

9 IMPACTO AMBIENTAL

Debido a las características de poca cohesión de los depósitos de caída y de los flujos piroclásticos de TBJ, estos son muy susceptibles a las altas precipitaciones y a los movimientos sísmicos fuertes que ocurren en el país. La base de estos materiales son fácilmente erosionables por las crecidas de los ríos en la estación lluviosa, inestabilizando así los taludes que se caen dejando paredes verticales. Este proceso hace que los ríos que atraviesan materiales de la TBJ, tengan sus canales con secciones bastante anchas, como sucede en el Río Las Cañas. Estos materiales por si solos no generan impactos, pero sí, la actividad humana que se desarrolla donde estos depósitos se localizan.

9.1 EROSIÓN

El proceso erosivo en materiales poco consolidados es muy grande. La erosión se ve acrecentada cuando no existe una cobertura vegetal, rasgo muy común en el área de estudio, en la cual la ejecución de proyectos habitacionales acelera el proceso erosivo. Con las prácticas muy arraigadas de remoción de toda la cubierta vegetal y de la construcción de sistemas de terrazas sin un adecuado sistema de drenaje durante el proceso constructivo, se ha facilitado y acelerado la pérdida de grandes cantidades de suelo. Otra práctica que ha inducido la erosión está relacionada con las empresas lotificadoras en cuyos proyectos en el pasado pusieron en venta parcelas de terrenos “lotes”, sin servicios básicos, y que en el proceso de construcción de las viviendas, se fueron generando situaciones de alta erosión y de amenazas por derrumbes a las viviendas.

La figura 40 muestra un talud en ignimbrita sobre el Periférico, después de un año de haber sido conformado con una pendiente de 65 °, se observa el desarrollo incipiente de surcos de erosión.



Figura 40. Formación de surcos de erosión en taludes de ignimbritas (Unidad F) de la Tierra Blanca Joven.

La ausencia de plantas de tratamiento en los proyectos de viviendas en la década de los 70's-80's, ha traído como consecuencias el vertido de las aguas lluvias y servidas a las quebradas y ríos en la zona de Ilopango, Soyapango, Ciudad Delgado y Apopa. El problema se incrementa cuando debido al ensanchamiento y profundización de los canales de las quebradas y ríos, las tuberías de descarga de las aguas servidas gradualmente van quedando en niveles más altos. En estas condiciones, la caída de las aguas servidas adquiere más energía y comienza a erosionar la pared inferior del talud (Figura 41).

Este proceso conlleva a que la tubería de cemento se rompa y pierda por gravedad segmentos de tubos, la cabecera del talud se desestabiliza por descalce y se cae, permitiendo que el talud avance hacia la infraestructura más inmediata del proyecto y ponga en riesgo por derrumbes a las viviendas. Todo ese material derrumbado es arrastrado por el drenaje de la subcuenca del Río Las Cañas y posteriormente por la cuenca del Río Acelhuate.

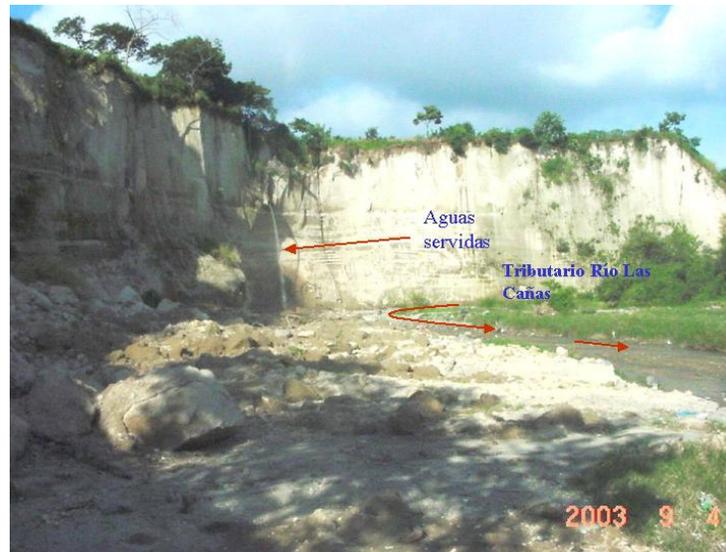


Figura 41. Los vertidos de aguas servidas socavan la parte media del talud del depósito de TBJ y las crecidas del tributario del Río Las Cañas lo hacen al pie.

