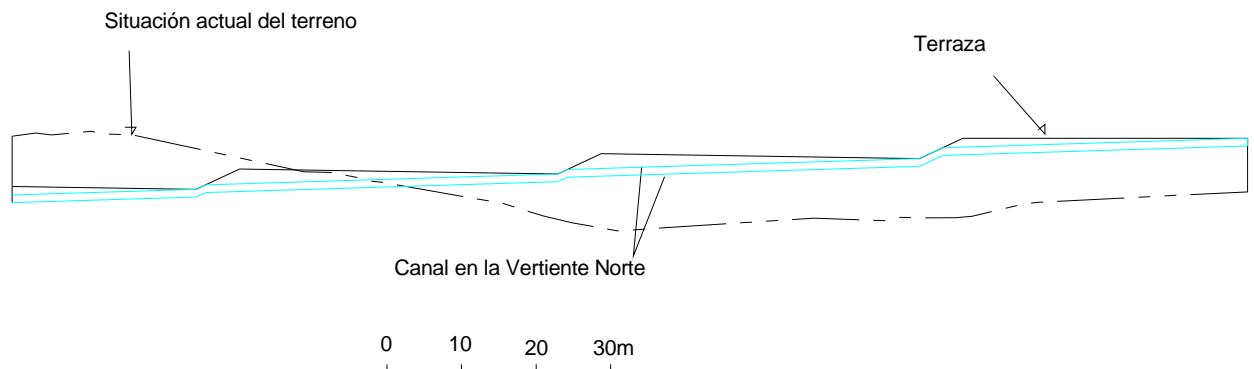


Figura 48.- Sección longitudinal del canal de desagüe en la Vertiente Norte.

### Canal en la Vertiente Sur:

En esta zona, el canal se construirá al igual que en la vertiente anterior en el extremo sur debido a la tendencia de dirección del agua como producto de la orientación de la pendiente inducida en el diseño. (Figura 45).

Para fines de la distancia que tendrá el canal se trazara un perfil especial que nos representa la longitud a partir en el cual nace el canal, hasta el punto donde termina considerando las mismas dimensiones que el canal de desagüe de la Vertiente Norte. Así sobre este perfil se trazará también el perfil deseado en el diseño así como el perfil del canal y el comportamiento en sus pendientes. Hay que mencionar que el rango de pendiente optima para un canal es de 3-4.5%, por eso caso en se tendrán que colocar bajadas especiales con pendiente semejante a las caras de banco, siendo paralelas a éstas, (Figura 49), y el resto tendrá una pendiente de 3%.

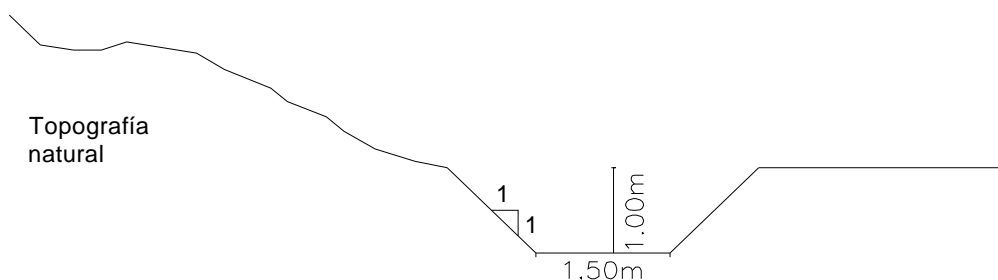


Figura 49.- Sección transversal del canal de desagüe en la Vertiente Sur.

El comportamiento de ambos canales en su avance es el mismo que el de las terrazas, como se sabe las terrazas tienen bajadas con pendiente del orden 5:2.28m y 5:2.65m, lo ideal sería que los canales de desagüe llevaran una pendiente continua dentro

del rango 3-4.5%, de no ser así es necesario construir éstas bajadas como las mostradas en los perfiles de ambos canales de desagüe de las vertientes.

De esta forma se puede observar la vista de planta la propuesta de diseño casi terminada en la Figura 50.

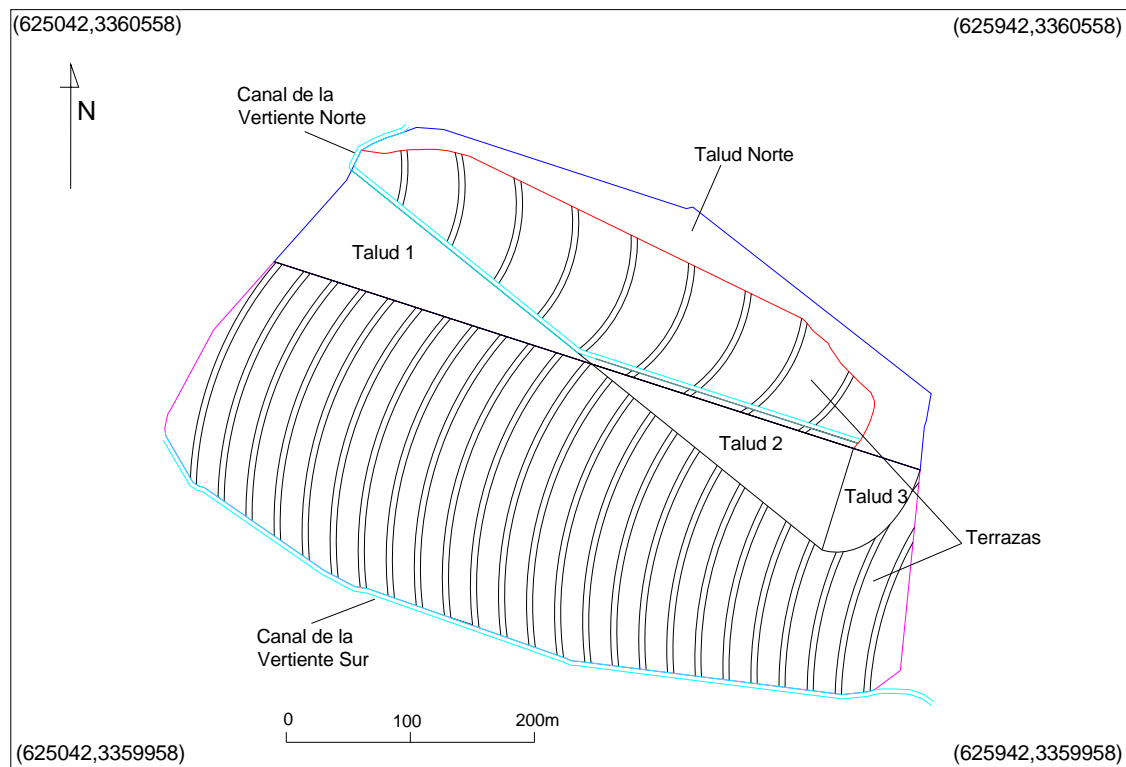


Figura 50.- Vista de planta de la propuesta de diseño.

### VI.3.5 Movimiento de Tierras.

Una parte fundamental para que se lleve a cabo el diseño, consiste en el movimiento de tierras, ya que el diseño se ajustará en gran medida a los resultados arrojados por éste paso.

Existen varias formas de trabajar este paso, para fines de este trabajo se eligió trabajar con perfiles del relieve redibujando digitalmente el perfil deseado en el diseño, y calculando con la ayuda del accesorio CivilCAD del software AutoCAD el área entre perfiles.

Primeramente se dibujaron varias poli líneas que después se convertirán en nuestros perfiles longitudinales del sitio sobre el cual se hará el diseño, las poli líneas atraviesan los



jales de en dirección W-E, y están creadas paralelamente entre ellas con una separación uniforme de 5m desde la orilla N hasta la orilla S. Con la función crear perfiles del accesorio CivilCAD, se convertirán las poli líneas en perfiles exactos del relieve.

El número de perfiles creados para la Vertiente Sur es de 46, siendo el eje divisorio entre ambas vertientes el perfil número 1 y con un orden secuencial que va desde la orilla N hasta la orilla S (*Figura 51*), y para la Vertiente Norte se trazaron 26 perfiles considerando el eje divisorio entre ambas vertientes como el número 1 posteriormente el resto en orden secuencial que va desde el 47 hasta el 71 con dirección S-N.

El siguiente paso es dibujar sobre el perfil representado el perfil deseado en el diseño, considerando el ancho de terrazas y elevación de estos perfiles (*Figura 52*), esto con el propósito de calcular el área(S) entre perfiles que a su vez será multiplicada por la longitud de influencia de éste perfil que para nuestros fines son 5m, donde resultará el volumen que nos representa este perfil; antes tenemos que mencionar que el área(S) obtenida cuando el perfil del diseño está por encima del perfil del terreno se consideró área negativa y el área(S) obtenida cuando el perfil del diseño está por debajo del área del terreno, dicha área la consideraremos positiva, así la suma de las áreas positivas y negativas de un mismo perfil multiplicado por 5m(longitud de influencia de cada perfil) nos dará el volumen a remover. En caso de que el volumen sea negativo nos dice que existe un faltante para rellenar en ese sitio, y en caso contrario de ser positivo nos señala que sobra volumen que podrá ser empleado en otra zona.

Este trabajo se hará para cada uno de los 71 perfiles obtenidos de la zona en cuestión, con esto podremos deducir que la sumatoria de los volúmenes obtenidos de cada perfil debe tender a cero. Cuando esto no ocurre y la sumatoria final sea un número muy grande se tendrá que subir los 71 perfiles deseados en el diseño en el caso que sea que la sumatoria sea negativa y en el caso que ésta resulte positiva se bajarán todo los perfiles exactamente la misma distancia hasta lograr esta tendencia.

