

TEMA III: Ingeniería hidráulica.

III.1.- Antecedentes

El proyecto de Sustitución del tramo de tubería entre los kilómetros 68+000 al 88+000 del Gasoducto Existente de 48" Ø Cempoala-Santa Ana, en la ciudad de Xalapa, estado de Veracruz, cruza durante su desarrollo algunos arroyos de régimen intermitente así como el Río Sedeño, motivo por el cual se requiere llevar a cabo el Estudio Hidrológico de los escurrimientos superficiales que inciden en el trazo del proyecto en cuestión, para estimar los Gastos de Diseño asociados a un periodo de retorno, que serán utilizados para definir las características del proyecto de cruce con cada una de las corrientes fluviales que cruzará el gasoducto en su nueva ruta.

III.2.- Datos Disponibles

Topográficos

Para la realización del estudio se dispuso de las cartas topográficas Perote E14B26, Xalapa E14B27, y Coatepec E14B37, escala 1:50,000, así como de la carta Veracruz E14-3, escala 1:250,000 editadas por el INEGI, adicionalmente se contó con la restitución aerofotogramétrica del vuelo llevado a cabo en la zona de estudio.

Hidrométricos

Dadas las características de las corrientes que se presentan en la zona en estudio, las cuales son en su mayoría de régimen intermitente, en el área de estudio no existen estaciones hidrométricas por lo que no se dispone de datos de aforo.

Climatológicos

Se identificaron las siguientes estaciones climatológicas con pluviómetro, que proporcionan información de las precipitaciones que se presentan en 24 horas: La Tembladera, Jico; Las Animas, Xlalpa; Los Pescados, Perote; Tembladeras, Jico; Emiliano Zapata; Las Vigas, Las Vigas; Xalapa, Enriquez; La Concepción, Jilotepec y Miradores, Zapata, de éstas las que tienen influencia directa con el trazo del gasoducto son La Tembladera, Las Vigas y La Concepción; que disponen de información de los periodos 1965-1990, 1961-1990 y 1974-1989, respectivamente, en tanto que en la ciudad de Xalapa opera un observatorio meteorológico (Xalapa, Enriquez) que proporciona información de las precipitaciones totales anuales, máximas en una hora, máximas en 24 horas, así como los pluviogramas de las tormentas que se han presentado durante el periodo de observación, en tres periodos de observación: 1961-1980, 1991-1997 y 2000-2004.

Tabla III.2.1
Estaciones Climatológicas (Servicio Meteorológico Nacional).

| Estación | Clave | Estado | Latitud | Longitud | Periodo de Registro |
|-----------------|--------------|---------------|----------------|-----------------|----------------------------|
| LA TEMBLADERA | 30085 | VERACRUZ | 19.52 | 97.1 | 1964 - 1990 |
| LAS ANIMAS | 30087 | VERACRUZ | 19.53 | 96.92 | 1961 - 1989 |
| LOS PESCADOS | 30097 | VERACRUZ | 19.63 | 97.13 | 1964 - 1990 |
| TEMBLADERAS | 30175 | VERACRUZ | 19.5 | 97.12 | 1965 - 1989 |
| EMILIANO ZAPATA | 30195 | VERACRUZ | 19.48 | 96.78 | 1964 - 1990 |
| LAS VIGAS | 30211 | VERACRUZ | 19.65 | 97.1 | 1961 - 1990 |
| JALAPA ENRIQUEZ | 30228 | VERACRUZ | 19.53 | 96.92 | 1961 - 1981 |
| MIRADORES | 30241 | VERACRUZ | 19.47 | 96.77 | 1972 - 1989 |
| LA CONCEPCIÓN | 30267 | VERACRUZ | 19.6 | 19.74 | 1974 - 1990 |

Esta información fue recopilada directamente en el Servicio Meteorológico Nacional, en sus instalaciones en la ciudad de México.

III.3.- CLIMATOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

CLIMA

De acuerdo a las características orográficas, de altitud y de latitud, los climas que se presentan en la Zona Conurbada corresponden a los tipos: Clima Frío-Húmedo con escalas de oscilación térmica-E(t) en el municipio de Banderilla; Clima Templado-Regular-C(w) en Coatepec; Clima Templado-Húmedo con lluvias todo el año-C(fm)w"b(i)g en los municipios de Xalapa y Tlalnelhuayocan; Cálido-Húmedo-(A)C(fm)(w")a(i)g y Cálido-Seco-Regular-(A)C(w")a(e)g en el municipio de Emiliano Zapata. Estos datos están basados en la clasificación de Köppen adecuada por Enriqueta García para México.