9.2 ASOLVAMIENTO DE PRESAS

La mayor parte del área de estudio es drenada por el Río Las Cañas que desemboca en el Río Acelhuate. La cuenca del Río Acelhuate (583 km^2) cubre el extremo sur occidental del área. Ambos ríos erosionan y transportan volúmenes importantes de sedimentos principalmente durante la estación lluviosa, y estos sedimentos en su mayoría provienen de la TBJ. Como en la cuenca del Río Las Cañas (76 km^2) no existe estación hidrométrica para la medición de la carga de sedimentos y caudales, las mediciones se realizan en la parte más baja de cuenca del Río Acelhuate, en la estación San Diego (Desembocadura en el Río Lempa).

Un estudio de la carga de sedimentos en la estación San Diego, determinó que la carga anual por arrastre de fondo es de $98,790 \text{ m}^3$ y la carga anual de sedimentos en suspensión es de $696,625 \text{ m}^3$, constituyendo una carga anual promedio de sedimentos totales de $795,415 \text{ m}^3$ (Harza Engineering Company, 1999). Si la cuenca del Río Las Cañas ocupa 13 % del total del área por el Acelhuate, entonces, proporcionalmente el Río Las Cañas estaría aportando una carga de sedimentos promedio de $103,404 \text{ m}^3$, que llega anualmente al embalse Cerrón Grande, que en su mayoría proviene de la erosión de TBJ. Una parte de los sedimentos en

suspensión se va con la corriente y otra se sedimenta, pero toda la carga por arrastre de fondo se sedimenta disminuyendo en la capacidad de almacenamiento de agua cada año (Véase tabla No. 6).

Tabla No. 6. Carga de sedimentos de la cuenca del Río Las Cañas

CARGA DE SEDIMENTOS	
Cuenca río Las Cañas	
Tipo de sedimentos	Carga m ³ /año
Sedimentos por arrastre	12,843
Sedimentos en suspensión	90,561
Carga total de sedimentos	103,404

9.3 ANALISIS DE AMENAZAS POR DERRUMBES

En cuanto a las amenazas cuyo origen se relaciona con los procesos dinámicos externos, se puede decir que los factores condicionantes como las características de los materiales volcánicos (poco consolidados) y la morfología de la zona de estudio, dan lugar a importantes problemas de estabilidad en las laderas donde aflora TBJ.

Factores condicionantes. Las propiedades geomecánicas de los materiales íntimamente relacionadas con los depósitos, las características morfológicas y geométricas de las laderas, y la existencia de estratos geológicos en zonas proclives a los taludes, son condicionantes para la predisposición a la inestabilidad. Respecto a su incidencia en el comportamiento mecánico del terreno, los factores o agentes que controlan los movimientos de ladera pueden agruparse en aquellos que contribuyen a reducir la resistencia al corte y aquellos que incrementan el esfuerzo cortante en el terreno.

Factores desencadenantes. Entre los principales factores desencadenantes de los deslizamientos y derrumbes se encuentran las precipitaciones y los terremotos. Los movimientos de ladera inducidos por precipitaciones intensas ocurren frecuentemente en las laderas de TBJ, estos movimientos se pueden apreciar mejor en los canales de los ríos y quebradas de los municipios de Soyapango e Ilopango, que es donde la mayor peligrosidad a la ocurrencia de derrumbes podrían impactar a un gran número de personas. Otro factor que se suma a los anteriores es el antrópico; las actividades como la deforestación, edificaciones habitacionales, construcción de carreteras, extracción de áridos en los lechos de ríos y quebradas, excavaciones en zonas de ladera y la modificación de los regímenes hidrológicos de las laderas entre otros, alteran el equilibrio natural de los terrenos.