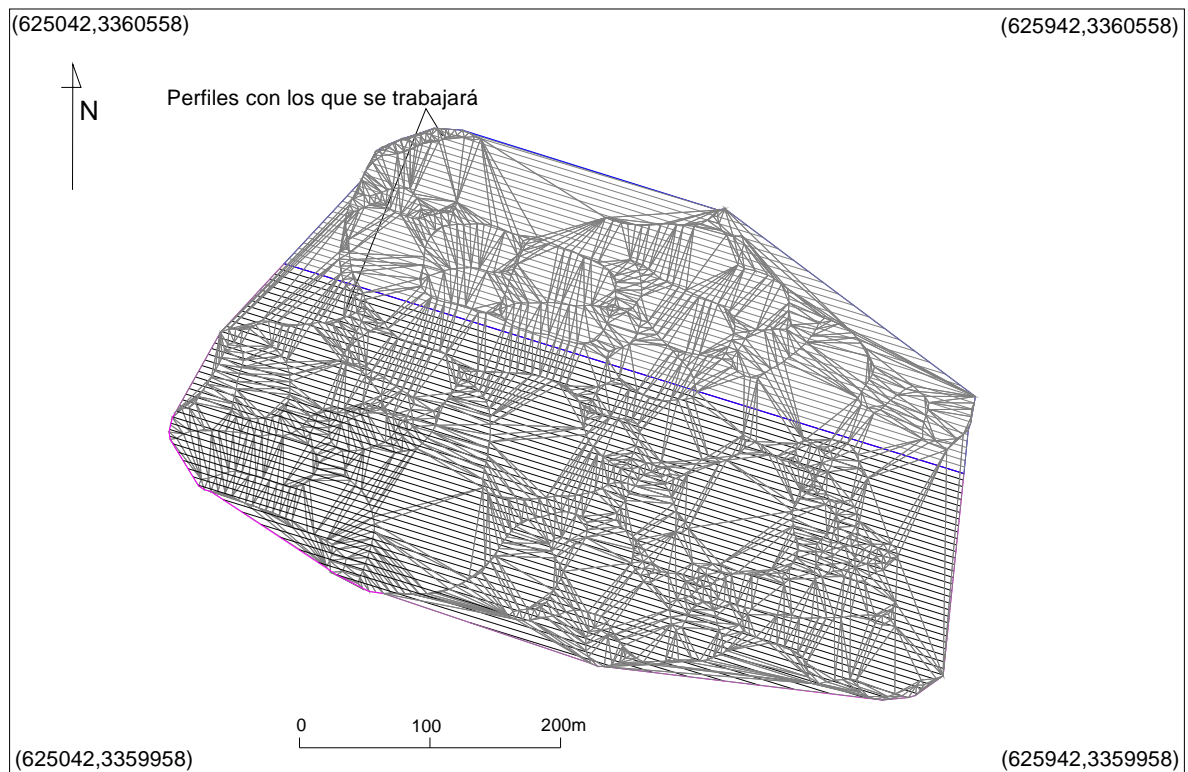


Figura 51.- Las líneas paralelas en esta vista de planta nos representan los perfiles con los que se trabajará para realizar el cálculo del movimiento de tierras.

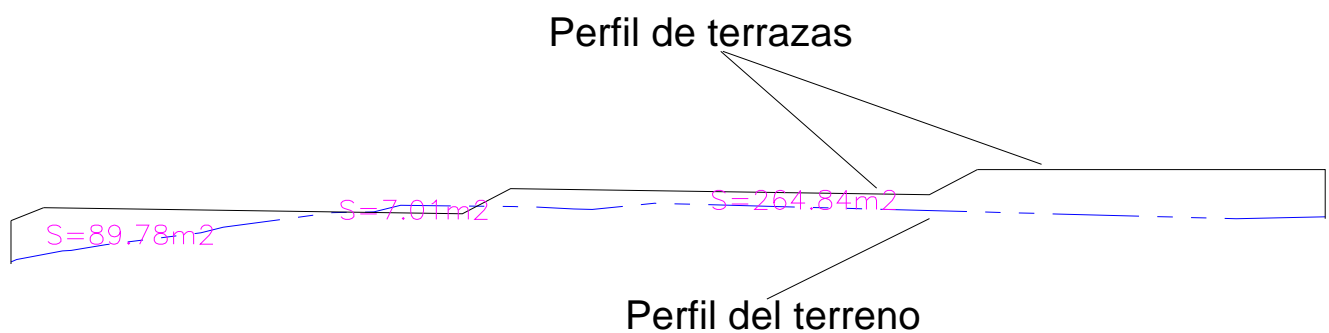


Figura 52.- Se puede observar el perfil número 69 de entre los 71 realizados, en él podemos apreciar el área (S), entre ambos perfiles.

Volumen sobrante =  $56,769.2\text{m}^3$ .

Al considerar el volumen que se removerá en cada Vertiente para fines del cálculo de la maquinaria se considerará solo la suma de los volúmenes positivos obtenido de los perfiles.

### Cálculo del volumen a extraer de los canales de desagüe.

Para el cálculo del volumen extraído de los canales de desagüe, se contemplará como una figura tridimensional, donde las bases tienen forma de trapecio para cada terraza, ya que en el perfil el ancho de las terrazas varía, el volumen también lo hará.

Este volumen puede ser reutilizado para incrementar el Talud Norte, para disminuir su pendiente y darle así más estabilidad.

Para el caso del volumen generado en los desniveles se aplicara el mismo procedimiento solo que el valor de L será constante,  $L = 5\text{m}$  que es la componente horizontal del desnivel y nos representa la altura de la pirámide truncada generada.

Los resultados del volumen para cada tramo de los canales ya habiendo sustituido en la fórmula.

Por lo tanto el volumen sobrante es de **62,806.7m<sup>3</sup>**.

NOTA: En la suma de los volúmenes va incluido el volumen que se empleará en los taludes centrales como volumen negativo y el volumen extraído de los canales de desagüe como volumen positivo.

En caso de que la sumatoria final tienda a cero pero nos de un numero negativo, nos dice que faltará poco volumen para terminar el diseño en el cual se podría emplear material de préstamo, caso contrario si la sumatoria resultante tiende a cero pero el número es positivo nos dice que tendremos un sobrante el cual se puede emplear en los taludes de la periferia para disminuir la pendiente y darle todavía aún mas estabilidad.

### **VI.3.6 Cálculo del área real.**

El cálculo del área real del sitio posterior al diseño, se realiza pensando en algunas posibles opciones a soluciones en los trabajos a futuro, como podrían ser la necesidad de conocer el volumen de suelo de préstamo necesario como base para la cubierta vegetal o bien que cantidad en metros cuadrados de geomembrana se requiere para cubrir los desechos (en caso de utilizarla).

Para obtener el área, la empezaremos calculando por partes; primero obtendremos el área de las terrazas y cara de bancos, partiendo del área en vista de planta que nos proporciona el software AutoCAD.

En la vista de planta se observan las terrazas y la cara de los bancos, se calcula el área considerando el 3% de pendiente, siguiendo el cálculo considerando el 1.5% de pendiente solo en terrazas y finalmente el área considerando la pendiente de la cara de banco.

$$\text{Área real} = 202,025.7\text{m}^2$$

### **VI.3.7 Orientación del diseño a un uso recreativo.**

El uso recreativo puede ser el único aconsejable en zonas localizadas dentro de una ciudad. Las posibilidades recreativas son compatibles con las condiciones locales, zonas adyacentes y al mismo tiempo que existe una demanda de usuarios. El depósito de jales dentro de Nacozari de García, constantemente es usado por los pobladores como mirador, campo de béisbol, zona de juego y paseo con cuatrimotos a lo largo del sitio, y exponiéndose a un riesgo inminente generado por la inestabilidad de los montículos debido a las pendientes tan pronunciadas, además de la falta de consolidación de la estructura de los jales. Es imposible la prohibición de la entrada a las personas, por eso la solución mas viable es la recuperación del sitio orientado a un uso recreativo, reduciendo así el riesgo al máximo, y proporcionarle a la comunidad un lugar seguro y agradable para pasar el tiempo.

Para tener una idea mas detallada en cuanto a la orientación del sitio, se desarrolla el diseño conceptual que es similar al plan director, pero proporciona datos mucho mas minuciosos sobre los tipos de medios previstos para cada uso en especial (*Figura 53*). Podemos observar la decisión de reducción de terrazas para dar lugar a un par de estacionamientos localizados justo donde se encuentran los accesos al sitio, además, se creó una gran terraza justo al medio de la Vertiente Sur, con el propósito de crear un circuito para bicicletas.

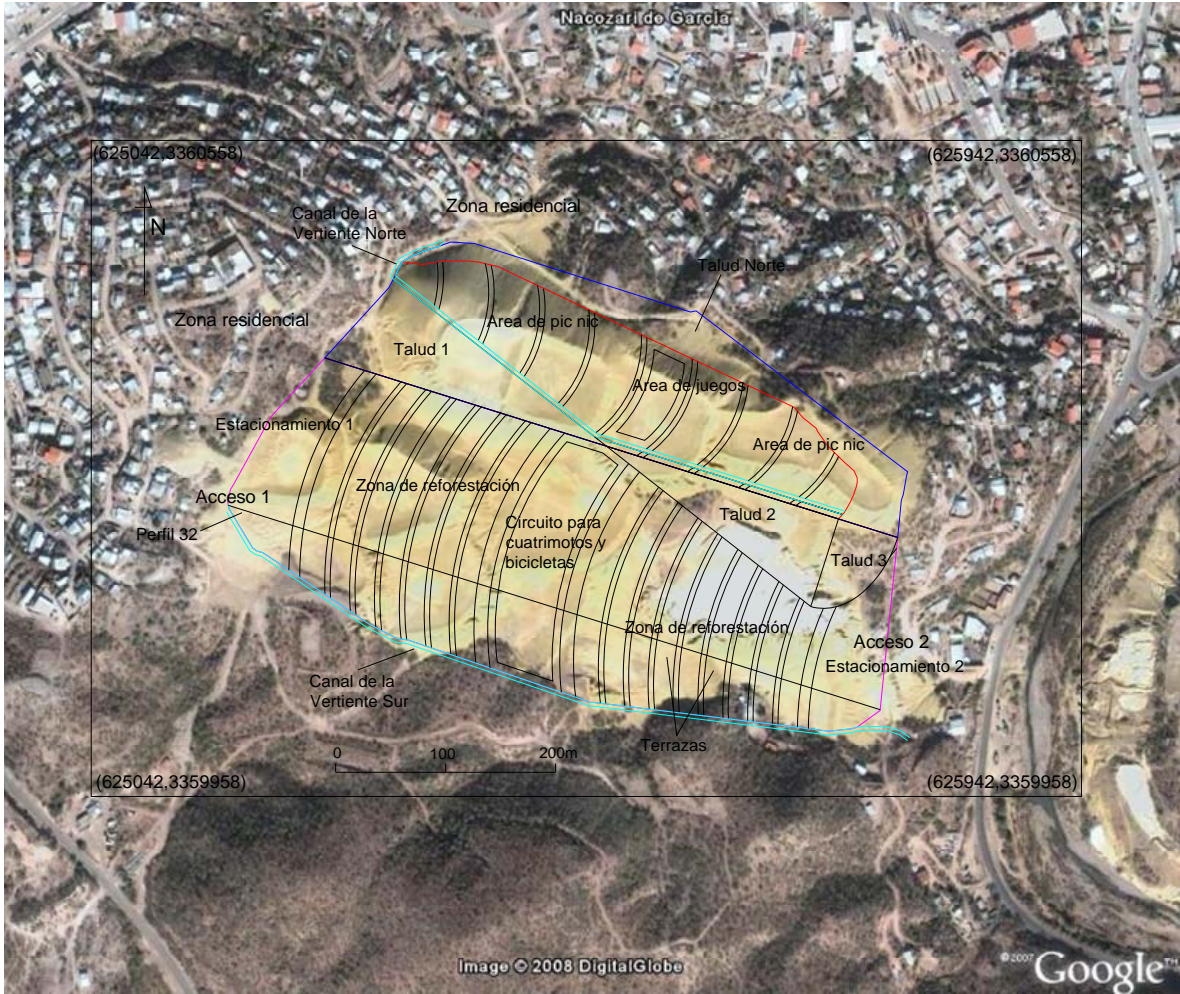


Figura 53.- Diseño conceptual de recuperación con uso recreativo en el depósito de jales en el poblado de Nacoziari de García.