La Zona en estudio presenta similitud en cuanto a sus características climáticas debido a su altitud, sin embargo entre un municipio y otro existen algunas variantes. El clima que se registra en el municipio de Banderilla es frío-húmedo con escalas de oscilación térmica, lluvias abundantes en verano y principios de otoño, precipitación media anual próxima a los 1,500 mm. Durante el invierno esporádicamente corren vientos fríos provenientes del norte y del este. En el municipio de Coatepec el clima es templado-regular y se observa que la temperatura media anual es de 19.2° C, las lluvias son abundantes en verano y principios de otoño, y con menor intensidad en el resto del año. Su precipitación media anual es de 1,926 mm. El municipio de Emiliano Zapata por su extensión longitudinal contiene más variedad climática. En su porción occidente el clima es cálido-húmedo y hacia el oriente, cálido-seco-regular. La temperatura media anual para el total del desagregado es de 20.6° C. Se registran lluvias abundantes en verano y principios de otoño con escasa precipitación en la fracción semi-árida del municipio, la precipitación pluvial es de 884 mm. Presenta un periodo prolongado de sequía El municipio de Tlalnelhuayocan es templado-húmedo con temperatura media anual de 18°C, lluvias abundantes en verano y principio de otoño, y precipitación pluvial de 1500 mm. Existe similitud entre Tlalnelhuayocan y Xalapa en cuanto a la temperatura media anual y el clima. La temperatura desciende notablemente en invierno debido a los vientos fríos que provienen del norte y del este. Presenta lluvias abundantes en verano y principio de otoño con menor intensidad en el resto del año. La precipitación media anual para este municipio es de 1378 mm.

Tabla III.3.1 Climatología (Servicio Meteorológico Nacional).

| Tipo Climático | Temperatura Mínima | Temperatura Máxima | Temperatura Promedio |
|--------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Clima Frío-Húmedo con escalas de oscilación térmica- E(t). | 2° C | 18° C | 11° C |
| Clima Templado-Regular- C(w) . | 11° C | 19.2° C | 17.5° C |
| Clima Templado-Húmedo con lluvias todo el año- C(fm)w"b(i)g. | 14.9° C | 20.4° C | 18.0° C |
| Cálido-Húmedo -(A)C(fm) (w")a(i)g; | 15.5° C | 21.6° C | 19° C |
| Cálido-Seco-Regular -(A)C(w")a(e)g. | 16.8° C | 24.0° C | 20.7° C |