Vulnerabilidad. En cuanto a las condiciones de vulnerabilidad se considera que la vulnerabilidad física y económica, son las de mayor influencia en el área de estudio. Las condiciones de pobreza extrema de muchas familias de la zona, ha dado lugar al establecimiento de muchos asentamientos humanos en zonas de alto riesgo por derrumbes de tierra. Gran parte de los asentamientos se encuentran localizados, en la cabecera de los taludes (Figuras 42 y 43). Un caso particular, es el asentamiento a lo largo de toda la línea férrea abandonada debido a la inactividad del sistema ferroviario desde los inicios de la década de los 80's.

Caso Comunidad 3 de Enero. Esta comunidad está ubicada sobre el “Área de Servidumbre” de la línea férrea en el margen izquierdo del Río Las Cañas. Una bóveda que canalizaba aguas lluvias quedó parcialmente obstruida por basura y sedimentos. La bóveda descargaba las aguas en una quebrada que estaba en nivel superior al del Río Las Cañas. La bóveda al parecer sufrió daños por los terremotos del 2001. La erosión regresiva producida por el desnivel entre la quebrada y el Río Las Cañas, poco a poco alcanzó a la bóveda hasta que empezó a socavar el



(Foto cortesía de EERI)



▲ Figura 43. Viviendas en la cabecera del talud sobre la Autopista San Salvador a San Miguel.

◀ Figura 42. Vista aérea del municipio de Ilopango y aspecto de la densidad demográfica y construcciones en los bordes superiores de las laderas de TBJ.

lugar de apoyo de la estructura. La erosión continuó hasta que en la estación lluviosa del año 2002, en el mes de julio se cayó el talud con 5 viviendas y la línea del tren quedó en el aire (Figura 44). Con este evento se cortó la comunicación entre esa comunidad. No hubo víctimas mortales ya que toda la gente había sido evacuada en horas de la noche del 13 de enero de 2001.

9.4 MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACION

Las medidas de prevención están normalmente enfocadas a evitar que se manifieste un evento que pueda causar daño a la población. En este sentido se proponen varias medidas de prevención contra derrumbes en la zona de estudio:

▫ Conformación de taludes mediante terrazas escalonadas con canaletas para drenajes. Los taludes deben protegerse por medio de plantado de gramíneas o empleando geomembranas que impedirán la erosión y la formación de cárcavas.



Figura 44. Derrumbe en la Comunidad 3 de Enero. a) vista de la parte colapsada con tubo de vertidos residuales en nivel bastante superior al fondo del derrumbe. La bóveda está soterrada. b) comunicación perdida entre la comunidad por la caída del talud y destrucción de la línea férrea.

▫ En el caso de ríos y quebradas, es conveniente incluir la construcción de gaviones para disminuir la erosión regresiva que causan las corrientes de agua al pie de las laderas a las que desestabilizan. Este tipo de obras necesita contar con mantenimiento para no dar lugar al desarrollo de alguna superficie de erosión que vulnere el talud. Esta práctica ayudará a reducir el escenario de riesgo para los asentamientos.

▫ Es importante mencionar que debido a lo avanzado del proceso de degradación y la compleja situación actual de los asentamientos, probablemente se requiera de una fuerte inversión, por lo que no resulta fácil implementar algunas de estas medidas propuestas. Pero al mismo tiempo es necesario recalcar que el peligro está latente expresándose en un escenario de alto riesgo en la zona.

▫ Las medidas de mitigación se implementan principalmente a través del ordenamiento físico de los asentamientos, la planificación agrícola o de infraestructura, programas de educación y de organización comunitaria. Una medida de mitigación importante es impedir que las empresas lotificadoras vendan terrenos sin servicios básicos, y que se incluya el análisis de reducción de riesgo para el otorgamiento de Permisos Ambientales; lo mismo es válido para las empresas constructoras cuyos proyectos habitacionales sean seguros desde la perspectiva de construcción sismorresistente y con las medidas de prevención necesarias por las amenazas de derrumbes.

▫ Adicionalmente se pueden implementar programas de información y capacitación a la población que vive en esas zonas para que participe en programas comunitarios de reducción de riesgos, de manera que la comunidad pueda organizarse y tomar sus propias decisiones en situaciones extremas, como tormentas intensas y lluvias prolongadas para evitar desastres, mientras no lleguen las instituciones de emergencias.