Las dimensiones de la terraza donde estará el circuito para bicicletas será de 11,570 m<sup>2</sup>; además para el estacionamiento 1 será de 9,447 m<sup>2</sup> y se ubicará al W y 7,626 m<sup>2</sup> para el estacionamiento 2 que estará ubicado al SE, como se puede observar en el diseño detallado de la Figura 54. La zona de la Vertiente Norte será orientada a pequeñas áreas de pic nic, agregando un área de juegos para niños en la terraza central con un área de 4,025 m<sup>2</sup>.

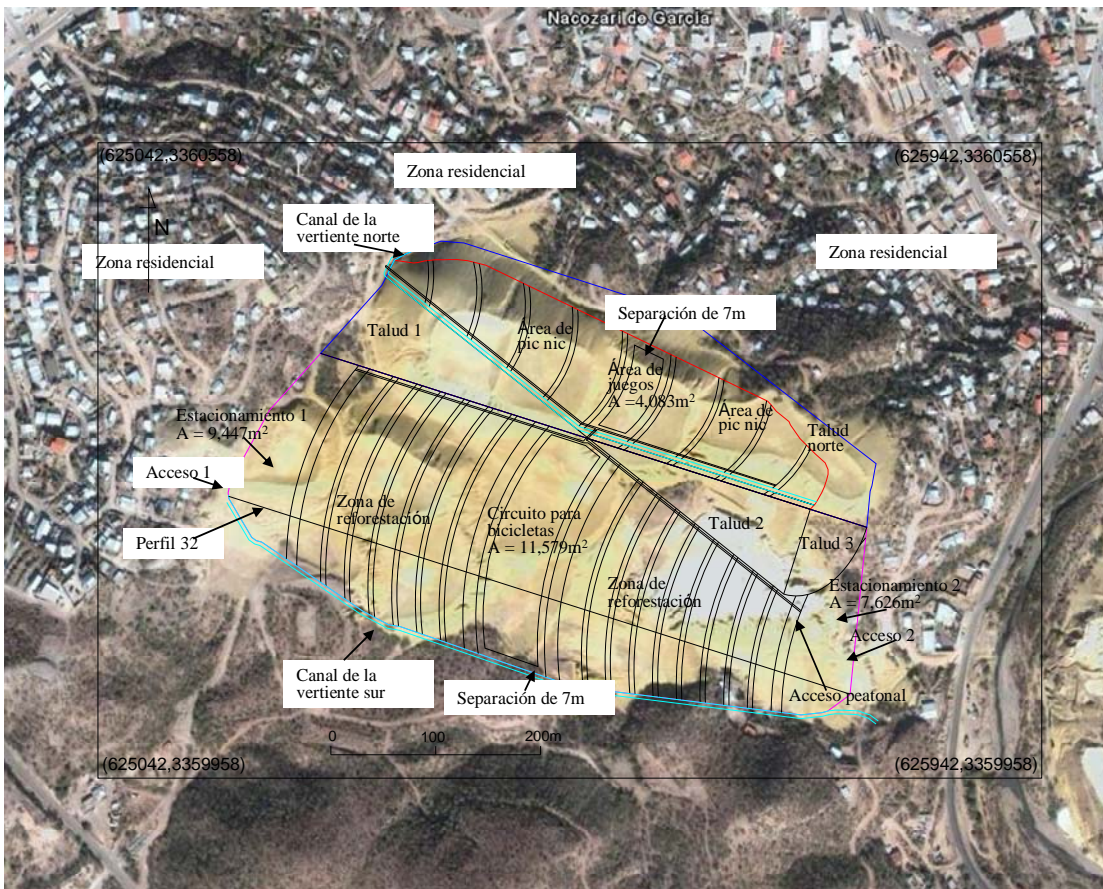


Figura 54.- Diseño detallado para el depósito de jales mineros en Nacozari de García para una recuperación de uso recreativo.

Para la circulación de las personas dentro del sitio se agregaran dos caminos peatonales a lo largo de cada vertiente con un ancho de 1.50 m. En la Vertiente Norte el camino peatonal se colocará a 3 m al norte del canal de desagüe (Figura 55), en cuanto a la Vertiente Sur, el camino peatonal se colocará 4m del inicio del Talud 1 en su parte alta (Oeste), y en su parte baja (Este) se contempla a 2 m al pie del Talud 2 (Figura 56).

## Sección transversal del camino peatonal VN

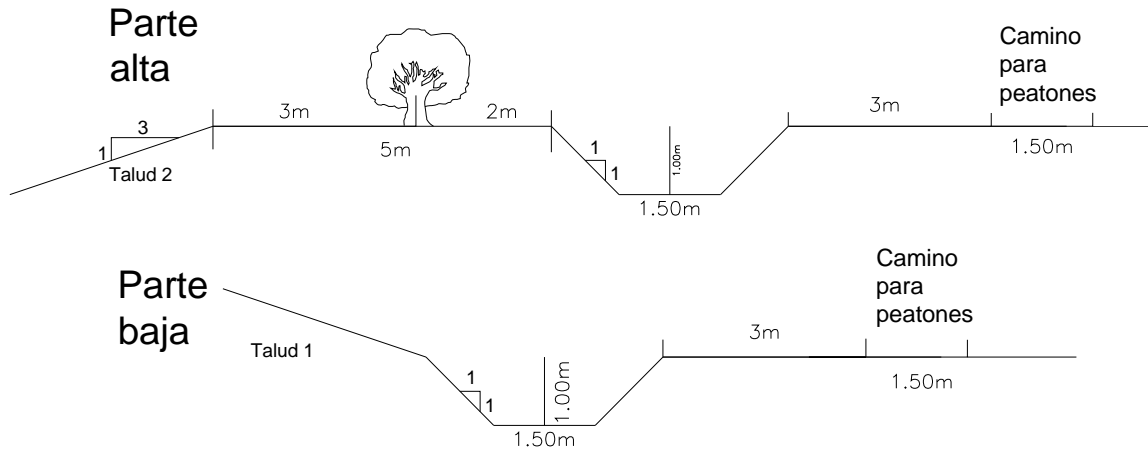


Figura 55.- Sección transversal del camino de la Vertiente Norte, mostrando sus dimensiones.

## Sección transversal del camino peatonal VS

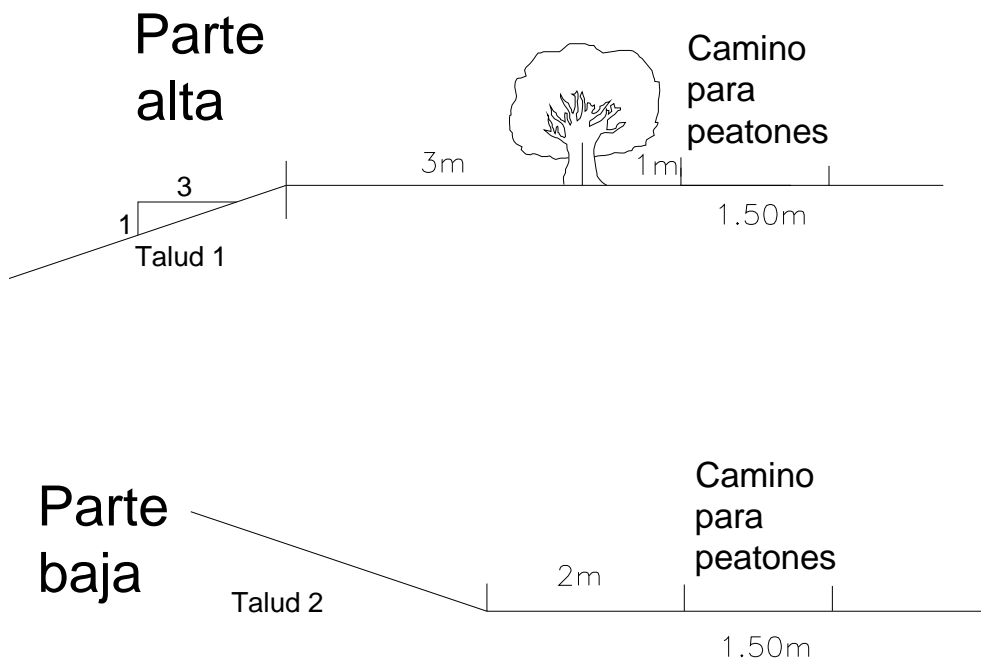
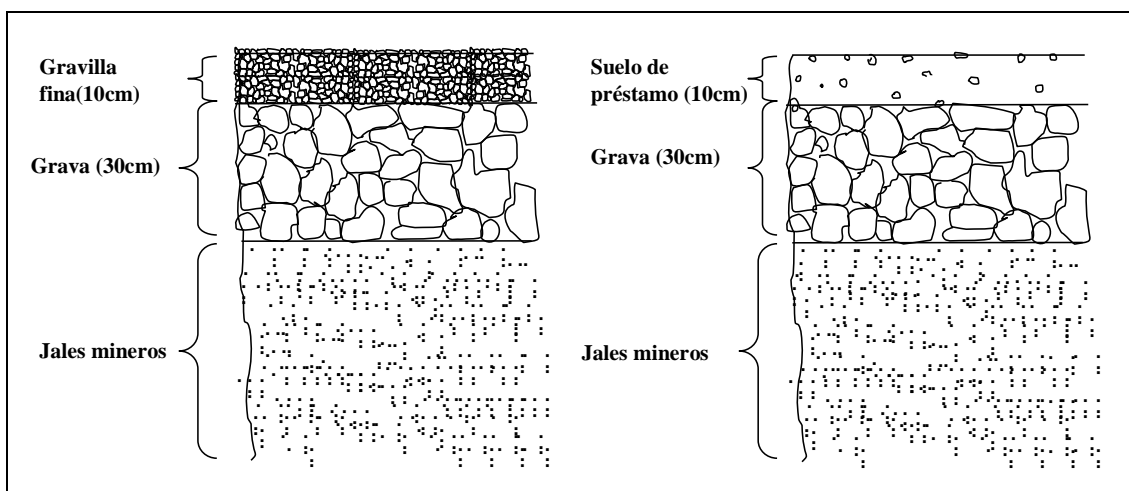


Figura 56.- Sección transversal del camino de la Vertiente Sur, mostrando sus dimensiones.

En cuanto a la cubierta, se ha decidido que se colocará una capa de 30 cm de grava sobre todo el área de los jales como soporte (202,025.7m<sup>2</sup>), sobre la cual se recubrirá con suelo y gravilla fina. El área de los estacionamientos y los caminos peatonales (18,390m<sup>2</sup>), se cubrirá con 10 cm de gravilla fina sobre la capa de 30cm de grava (*Figura 57*), por otra parte el resto del área se cubrirá con suelo de préstamo directamente sobre la grava (183,640m<sup>2</sup>), así el área de juegos y de reforestación (incluyendo el área de la fitoestabilización), quedarán con una capa de suelo.