10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La secuencia piroclástica de la Tierra Blanca Joven (TBJ) está compuesta por 8 unidades vulcanológicas, las que son complejas debido a la conjugación de varios factores: cambios granulométricos dentro de cada unidad, diferentes procesos eruptivos, mecanismos de deposición y cambios abruptos de espesores producidos por los flujos piroclásticos. Tal complejidad, se refleja en los cambios de los parámetros físicos y mecánicos que hace que una misma unidad presente cierta dispersión de valores en sus parámetros. Por tanto, el número de ensayos obtenidos en el presente trabajo es limitado para una caracterización geomecánica de las unidades de TBJ. Para una caracterización completa es necesario contar con mayor número de muestras por cada unidad y disponer de una distribución espacial de nuevos puntos de muestreo.
- Las ocho unidades identificadas fueron analizadas por sus características del proceso eruptivo, dureza, espesor, propiedades físicas y mecánicas; las que se reagruparon de acuerdo a las características similares y se definieron cuatro unidades geotécnicas de la TBJ, denominadas de la base hacia el techo: Unidad I que incluye las unidades vulcanológicas A, B y C; la Unidad II comprende la Unidad D, Unidad III comprende la E y las ignimbritas Alfa, Beta y F, la Unidad IV corresponde a la G. De estas unidades geotécnicas, la Unidad III, es la que mejores propiedades geomecánicas presenta para la estabilidad de taludes.
- Los resultados de los análisis granulométricos por el método mecánico y del hidrómetro, indicaron a excepción de la Unidad D (ML), que las unidades se clasifican como limos arenosos (MS) o arena limosa (SM), con componentes granulométricos de grava y arcilla no plástica. Los ángulos de rozamientos varían entre 25.57° y 38.15° y los valores de cohesión en general son más bajos cuando los depósitos están más lejos del borde caldérico (0.032 t/m^2 en la Unidad G y 0.062 t/m^2 en D) y los más altos están más cerca de la fuente de emisión con 1.615 t/m^2 (Unidad E). La gravedad específica presentó variaciones de Gs: 2.306 a 2.597 y los

valores más altos corresponden a la Unidad E. El peso unitario seco más bajo correspondió la unidad D con 1.156 t/m^3 (zona norte) y el más alto a D con 1.491 t/m^3 (zona sur).

- La Unidad G está en el techo de la secuencia de TBJ y es donde se asienta la mayor parte del AMSS, por tanto, es la unidad que mayor número de ensayos de laboratorios de suelos ha tenido y que mejor se conoce en El Salvador desde el punto de vista geotécnico. El carácter estratificado y su espesor dentro del área varía de 15 m a 1.5 m, producen diferencias mecánicas importantes en los distintos niveles, y tales variaciones generan cierta dispersión de valores de sus parámetros.
- Los flujos piroclásticos de la TBJ de la unidad F son masivos e isótropos, poseen grandes volúmenes, espesor conjunto del orden de 15 a 20 m y con desplazamiento de 37 km, tienen altas características friccionantes, sin embargo, el ángulo de fricción interna aún queda indefinido. Por su granulometría gruesa es conveniente que se hagan pruebas de corte directo “in situ”. Por la ubicación estratigráfica y las características anteriores, desde el punto de vista vulcanológico y geomecánico; es la unidad más importante de toda la secuencia de TBJ.
- La unidad D en la zona intermedia y distal posee la granulometría más fina, carece de finos plásticos, no posee ningún tipo de cemento, es deleznable, está formada por partículas bastante uniformes, y reporta los valores de cohesión más bajos ($0.06\text{-}0.08 \text{ kg/cm}^2$). Esta unidad es la que presenta las propiedades mecánicas menos adecuadas para la estabilidad de taludes y por tener la granulometría más fina y espesor importante, se asocia al evento más explosivo de la erupción de TBJ y cuyos productos espacialmente están ampliamente distribuidos.
- Los suelos de TBJ, poseen ciertas propiedades como la microfábrica, la succión y la cementación, que operan de manera conjunta en estos suelos volcánicos. Cada una de esas propiedades individualmente tiene un nivel de influencia en dichos suelos, en unos actúan mejor que en otros.