*Figura 57.- Espesor de las capas que servirán de cubierta para los jales de Nacozari previo a su remediación.*

#### **VI.4 Fitorremediación.**

La fitorremediación es una tecnología usada para restaurar sitios contaminados. Es una técnica de aplicación in situ donde se considera un equilibrio costo-efectivo, haciéndola preferible de entre otras técnicas químicas o mecánicas. La fitorremediación hace uso de especies de plantas con una excepcional capacidad para acumular metales (Dudeney, 2004), es una técnica potencialmente importante, sin embargo, solo pocas especies de plantas son conocidas como hiperacumuladoras de metales (Solís-Domínguez et al., 2007).

Los dos tipos principales de fitorremediación, según Méndez y Maier (2008), son:

- I) Fitoextracción: utiliza el uso de plantas para remoción o reducción de metales contaminantes en jales mineros. Esto se realiza por acumulación o hiperacumulación de metales en la biomasa de la planta, en la parte superior de



la misma (Perronnet, 2003). Posteriormente las plantas son cosechadas y consideradas como desechos peligrosos o incineradas debido a la alta concentración de metales que se encuentran en ella.

II) Fitoestabilización: se enfoca en la formación de una capa vegetativa donde se fijan los metales a través de un proceso de inmovilización dentro de la rizósfera de la planta (Zona que se encuentra entre el contacto de la raíz con el suelo), reduciendo la biodisponibilidad hacia la vida animal. El cuerpo de la planta sirve como pantalla contra la energía del viento para reducir la dispersión eólica, mientras que las raíces de la planta ayuda a prevenir la erosión hídrica y lixiviación (Li, 2006). La fitoestabilización es una estrategia de contención de donde una capa vegetativa es creada para la estabilización de jales por un largo período (González y González-Chávez, 2006).

#### **VI.4.1 Geoquímica de suelos.**

La acumulación de sales en la superficie genera una delgada corteza de material de granulometría muy fina que es susceptible a la erosión eólica y por consiguiente su transporte y depósito. Adicionalmente, el plan de fitorremediación debe considerar el reporte de las altas concentraciones de metales en estas sales, ya que al tratarse de sales solubles, podrían impedir la reforestación o ser transportadas hacia tallos y hojas de las plantas volviéndose biodisponible y afectando a la fauna del lugar. Por estas razones se recomienda el uso de fitoestabilización y no fitoextracción.

Por otro lado, los resultados obtenidos para elementos como arsénico y plomo son bajos en los jales y mas bajos aún en las sales, además es importante resaltar que al no existir un incremento de concentración en sales (*Figura 58*), concluimos que tanto el arsénico como el plomo no se encuentran en estado soluble, adicionalmente, las concentraciones de estos metales son permisibles en materia de suelos (PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004). La *Figura 61* muestra una correlación positiva entre cobre y arsénico de los jales. Esto indica que el arsénico se asocia a la mineralización, sin embargo, a diferencia del cobre, el arsénico no es soluble en condiciones ambiente actuales de los jales y su distribución en la zona urbana está sujeta a otros procesos (erosión hídrica).

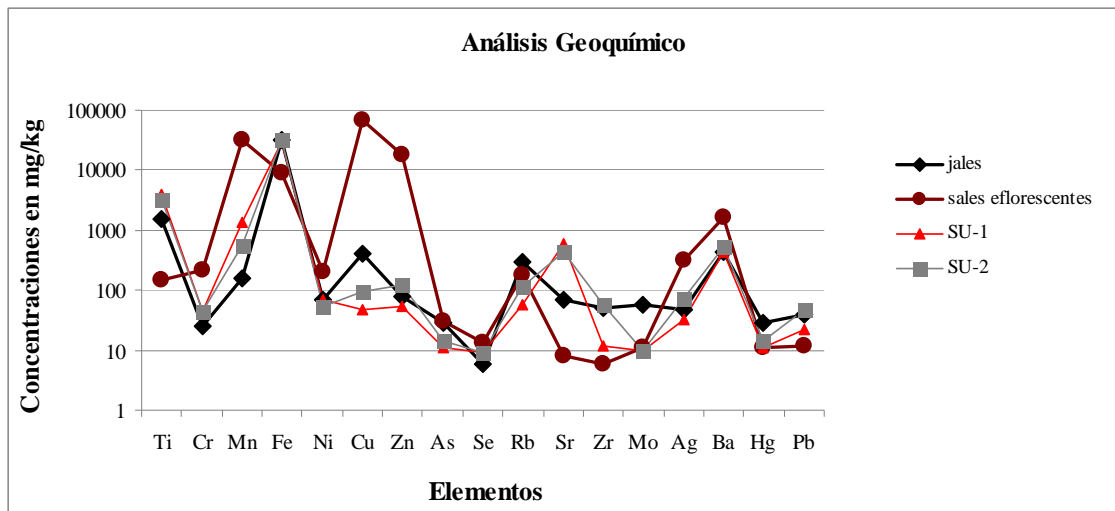


Figura 58.- La gráfica muestra las concentraciones en mg/Kg de elementos en jales, sales eflorescentes y posibles suelos de préstamo.

A excepción del hierro, las concentraciones de metales en suelos naturales, son bajas en ambas estaciones de muestreo (Figura 58 y 60). El objetivo de realizar análisis de suelos naturales en éste trabajo es para la selección de una posible fuente para suelo de préstamo destinándolo como cubierta sobre los jales para su posterior reforestación y que cumpla algunos requerimientos en cuanto a su composición química, demostrando que es apto para dicha función (Figura 37 y 59).

La gráfica de la Figura 60 muestra que los valores de fondo de los suelos naturales de Nacozari tienen concentraciones por debajo del máximo permisible para suelos residenciales y agrícolas según lo establece la legislación mexicana (PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004), esto referente a los niveles de los siguientes metales: Ni, Se, As, Hg y Pb. En base a esto se concluye que estos suelos representan la opción viable para cubrir parte de la superficie de los jales en la cual no se utilice la fitoestabilización.



Figura 59.- Localización de la segunda fuente posible de suelo de préstamo como cubierta para los jales.

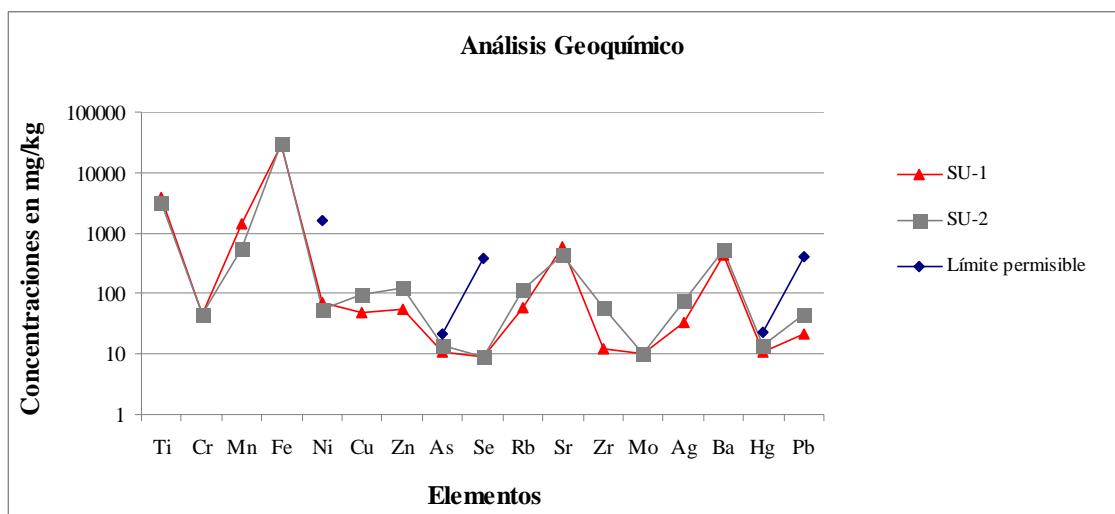


Figura 60.- Concentraciones de suelos naturales y los límites permisibles por la PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Las siguientes gráficas muestran correlaciones positivas entre elementos asociados a la mineralización (Figuras 61 y 62). En el caso de cobre y arsénico, el cobre es soluble y el arsénico no, sin embargo la correlación positiva indica que se asocian a la anomalía geoquímica del área mineralizada de Nacozari, y no solo como consecuencia del proceso de beneficio. Esto se aprecia también en los valores de fondo para el arsénico, ya que los suelos naturales presentan valores similares a los jales; esto se explica porque los suelos del área son producto de la erosión de las rocas del área y es a su vez un distrito minero importante. Sin embargo, en la gráfica de la Figura 61 se observa que las muestras de suelo natural, que se usará como cubierta, tienen valores de arsénico muy por debajo del máximo permisible según la legislación mexicana.

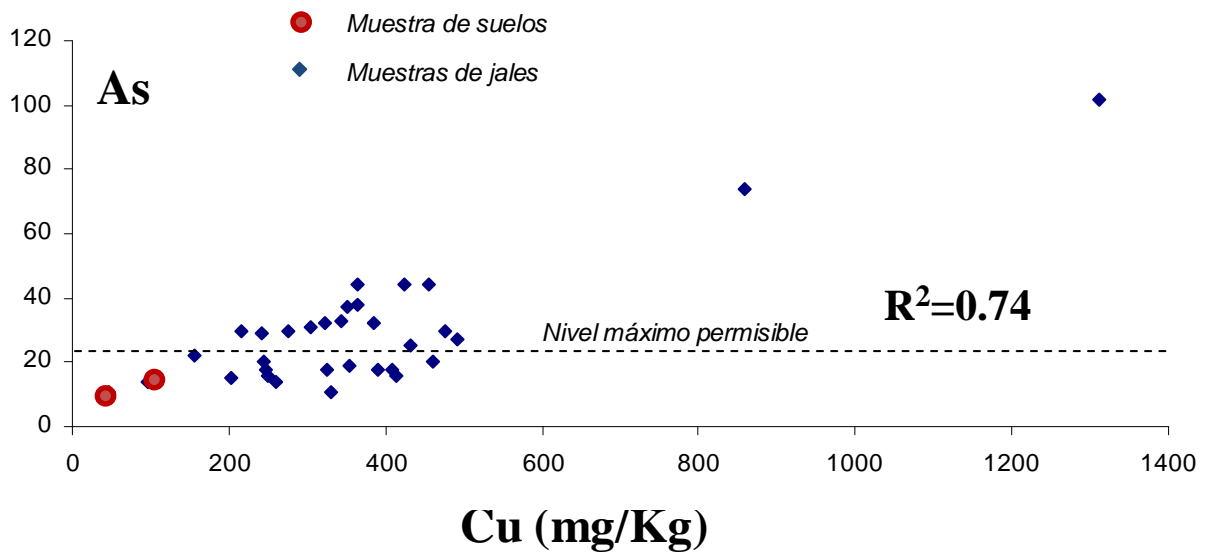


Figura 61.- Gráfica As vs Cu, muestra una correlación positiva, las concentraciones de las muestras de posibles suelos de préstamo aparecen de rojo por debajo del nivel máximo permisible.

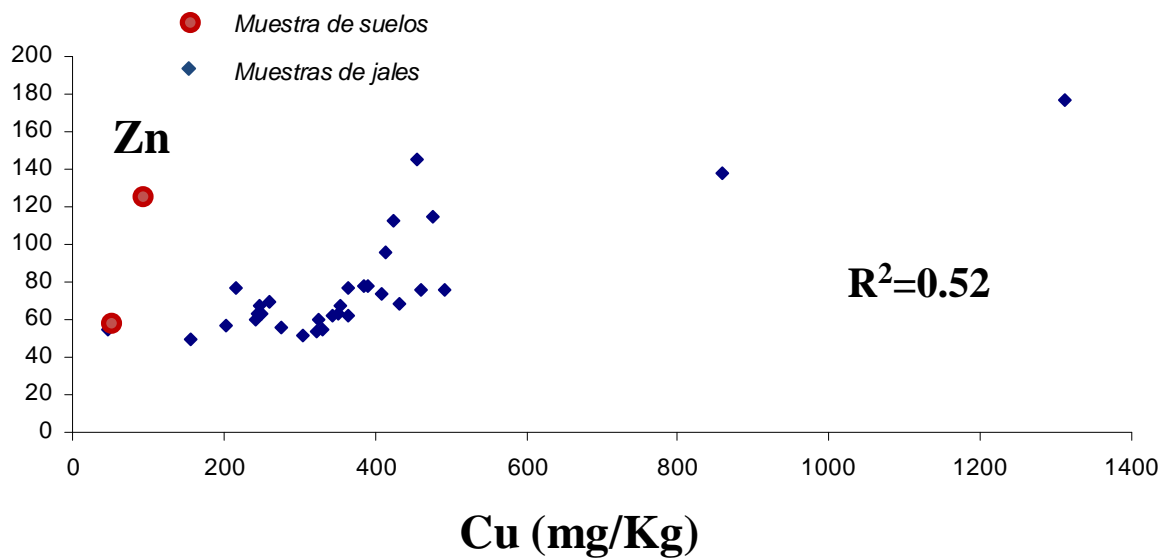


Figura 62.- Gráfica Zn vs Cu, mostrando una correlación positiva, las muestras de suelos naturales aparecen de color rojo.

En el caso del diagrama de manganeso contra zinc, no existe correlación alguna (Figura 63) ya que el manganeso no está asociado a la mineralización del área. En este caso, los suelos naturales están por encima de los valores de los jales, sin embargo el manganeso no es potencialmente tóxico, en todo caso afectaría a la vegetación pero al proponerse plantas fitoestabilizadoras se deben elegir aquellas que se haya probado que pueden fijar o tolerar el manganeso.

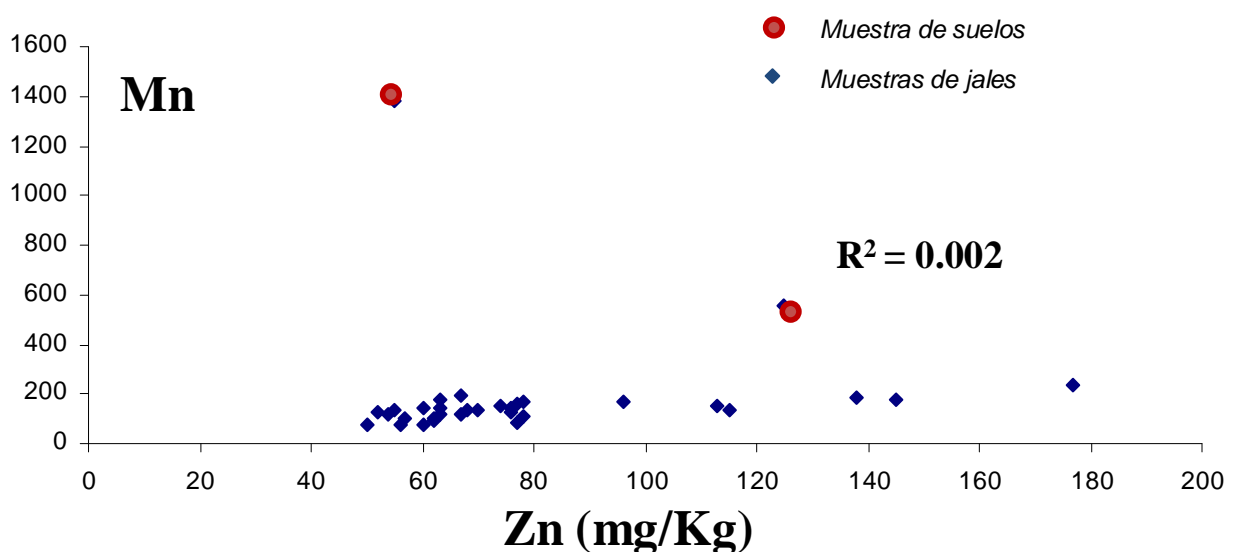


Figura 63.- Gráfica Mn vs Zn, prácticamente no existe correlación entre éstos dos elementos.

#### VI.4.2 Propuesta de planta con potencial fitoestabilizador.

Como se mencionó anteriormente, ocurre una elevada acumulación de metales en sales solubles localizadas en la superficie de los jales de Nacozari, principalmente: Cu, Zn, Cr y Mn. Este proceso no ocurre en toda la superficie de los jales y está restringido al área sureste en donde ocurrió depositación hídrica de los jales (jales de flotación). Esta zona representa el área de acumulación de material más fino y al ser las sales solubles de granulometrías muy finas son susceptibles de erosión eólica. El establecimiento de plantas reduciría significativamente la dispersión de este material por acción del viento, sin embargo, debido a la hiperacumulación de metales es necesario el establecimiento de plantas nativas que fitoestabilicen metales y generen una estructura de suelo, a largo plazo.

Por todo esto, se procedió a organizar información referente a ocurrencia de plantas nativas potencialmente fitoestabilizadoras para obtener un inventario local (*Tabla 24*) y finalmente proponer familias de plantas para continuar el trabajo de experimentación en la Universidad de Arizona.

|    | Familia                | Nombre Científico                   | Nombre Común                    |
|----|------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1  | <i>Amaranthaceae</i>   | <i>Amaranthus Palmeri</i>           | Quelite, Bledo                  |
| 2  | <i>Bignoniaceae</i>    | <i>Chilopsis Linearis</i>           | Jano, Mimbre                    |
| 3  | <i>Caesalpiniaceae</i> | <i>Senna Covesii</i>                | Dais, Rosa María                |
| 4  | <i>Compositae</i>      | <i>Ambrosia Ambrosoides</i>         | Chicura, Jioguo                 |
| 5  | <i>Compositae</i>      | <i>Ambrosia Confertiflora</i>       | Estafiate                       |
| 6  | <i>Compositae</i>      | <i>Baccharis Glutinosa</i>          | Batamote                        |
| 7  | <i>Compositae</i>      | <i>Baccharis Sarothroides</i>       | Romerillo                       |
| 8  | <i>Compositae</i>      | <i>Baccharis Thesioides</i>         | Hierba del pasmo                |
| 9  | <i>Compositae</i>      | <i>Hymenoclea Salsola</i>           | Romerillo                       |
| 10 | <i>Compositae</i>      | <i>Porophyllum Gracile</i>          | Hierva del venado               |
| 11 | <i>Compositae</i>      | <i>Viguiera Deltoidea</i>           | Hehe imoz coopol                |
| 12 | <i>Cupressaceae</i>    | <i>Juniperus Deppeana</i>           | Táscale, Huata                  |
| 13 | <i>Cupressaceae</i>    | <i>Juniperus Monosperma</i>         | Táscale, Huata                  |
| 14 | <i>Euphorbiaceae</i>   | <i>Croton Ciliato-Glanduliferum</i> | Picosa, Uruquenía               |
| 15 | <i>Euphorbiaceae</i>   | <i>Croton Texensis</i>              | Tortolita, Hierba de la tórtola |
| 16 | <i>Fabaceae</i>        | <i>Erythrina Flabelliformis</i>     | Chilicote, Colorín              |
| 17 | <i>Fouquieriaceae</i>  | <i>Fouquieria Splendens</i>         | Ocotillo                        |
| 18 | <i>Gramineae</i>       | <i>Cynodon Dactylon</i>             | Zacate bermuda                  |
| 19 | <i>Juglandaceae</i>    | <i>Juglans Major</i>                | Nogal silvestre                 |
| 20 | <i>Krameriaceae</i>    | <i>Krameria Parviflora</i>          | Cosahui                         |
| 21 | <i>Mimosaceae</i>      | <i>Acacia Constricta</i>            | Vinorama                        |
| 22 | <i>Mimosaceae</i>      | <i>Acacia Farnesiana</i>            | Huizache                        |
| 23 | <i>Mimosaceae</i>      | <i>Mimosa Laxiflora</i>             | Uña de gato                     |

Continuación.

|    |                       |                                 |            |
|----|-----------------------|---------------------------------|------------|
| 24 | <i>Mimosaceae</i>     | <i>Prosopis Grandulosa</i>      | Mezquite   |
| 25 | <i>Nyctaginaceae</i>  | <i>Allionia Incarnata</i>       | Guapile    |
| 26 | <i>Oleraceae</i>      | <i>Fraxinus Standleyi</i>       | Fresno     |
| 27 | <i>Oleraceae</i>      | <i>Fraxinus Velutina</i>        | Fresno     |
| 28 | <i>Papaveraceae</i>   | <i>Argemone Pleiakantha</i>     | Cardo      |
| 29 | <i>Pinaceae</i>       | <i>Pinus Spp</i>                | Pino       |
| 30 | <i>Salicaceae</i>     | <i>Salix Bonplandiana</i>       | Sauz       |
| 31 | <i>Sapindaceae</i>    | <i>Dodonaea Viscosa</i>         | Tarachiqui |
| 32 | <i>Solanaceae</i>     | <i>Capsicum Annuum</i>          | Chiltepin  |
| 33 | <i>Solanaceae</i>     | <i>Datura Discolor</i>          | Toloache   |
| 34 | <i>Solanaceae</i>     | <i>Nicotiana Glauca</i>         | Juan loco  |
| 35 | <i>Solanaceae</i>     | <i>Solanum Elaeagnifolium</i>   | Trompillo  |
| 36 | <i>Ulmaceae</i>       | <i>Celtis Reticulata</i>        | Cúmaro     |
| 37 | <i>Verbenaceae</i>    | <i>Aloysia Lycioides</i>        | Orégano    |
| 38 | <i>Zygophyllaceae</i> | <i>Kallstroemia Grandiflora</i> | Baiborin   |

Tabla 24.- Inventario de plantas nativas en el sitio de Nacozari de García y sus alrededores.