- La cementación produce cambios físicos y mecánicos en los suelos, reduciendo la porosidad, la relación de vacíos e incrementa el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna y la dureza de los suelos.

- Sobre los suelos compuestos por ignimbritas masivas e isotropas que forman taludes, operan los procesos de intemperismo físico que dan lugar a la formación de discontinuidades paralelas a la cara del talud, que se manifiestan como fisuras y grietas verticales que los separan en bloques. El carácter isotrópico de las ignimbritas permite que se genere la exfoliación que es el mecanismo que gobierna la ruptura de esos materiales, y cuando sufren la acción de detonantes como la lluvia y sismos fuertes se produce el derrumbe. En las ignimbritas de matriz gruesa las rebanadas son anchas (decenas de centímetros), mientras que las rebanadas en la ignimbritas finas son delgadas (centimétricas). Debido a estas características, los taludes de las ignimbritas de TBJ se comportan como un macizo rocoso, produciendo derrumbes por vuelco (toppling).

- En la Unidad G, el mecanismo de ruptura es más complejo por la influencia de las ignimbritas intercaladas con depósitos de caída de cenizas de grano fino y relativamente uniforme, en la que la estabilidad parece depender del grado de saturación alcanzado por alguno de los depósitos de caída de cenizas dentro de la secuencia.

- En cuanto al proceso de erosión, debido a que los suelos de los depósitos de TBJ son poco cohesivos, favorecen al proceso erosivo de las lluvias. La erosión del pie de los taludes de los ríos producido por las crecidas, desestabiliza grandes masas de suelo que son removidas por las mismas corrientes de agua. En estas circunstancias, el Río Las Cañas transporta una carga anual de arrastre de fondo de $12,843 \text{ m}^3$, y una carga por suspensión de $90,561 \text{ m}^3$, totalizando una carga de sedimentos promedio de $103,404 \text{ m}^3$, que anualmente llega al embalse Cerrón Grande.

- La caída de taludes en Soyapango e Ilopango, se ha incrementado por el aumento de edificaciones de vivienda popular. Las tuberías de descargas de vertidos residuales y drenajes de aguas lluvias los instalan en la parte media de taludes altos. El agua descargada produce erosión regresiva en los taludes, desestabilizando la porción superior que se cae al perder el apoyo, de este modo, los taludes avanzan hacia las casas más cercanas y ponen en peligro por derrumbes a los habitantes.
- La Unidad Geotécnica IV por tener depósitos de caída de cenizas fácilmente erosionables, sus taludes son más estables con pendientes menores de 45° y los taludes de la Unidad III son estables aún con pendientes mayores que 45° . En ambos casos es conveniente que sean diseñados con drenajes adecuados, protegidos con grama o zacate estrella o barrenillo contra la erosión y contra el proceso de exfoliación.
- Sería conveniente la elaboración del mapa de isopacas para las Unidades Geotécnicas de la TBJ y para el conjunto de los depósitos de TBJ, TB2, TB3, G1 y TB4, que servirían entre otros, para el estudio de la caracterización de amenazas y de microzonificación sísmica del AMSS.

11 REFERENCIAS

- ANDA- Asociación Nacional de Acueductos y Alcanterillados (1984). Inventario Nacional de pozos de Agua.
- Annual Book ASTM Standar (2000). Section 4. Construction, volume 04.08 Soils and rocks(1).
- Bommer J, J., Rolo R. y Fernández P.(1998). Propiedades Mecánicas de la Tierra Blanca y la Inestabilidad de Taludes. Revista ASIA, No. 129, El Salvador.
- Bommer J.J., Rolo R., Mitroulia A., and Berdousis P. (2001). Geotechnical Properties and seismic Slope stability of volcanic Soil. Elsevier Science Ltd. 12th European Conference on Earthquake Engineering.
- Bommer J.J. and Rodriguez, C. (2003). Earthquake-induced landslides in Central America. Engineering Geology and International Journal. Geologic and Engineering Characterization of Tierra Blanca Pyroclastic Deposits. Imperial College London.
- Consorcio Salvador e. Italtekná Itáconsult-Geotérmica Italiana (1988). Estudio vulcanológico. San Salvador-Programa di Ricostruzione. Republica Italiana, Ministero degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo. Ministerio de Obras Públicas. Informe Inédito.
- Dull R.A.; Southon J.R. and Sheets P. (2001). Volcanism, Ecology and Culture: A reassessment of the volcan Ilopango TBJ eruption in the Southern Maya Realm. Latin American Antiquity Vol. 12 Number 1, Society for American Archeology.
- Geotérmica Italiana (1992). Desarrollo de los Recursos Geotérmicos del Area Centro-Occidental de El Salvador. Informe Final. CEL-Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. El Salvador. Informe inédito.
- Goodyear, w. A. (1880). Earthquake and volcanic phenomena. December 1879 and January 1889 in the Republic of Salvador, Central America. Star & Herald Office. Panamá. 56 pages.
- González, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall. España. 715 pg.

- Guzmán M.A., y Melara E., (1996). Propiedades Ingenieriles del Suelo del Area Metropolitana de San Salvador, El Salvador, C.A. Revista ASIA. No. 122. El Salvador.
- Juárez, B., y Rico A., Mecánica de Suelos (1986). Teoría y Aplicación de la Mecánica de Suelos. Tomo II. Editorial Limusa, México.
- Hart, W. (1981). The Panchimalco Tephra, El Salvador, Central America. A Thesis of Master Degree. New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey. USA.
- Hart, W. (1983). Classic to Postclassic tephra layers exposed in Archeological sites, Eastern Zapotitan Valley. Pages 44-51.
- Hart, W.J., and Steen McIntyre, V., (1983). Tierra Blanca Joven Tephra from the AD 260 Eruption of Ilopango Caldera: in Archeology and Volcanism in Central America. University of Texas Press, Austin, Texas, p. 14-34.
- Harza Engineering Company International (1999). Estudio Global de la sedimentación en la cuenca del Río Lempa. Apéndice A: Arrastre de Sedimentos. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del río Lempa-CEL. El Salvador.
- Marroquín G., Hernández W., Pullinger C., (2003). Seismicity and Tectonic of El Salvador. Servicio Nacional de Estudios Territoriales-SNET. El Salvador. Informe inédito.
- Martí, J., Pujadas, A., Ferrés, D., Planaguma, Ll. y Mallorca, J.M. (2000). El vulcanismo. Guía de campo de la zona volcánica de la Garrotxa. Olot-Girona, España. Parque Natural de la Zona Volcánica de la Garrotxa.
- MARN-Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Primer informe parcial del diagnóstico del sistema urbano y población. Demografía e Información Básica Municipal. Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano. Informe inédito.
- Rolo R., Bommer J., Houghton B., Vallance J., Berdousis P., Mavrommati Ch., and Murphy W. (2004). Geologic and Engineering characterization of Tierra Blanca pyroclastic ash deposits. Imperial College London. In Natural Hazards in El Salvador. The Geological Society of America. Special paper 375.

- Rose, W., Conway, F. M., Pullinger, C.R., Deino, A., and McIntosh, W.C. (1999). An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America: *Bulletin of Volcanology*, v. 61. p. 106-120.
- Schmidt-Thome, M. (1975). The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning. Pg 207-228. Hannover.
- Sheets, P.D. (1983). Archeology and Volcanism in Central America. The Zapotitan Valley of El Salvador. University of Texas Press Austin.
- Sofield, J. D., (1998). History Hazards of Volcan San Salvador, El Salvador. Michigan Technological University. Thesis Master Science.
- SRH- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1967). Mecánica de Suelos. Instructivo para Ensayo de Suelos. México.
- Stoiber R.E., and Carr, M.J., (1973). Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America: *Bulletin of Volcanology*, v. 37.
- Vallance J., and Houghton B. (1998). The AD 260 eruption at Lake Ilopango, El Salvador: A complex explosive eruption through a caldera lake. National Science Foundation, Research Proposal.
- William H., and Meyer-Abich H. 1953. El origen del Lago de Ilopango: *Comunicaciones del Instituto Tropical Investigaciones Científicas* v. 26; p. 1-8.
- Zimmerman, R. (2004). Características Meteorológicas y topográficas de la zona Metropolitana de San Salvador. Unidad CINAGRO-SNET.