En la Tabla 24, aparecen los tipos de plantas nativas que se pueden encontrar en los alrededores de Nacozari de García, en base a este inventario podremos comparar y seleccionar la familia o familias de plantas existentes en el área de Nacozari, con otras estudiadas y probadas en distintas zonas del mundo (Tabla 25), considerando las semejanzas en cuanto a las condiciones locales.

| Familia de plantas    | Metales contaminantes  | Localización | Clima    | Comentarios y referencias           |
|-----------------------|------------------------|--------------|----------|-------------------------------------|
| <i>Anacardiaceae</i>  | Cu                     | Chipre       | Árido    | F (Johansson et al. 2005)           |
|                       | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn     | México       | Árido    | P (González y González-Chávez 2006) |
| <i>Aspiaceae</i>      | Pb, Zn                 | USA          | Templado | P (Mbila y Thompson 2004)           |
| <i>Aspholadaceae</i>  | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn     | México       | Árido    | P (González y González-Chávez 2006) |
| <i>Asteraceae</i>     | As                     | México       | Árido    | P (Flores-Tavizon et al. 2003)      |
|                       | Cu                     | USA          | Templado | G (Kramer et al. 2000)              |
|                       | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn     | México       | Árido    | P (González y González-Chávez 2006) |
| <i>Betulaceae</i>     | Ag, As, Cd, Cu, Pb, Zn | Ecuador      | Árido    | P (Bech et al. 2002)                |
|                       | Cu                     | USA          | Templado | G (Kramer et al. 2000)              |
| <i>Chenopodiaceae</i> | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn     | México       | Árido    | P (González y González-Chávez 2006) |
|                       | As, Cu, Mn, Pb, Zn     | USA          | Árido    | G (Méndez et al. 2007)              |
|                       | As, Hg, Mn, Pb         | USA          | Árido    | F (Rosario et al. 2007)             |
|                       | Cu, Pb, Zn             | USA          | Árido    | G (Jordan et al. 2002)              |
| <i>Euphorbiaceae</i>  | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn     | México       | Árido    | P (González y González-Chávez 2006) |
| <i>Fabaceae</i>       | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn     | México       | Árido    | P (González y González-Chávez 2006) |
| <i>Malvaceae</i>      | Pb, Zn                 | China        | Templado | F (Shu et al. 2001)                 |
| <i>Plumbaginaceae</i> | Cu, Pb, Zn             | España       | Árido    | P (Conesa et al. 2006)              |
| <i>Poaceae</i>        | Cu, Pb, Zn             | España       | Árido    | P (Conesa et al. 2006)              |

Continuación.

|                     |                    |             |          |                                      |
|---------------------|--------------------|-------------|----------|--------------------------------------|
|                     | Cu, Pb, Zn         | Reino Unido | Templado | F (Smith y Bradshaw 1979)            |
|                     | Pb, Zn             | China       | Templado | F (Shu et al. 2001)                  |
|                     | Pb, Zn             | Escocia     | Templado | G (Pichtel y Salt 1998)              |
|                     | Pb, Zn             | Polonia     | Templado | F (Krzaklewski y Pietrzykowski 2002) |
| <i>Polygonaceae</i> | Cd, Cu, Mn, Pb, Zn | México      | Arido    | P (González y Gonzalez-Chávez 2006)  |

Tabla 25.- Familia de plantas candidatas al empleo en trabajos de fitoestabilización. (G) estudios en invernadero. (F) estudios en el campo. (P) Plantas nativas (Méndez y Maier, 2008).

Según la Tabla 25, existen dos familias con las que se han llevado a cabo trabajos satisfactorios y que al mismo tiempo se encuentran de forma natural en la zona de Nacozari de García, una de ellas es la familia Euphorbiaceae, usada en la mina El Bote en Zacatecas. Analizando las condiciones climáticas de la zona antes mencionada con respecto al sitio de Nacozari de García tenemos la Tabla 26 donde aparecen las diferencias de las dos áreas.

| Características mas notorias | Nacozari de García    | Zacatecas           |
|------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Clima                        | Semi-árido, semi-seco | Templado, semi-seco |
| Precipitación promedio anual | 489 mm                | 400 mm              |
| Temperatura media anual      | 27°C                  | 15°C                |
| Altitud                      | 1,100 msnm            | 2,440 msnm          |

Tabla 26.- Características más importantes de los sitios Nacozari de García y Zacatecas.

Como podemos ver, en el área de la mina El Bote en Zacatecas se analizará más a detalle el tipo de jales de ese sitio en particular con respecto a los jales de Nacozari de García (Tabla 27), antes de realizar cualquier contemplación referente a la familia de plantas *Euphorbaceae*.

Este experimento se llevó a cabo en el sitio minero El Bote para identificar que tipos de plantas nativas son acumuladores o híper acumuladores y las características en la capacidad de remoción de elementos traza.

| pH                         | H <sub>2</sub> O | CaCl <sub>2</sub> |
|----------------------------|------------------|-------------------|
| Suelo de la cima (0-20 cm) | 4.95             | 5.02              |
| Capa 2 (20-40 cm)          | 4.61             | 4.39              |
| Suelo + desechos           | 6.19             | 6.43              |
| Desechos cafés             | 3.9              | 4.6               |
| Desechos amarillos         | 7.06             | 7.54              |

Tabla 27.- pH de muestras de suelo y escoria colectadas en la mina El bote en Zacatecas (González y González-Chávez, 2006).



La distribución de arenas y arcillas fueron del 47% y 30% respectivamente, el mineral dominante en los desechos son el cuarzo, seguido por la calcita, hematina y pirita. El color es de amarillo rojizo a rojo.

Los residuos amarillos del sitio El Bote, tuvieron mayores concentraciones que los residuos marrones, posiblemente porque los valores mas bajo de pH, contribuyen en la lixiviación de metales de los residuos marrones (Tabla 28). En la mina El Bote, fueron extraídos 14 minerales, por lo tanto los residuos tienen una composición heterogénea.

| Elemento           | Cd                  | Ni         | Pb       | Mn      | Cu       | Zn      |
|--------------------|---------------------|------------|----------|---------|----------|---------|
| Totales            | Mg Kg <sup>-1</sup> |            |          |         |          |         |
| Suelos+desechos    | 22.6                | 17.5       | 1,489.4  | 1,197.1 | 197.5    | 947.7   |
| Desechos marrones  | 7.7                 | 9.2        | 1,015.1  | 665.8   | 184.4    | 116.5   |
| Desechos amarillos | 30.0                | 18.9       | 2,061.9  | 1,499.0 | 12,313.1 | 1,449.0 |
| DTPA               | Solubles            |            |          |         |          |         |
| Suelos + desechos  | 0.12-1.9            | Trazas-0.7 | 56-188.6 | 7-68.4  | 3-12.6   | 6-51    |
| Desechos marrones  | 1.04                | Trazas     | 307.6    | 22.6    | 9.9      | 18.4    |
| Desechos amarillos | 3.18                | Trazas     | 27.46    | 4.42    | 4.7      | 26.4    |

Tabla 28.- Concentración total y DTPA de elementos traza solubles en suelos y residuos de desechos de la mina El Bote (González y González-Chávez, 2006).

Plantas nativas, por ejemplo, *Teloxys graveolens* y *Jatropha dioica* acumularon 42.9 y 30.5 mg /Kg Cd, y 28 mg/Kg Ni, respectivamente (Tabla 29). El plomo fue acumulado en altas concentraciones en la planta *Polygonum aviculare* (124mg/kg) y *Teloxys graveolens* (125mg/kg), pero el Zn fue acumulado en altas concentraciones por mas especies. Las concentraciones de Zn en *Brickellia veronicifolia*, *Jatropha dioica* y *Polygonum aviculare* fueron de 6000, 6250 y 9230 mg/kg respectivamente.

Todas las otras plantas utilizadas en el sitio El Bote acumularon menos de 1000 mg/kg de Zn. Aunque la *Polygonum aviculare* creció rápidamente durante la estación de lluvias, su biomasa fue aproximadamente 20±4 gr por ejemplar adulto.

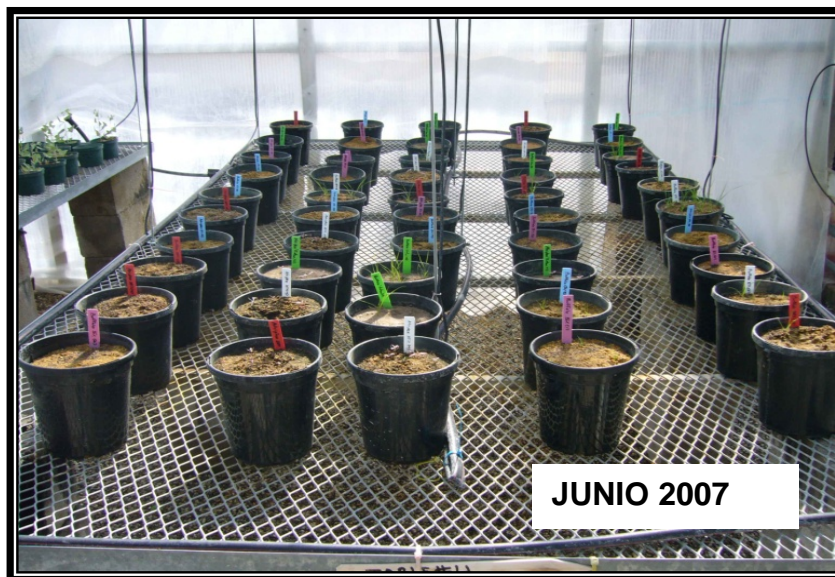
| Especies de plantas                         | Familia               | Zn   | Cu  | Pb  | Cd   |
|---|-----------------------|------|-----|-----|------|
| <i>Tapetes lunulata</i> Ort.                | <i>Compositae</i>     | 2.7  | 4.3 | 0.6 | 6.1  |
| <i>Polygonum aviculare</i> L.               | <i>Polygonaceae</i>   | 33.6 | 2.7 | 1.0 | 29.9 |
| <i>Teloxys graveolens</i> Willd.            | <i>Chenopodiaceae</i> | 69.4 | 3.3 | 2.0 | 27.9 |
| <i>Jatropha dioica sessé ex Cerv.</i>       | <i>Euphorbiaceae</i>  | 195  | 6.5 | 1.7 | 18.8 |
| <i>Bouvardia ternifolia (Cav.) Schlecht</i> | <i>Rubiaceae</i>      | 13.8 | 5.2 | 1.2 | 8.2  |
| <i>Brickellia veronicifolia (HBK)</i>       | <i>Compositae</i>     | 40   | 3.8 | 1.3 | 7.5  |
| <i>Gnaphalium arizonicum</i> Gray           | <i>Compositae</i>     | 9.7  | 5.2 | 0.8 | 3.8  |
| <i>Stevia salicifolia</i> Cav               | <i>Compositae</i>     | 24.2 | 2.3 | 1.4 | 9.5  |
| <i>Salvia microphylla</i> HBK               | <i>Labiatae</i>       | 15   | 6.5 | 0.4 | 4.0  |
| <i>Haplopappus venetus (HBK) Blake</i>      | <i>Compositae</i>     | 7.9  | 2.3 | 0.4 | 1.8  |

Continuación.

|  |                |     |     |     |     |
|--|----------------|-----|-----|-----|-----|
| <i>Dalea bicolor</i> Humb&Bonpl. exWilld | Leguminosae    | 5.8 | 3.6 | 0.3 | 1.7 |
| <i>Euphorbia</i> sp.                     | Euphorbiaceae  | 1.3 | 5.1 | 0.3 | 3.5 |
| <i>Asclepias linaria</i> Cav.            | Asclepiadaceae | 5.6 | 2.0 | 0.3 | 2.3 |

Tabla 29.- Factor de bioconcentración de elementos traza en plantas nativas utilizadas en mezclas de suelos y desechos alrededor del depósito (Carrillo y González-Chávez, 2006).

Por lo anterior se deduce que la familia *Euphorbaceae* es una candidata óptima para realizar pruebas de fitoestabilización en invernadero (Universidad de Arizona) y en el sitio (Jales I de Nacozari). Anteriormente, la Universidad de Arizona realizó pruebas con material de jales de Nacozari para *Atriplex lentiformis* y *Buffalo grass* logrando un crecimiento de biomasa con aproximadamente 10% de adición de composta al material de los jales (Fotografía 16 y 17).



Fotografía 16.- Experimentos de invernadero en la Universidad de Arizona, usando *Atriplex Lentiformis* y *Buffalo Grass* en Junio del 2007.



*Fotografía 17.- Experimentos de invernadero en la Universidad de Arizona, usando Atriplex Lentiformis y Buffalo Grass en Agosto del 2008.*

## VII. CONCLUSIONES.

Se definió la topografía de los jales, donde se observa perfectamente las tendencias de los flujos principales de escorrentía, esto nos proporciona la información necesaria para la implementación de un diseño eficiente de drenaje; además de influir en de la dirección de descenso de las vermas en cada vertiente.

Se determinó la presencia de un bloque altamente inestable en el talud noroeste de los jales, de ahí la importancia de la aplicación de un modelo de terrazas con descenso de E-W en la vertiente norte, para una alta reducción de pendiente, en la zona NW del sitio, así como 6 veces su elevación; proporcionando una mayor estabilidad.

La erosión hídrica de los jales con respecto a la erosión de los suelos naturales del sitio es 20 veces mayor, es decir, por cada tonelada de suelo erosionada, son removidas veinte toneladas de jales, de ahí la importancia de la función de una cubierta vegetativa capaz de reducir hasta 20 veces la erosión hídrica en este sitio, bajo las mismas condiciones climatológicas. Esto aunado a la reducción de las pendientes permitirá disminuir significativamente la erosión y consecuente transporte de los jales a las zonas residenciales.

La geoquímica de suelos naturales nos muestra que las dos localidades muestreadas contienen suelo apto y sano para cumplir la función de cubierta en los jales, sobre los cuales se realizaría la reforestación. Además cumple con los límites permisibles para suelos de uso agrícola y residencial según la NOM-147-SEMARNAT-SSA1. La elección del sitio para extracción de suelo de préstamo solo lo determinaría un análisis de costo en cuanto al acarreo y el volumen a utilizar en el sitio.

Los jales de granulometría gruesa, tienen bajas concentraciones de metales comparadas con la de jales derivados de la explotación de otro yacimiento tipo pórfido cuprífero. Sin embargo, en la superficie de la parte sureste de los jales se forman sales eflorescentes enriquecidas en metales (Fe, Cu, Mn, Zn) los cuales se encuentran en forma de sales solubles en agua. En esta zona se sugiere implementar la técnica de fitoestabilización ya que las plantas empleadas en esta zona deben ser tolerantes, así como tener la capacidad de fijar en sus raíces particularmente el Cu, Fe, Zn y Mn.

El tipo de fitorremediación a emplear en el sitio será fitoestabilización debido a que éste funciona fijando los elementos en la rizósfera de la planta (espacio entre la raíz de la planta y el suelo donde ocurre la actividad bacteriana y su alimentación), además, la raíz y

cuerpo de las plantas provee un fortalecimiento físico de los jales evitando deslaves y reduciendo la erosión hídrica y eólica. El argumento más sólido para esta elección es que el sitio se encuentra dentro de un poblado para el cuál sería riesgoso aplicar fitoextracción, ya que en ésta los elementos son absorbidos y llevados al cuerpo de las plantas (Incluyendo hojas y forrajes), y existen animales herbívoros que podrían llevar elementos potencialmente tóxicos a la cadena alimenticia, a través de la ingesta de éstas plantas.

Existen dos posibles plantas para emplear, las cuales fueron sometidas a estudios con resultados exitosos utilizando jales de Nacozari de García. Estas son *Atriplex Lentiformis* y *Buffalo Grass*. Además existe una familia de plantas llamada *Euphorbiaceae* que ha sido empleada en diversos trabajos de fitoestabilización en México y se encuentra de manera nativa en Nacozari de García.

Se propone el diseño final para la remediación del sitio considerando todos los estudios geológicos, geotécnicos, climáticos, sociales y de erosión del área, redirigiéndolo a una orientación de uso recreativo, siendo ésta la mejor opción influyendo mucho su ubicación.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA.

- Aguilar J., Bouza P., Dorronsoro C., Fernández E., Fernández J., García I., Martín F., Ortiz I. y Simón M. 2003. Contaminación de los suelos afectados por el vertido de y su evolución en el tiempo (1998-2001). *Edafología*, Vol. 10(1), pp. 65-73, 2003. Dpto. Edafología y Química Agrícola, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Campus Fuentenueva s/n, 18002, Granada, España.
- Alvarado Martínez Victor J., Volke Sepúlveda Tania L. 2004. Informes de Resultado del Proyecto: Método de Análisis y Propuesta para el Manejo de los Residuos Mineros del Sitio de Nacozari, Sonora. Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. SEMARNAT.
- Bech J, Poschenrieder C, Barcelo J, Lansac A. 2002. Plants from mine spoils in the South American area as potential sources of germplasm for phytoremediation technologies. *Acta Biotechnol.* Vol. 1-2, pp. 5-11.
- Brodtkom F. 2002. Guía de Buenas Prácticas Medioambientales en la Industria Extractiva Europea. Aplicación al caso Español. Ed. Dirección General de Política Energética y Minas. Ministerio de Economía. Un estudio preparado para las asociaciones europeas CEMBUREU, CERAM-UNIE, EULA, EURO-ROC, IMA-EUROPE, UEPG.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2007. Datos climatológicos de temperatura, precipitación y evaporación, durante el período 1943-2006. Dirección Técnica de la CONAGUA. Organismo de Cuenca Noroeste, Hermosillo, Sonora, México.
- Conesa HM, Faz A, Arnaldos R. 2006. Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Sci Total Environ.* Vol. 366, pp. 1-11.
- Conesa Héctor M., Faz Angel, Arnaldos Raquel. 2007. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Chemosphere.* Vol.66, pp. 38-44.
- Conesa Héctor M., García Gregorio, Faz Ángel, Arnaldos Raquel. 2007. Dynamics of metal tolerant plant communities' development in mine tailings from the Cartagena-La Unión Mining District (SE Spain) and their interest for further revegetation purposes. *Chemosphere.* Vol. 68, pp. 1180-1185.
- Dold Bernhard y Fontboté Lluís. 2002. A mineralogical and geochemical study of element mobility in sulfide mine tailing of Fe oxide Cu-Au deposits from the Punta del Cobre belt, northern Chile. *Chemical Geology* 189 (2002) 135-163.

- Dudeney A. W. L., Tarasova I. I., Tyrologou P. 2004. Co-utilisation of mineral and biological wastes in mine site restoration. *Minerals Engineering*. Vol. 17, pp. 131-139.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2000. Abandoned mine site characterization and cleanup handbook. United States Environmental Protection Agency, Region 10. 1200 Sixth Avenue, Seattle, WA 98101.
- Espí José Antonio. 2007. Metodologías del análisis de riesgo en su aplicación a los problemas ambientales y de seguridad en la industria minera. Red DESIR (Desarrollo sostenible-Ingeniería-Recursos minerales. Universidad Politécnico de Madrid (UPM).
- Flores-Tavizon E, Alarcón Herrera MT, González-Elizondo S, Olguin EJ. 2003. Arsenic tolerating plants from mine sites and hot springs in the semi-arid region of Chihuahua, México. *Acta Biotechnol*. Vol. 23, pp. 113-119.
- García Meza Jessica Viridiana. 2008. Autotrophic Biofilm Development on Superficial Samples of the Gold-Silver Mine Tailings, Valenciana (Mexico): Pioneers in Tailings Remediation? *Bull Environ Contam Toxicol*. Vol. 80, pp. 53-57.
- Gómez Álvarez, Agustín. 2008. Estudio de caracterización y biodisponibilidad de metales pesados (agua y sedimento) del río San Pedro, localizado en una región semi-árida del noroeste de México. E Baja California. Instituto de Ingeniería. Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería.
- González RC, González-Chávez MCA. 2006. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes: soil and sediment remediation (SSR). *Environ Pollut*. Vol. 144, pp. 84-92.
- Gutiérrez Ruíz Margarita. 2005. Diagnóstico General de las Presas Inactivas de Jales Ubicadas en Nacozari, Sonora. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Higuera Pablo & Oyarzun Roberto. 2003. Curso de Minería y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, EUP Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Almadén (Ciudad Real), España.
- Huerta Huitzil Mario V. Aspectos Ambientales en la Restauración de Minas Cerradas. *Experiencias Recientes de Industrias Peñoles, México*. 2005.
- INEGI, 2000. Censo General de Población y Vivienda. México 2001.
- INEGI, 2006. Censo General de Población y Vivienda. México.
- Instituto Geológico y Minero de España. 2000. Guía de restauración de graveras. Segunda Edición. Pp. 115-208.

- Jiménez Carolina, Huante Pilar, Rincón Emmanuel. Restauración de Minas Superficiales en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental. Octubre 2006.
- Johansson L, Xydas C, Messios N, Stoltz E, Greger M. 2005. Growth and Cu accumulation by plants grown on Cu containing mine tailings in Cyprus. *Appl Geochem*. Vol. 20, pp. 101-107.
- Jordan FL, Robin-Abbott M, Maier RM, Glenn EP. 2002. A comparison of chelator-facilitated metal uptake by a halophyte and a glycophyte. *Environ Toxicol Chem*. Vol. 21, pp. 2698-2704.
- Kirkby, M. J. & R. P. C. Morgan. 1980. Erosión de suelos. Limusa. Mexico.
- Kramer PA, Zabowsky D, Scherer G, Everett RL. 2000. Native plant restoration of copper mine tailings: I. Substrate effect on growth and nutritional status in a greenhouse study. *J. Environ Qual*. Vol. 29, pp. 1762-1769.
- Krzaklewski W, Pietrzykowski M. 2002. Selected physicochemical properties of zinc and lead ore tailings and their biological stabilization. *Water Air Soil Pollut*. Vol. 141, pp. 125-142.
- Legge G.H.H., L'Héríteau G., Penman A.D.M. y Wahler W.A. Manual de presas y depósitos de jales. Asociación de Ingenieros de minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C. 1993.
- Li restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. *Science of the total environment*. Vol. 357, pp. 38-53. M. S. 2006. Ecological.
- Lombardi Neto, F. y Moldenhausser W.C. Erosividade da chuva: sua distribuicao e relacao, com perdas de solo em Campinas, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVACAO DO SOLO, 3., 1980, Recife. proceedings... Recife: UFRPE, 1980, p 1-13.
- Mbila MO, Thompson ML. 2004. Plant-available zinc and lead in mine spoils and soils at the mine of Spain, Iowa. *J Environ Qual*. Vol. 33, pp. 553-558.
- Mendez MO, Glenn EP, Maier RM. 2007. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: growth, metal accumulation, and microbial community changes. *J Environ Qual*. Vol. 36, pp. 245-253.
- Méndez Mónica O., Maier Raina M. 2008. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Environ Sci Biotechnol*. Vol. 7, pp. 47-59.
- Merrington, G. and Alloway, B.J. 1994. The flux of Cd, Cu, Pb and Zn in mining polluted soils. *Water, Air, and Soil Pollution*. 73, 333-344.



- Mian, M. Haneef, Yanful Ernest, K. 2007. Erosion characteristics and resuspension of sub-aqueous mine tailings. *J. Environ. Eng. Sci.* Vol. 6, pp. 175-190.
- Morgan, R. P. C. 1979. *Soil erosion. Topics in applied geography.* Longman. New York.
- Navarro M.C., Pérez-Sirvent C., Martínez Sánchez M. J., Vidal J., Tovar P. J., Bech J. 2008. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metal: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration.* Vol. 96, pp. 183-193.
- Norma oficial mexicana. NOM-120-SEMARNAT-1997. Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de residuos peligrosos. Reglamento publicado en el diario oficial de la federación el 25 de noviembre de 1988.
- Norma oficial mexicana. NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece los requisitos para la caracterización del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Segunda edición, publicada el 17 de septiembre del 2003.
- Ontario regulation 114/91. Mining act. Amended to O. Reg. 240/00. Mine development and closure under part VII of the act. Note: This Regulation was revoked on April 25, 2000. See: O. Reg. 240/00, s. 28.
- Perronnet Karen, Schwartz Christophe y Morel Jean Louis. 2003. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multicontaminated soil. *Distribution of metals in Thlaspi caerulescens. Plant and soil.* Vol. 249, pp. 19-25.
- Pichtel J, Salt CA. 1998. Vegetative growth and trace metal accumulation on metalliferous wastes. *J Environ Qual.* Vol. 27, pp. 618-624.
- Proyecto de norma oficial mexicana. PROY-NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plomo, selenio, talio y vanadio. Publicada el 11 de Noviembre del 2005.
- Public Law 95-87, the Surface Mining Control and Reclamation Act of 1977 (SMCRA), passed August 3, 1977, and all revisions through December 31, 1993.
- Rademeyer Brian. 2008. *Mine Tailings Stabilization in Arid & Semi-Arid Environments Assessment, Problems, & Solutions.* Golder Associates.
- Ramos Arroyo Yann René, Siebe Grabach Christina Desireé. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el distrito de Guanajuato, Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas.*

año/vol. 23, número 001. Universidad Nacional Autónoma de México. Queretaro, México, pp 54-74.

- Razo Israel, Carrizales Leticia, Castro Javier, Díaz-Barriga Fernando Monroy Marcos. 2003. Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, air and soil pollution*. Vol. 152, pp. 129-152.
- Rosario K, Iverson SL, Henderson DA, Chartrand S, McKeon C, Glenn EP, Maier RM. 2007. Bacterial community changes during plant establishment at the San Pedro River mine tailings site. *J Environ Qual*. Vol. 36, pp. 1249-1259.
- Santibañez Claudia, César Verdugo, Ginocchio Rosanna. 2008. Phytostabilization of cooper mine tailings with biosolids: Implications for metals uptake and productivity of *Lolium perenne*. *Science of the Total Environment*. Vol. 395, pp. 1-10.
- Schalamuk, Isidoro B. A. 2006. La creciente expansión de la industria hace necesario desarrollar nuevas investigaciones minero-geológicas, para así obtener un inventario actualizado de recursos disponibles. Importancia estratégica de la minería. *El Ideario*. Investigador Superior del CONICET. Director del Instituto de Recursos Minerales (UNLP-CICBA). Profesor Titular de la UNLP. Lunes 23 de octubre del 2006.
- SEMARNAT. Informe Anual de Actividades 2005. Velasco Trejo Juan Bautista, De la Rosa Pérez David Alejandro, Ramírez Islas Martha Elena & Volke Sepúlveda Tania. Evaluación de Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados con Metales ETAPA II. Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados. Subdirección de Investigación en Sitios Contaminados y Sustancias Tóxicas.
- Shu WS, Ye ZH, Lan CY, Zhang ZQ, Wong MH. 2001. Acidification of lead/zinc mine tailings and its effect on heavy metal movility. *Environ Int*. Vol. 26, pp. 389-394.
- Smith RAH, Bradshaw AD. 1979. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes. *J Appl Ecol*. Vol. 16, pp. 595-612.
- Solís-Domínguez F.A., González-Chávez M.C., Carrillo-González R., Rodríguez-Vázquez R. 2007. Accumulation and localization of cadmium in *echinochloa polystachya* grown within a hydroponic system. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 141, pp. 630-636.
- Suárez Díaz Jaime. Control de Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones Sobre Erosión y Deslizamientos. División Editorial y de Publicaciones, Universidad Industrial de Santander. Noviembre del 2001.
- Tamás Janós, Kovács Elza. 2003. Evaluation of migration of heavy metal containing sediment resulting from water erosion using a geoinformation model. University of

Debrecen, Centre of Agricultural Sciences. Department of Water and Environmental Management. H-4032 Debrecen, Böszörményi 138. EFITA 2003 Conference. Pp. 5-9.

- Velasco Trejo Juan Bautista, De la Rosa Pérez David Alejandro, Ramírez Islas Martha Elena & Volke Sepúlveda Tania. Evaluación de Tecnologías de Remediación para Suelos Contaminados con Metales ETAPA II. Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados. Subdirección de Investigación en Sitios Contaminados y Sustancias Tóxicas. SEMARNAT. Informe Anual de Actividades 2005.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., y Cross, B.V. 1971. A soil erodability for farmland and construction sites. J. Soil and Water Conserv., Vol. 26, pp. 189-193.
- Wischmeier, W.H. 1974. New developments in estimating water erosion. Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America, SCSA, Ankeney, Iowa, pp. 179-186.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. Handbook No. 537.

# **ANEXO**



Contents lists available at ScienceDirect

# Chemosphere

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/chemosphere](http://www.elsevier.com/locate/chemosphere)



## The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico

Diana Meza-Figueroa<sup>a,\*</sup>, Raina M. Maier<sup>b</sup>, Margarita de la O-Villanueva<sup>a</sup>, Agustín Gómez-Alvarez<sup>c</sup>, Alan Moreno-Zazueta<sup>d</sup>, Jacinto Rivera<sup>e</sup>, Alberto Campillo<sup>e</sup>, Christopher Grandlic<sup>b</sup>, Ricardo Anaya<sup>e</sup>, Juan Palafox-Reyes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Geología, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora, Rosales y Encinas, 83000 Hermosillo, Sonora, Mexico

<sup>b</sup>Department of Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona, Tucson, 85721-0038, United States

<sup>c</sup>Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, División de Ingeniería, Universidad de Sonora, Rosales y Encinas, 83000 Hermosillo, Sonora, Mexico

<sup>d</sup>Departamento de Ingeniería en Minas, División de Ingeniería, Universidad de Sonora, Rosales y Encinas, 83000 Hermosillo, Sonora, Mexico

<sup>e</sup>Programa de Maestría en Ciencias-Geología, Departamento de Geología, División de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Sonora, Rosales y Encinas, 83000 Hermosillo, Sonora, Mexico

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 24 December 2008

Received in revised form 29 April 2009

Accepted 29 April 2009

Available online xxx

#### Keywords:

Efflorescence salts

Dust

Metals

Wind-dispersion

### ABSTRACT

Past mining activities in northern Mexico left a legacy of derelict landscapes devoid of vegetation and seasonal formation of salt efflorescence. Metal content was measured in mine tailings, efflorescent salts, soils, road dust, and residential soils to investigate contamination. Climatic effects such as heavy wind and rainfall events can have great impact on the dispersion of metals in semi-arid areas, since soils are typically sparsely vegetated. Geochemical analysis of this site revealed that even though total metal content in mine tailings was relatively low (e.g. Cu = 1000 mg kg<sup>-1</sup>), metals including Mn, Ba, Zn, and Cu were all found at significantly higher levels in efflorescence salts formed by evaporation on the tailings impoundment surface following the rainy season (e.g. Cu = 68,000 mg kg<sup>-1</sup>). Such efflorescent fine-grained salts are susceptible to wind erosion resulting in increased metal spread to nearby residential soils. Our results highlight the importance of seasonally dependent salt-formation and wind erosion in determining risk levels associated with potential inhalation or ingestion of airborne particulates originating from contaminated sites such as tailings impoundments. In low metal-content mine tailings located in arid and semi-arid environments, efflorescence salts could represent a human health risk and a challenge for plant establishment in mine tailings.

© 2009 Published by Elsevier Ltd.

### 1. Introduction

Past mining activities have generated large amounts of unconfined waste in Mexico. The environmental impact of such waste, specifically mine tailings, generally results from their low pH, high metal content, and the high incidence of wind- and water-driven erosion events. The impact of mining activities in arid and semi-arid regions of Mexico has received less attention than temperate regions (Ramos-Arroyo and Siebe-Grabach, 2006). Yet erosion of mine tailings in arid environments, such as found in northern Mexico, poses risk to surrounding neighborhoods in two ways: (i) the stability of the tailings may be seriously affected by intensive erosion processes or meteorological situations that can, in some cases result in partial or total collapse of the tailings structure; and (ii) airborne release of metal-laden particulates from tailings sites (Mendez and Maier, 2008).

In recent decades, there has been growing concern for the potential contribution of dust as a vehicle for metal ingestion by humans. While some trace metals (such as copper and zinc) are harmless when ingested in small amounts, other metals, notably lead and cadmium, are toxic and are potential cofactors, initiators or promoters in many diseases including cardiovascular disease and cancer even at extremely low concentrations (Nriagu, 1988). Young children are particularly vulnerable to heavy metal poisoning for two reasons. Firstly, young children are more likely to ingest non-food objects and repetitive hand/finger sucking. Secondly, children have a much higher absorption rate of heavy metals from digestion system and higher hemoglobin sensitivity to metals than adults (Nriagu, 1988).

Despite the environmental significance of airborne particulates generated from mining sites, there is a lack of exposure information for children residing in neighborhoods adjacent to such sites. This includes information concerning typical particulate composition and size as well as information concerning the deposition of particulates into soils surrounding mining sites. The latter is of

\* Corresponding author. Tel.: +52 6622 592110; fax: +52 6622 592111.  
E-mail address: [dmeza@ciencias.uson.mx](mailto:dmeza@ciencias.uson.mx) (D. Meza-Figueroa).