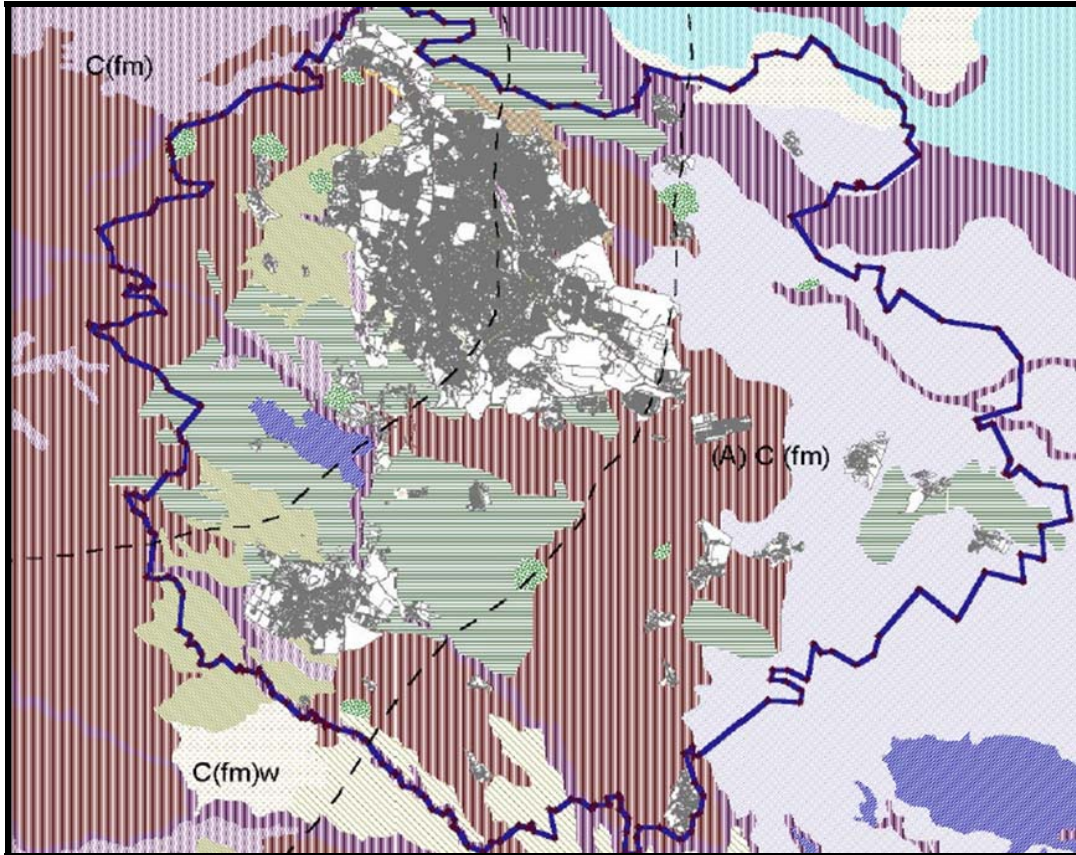


Figura III.3.1: Características climáticas de la zona de estudio (Libro de Proyecto, PEMEX GAS).

TEMPERATURA

De cada una de las estaciones seleccionadas en el apartado III.3 CLIMATOLÓGICOS, se analizó la información disponible en lo relativo a temperaturas de la siguiente manera:

TEMPERATURA MENSUAL

El Servicio Meteorológico Nacional proporciona temperaturas observadas diariamente durante el periodo de observación de las estaciones; de este universo de datos se obtuvo el promedio mensual por año de cada estación que se consideró tiene influencia en el área de estudio. Los promedios mensuales calculados para cada estación se muestran en las tablas de la No. III.3.ANX-B.1.1 a la No. III.3.ANX-B.1.9 y en la tabla No. III.3.ANX-B.1.10 (Ver Anexo B) se incluye el resumen de los resultados obtenidos para cada estación

En los datos que proporcionan las tablas se puede observar que las temperaturas medias mensuales más bajas en la zona de estudio, se presentan en las estaciones localizadas al oeste de la ciudad de Xalapa, cercanas al Cerro Cofre de Perote a elevaciones que oscilan alrededor de los 3000 m.s.n.m., estas estaciones corresponden a Tembladeras, Jico; La Tembladera, Jico; Los Pescados, Perote; y Las Vigas, Las Vigas, las que presentaron temperaturas de 4°C en el mes de enero y de 12°C en el mes de mayo.

Las temperaturas medias mensuales más altas se presentaron en las estaciones de Las Animas, Xalapa; Xalapa Enríquez; y Miradores Zapata, localizadas, las dos primeras en la zona urbana de la ciudad de Xalapa y la última a unos 4 kilómetros de la localidad El Lencero por la carretera federal No. 140 con dirección a Ciudad Cardel; en estas estaciones se presentaron las temperaturas medias mensuales más bajas en los meses de enero y febrero de 13 y 14 grados celsius, en tanto que las mas altas se presentaron en los meses de mayo y junio arrojando valores de 23 y 22 grados centígrados; mientras que en la estación Concepción,

Jilotepec, localizada sensiblemente al norte de la ciudad de Xalapa, se obtuvieron valores muy semejantes al grupo de estaciones anterior, para los meses fríos de 13 grados centígrados en diciembre y enero, pero en el mes más caluroso la temperatura promedio fue de 19 grados centígrados en el mes de mayo.

TEMPERATURAS MÁXIMAS

Las temperaturas máximas diarias registradas en las estaciones consideradas en este estudio se procesaron, identificándose las máximas por mes y por año, durante todo el periodo observado en cada estación estudiada. Los valores obtenidos para cada estación se muestran en las tablas No. III.3.ANX-B.2.1 a la III.3.ANX-B.2.9. (Ver Anexo B). De la información contenida en tablas se puede observar que las temperaturas máximas se han presentado en las estaciones Las Animas, Xalapa; Xalapa, Enríquez; Emiliano Zapata y Miradores Zapata, las que resultaron de 40 grados centígrados en el mes de mayo, en las dos primeras estaciones 42 en el mes de abril en la tercera y de 39 en los meses de marzo, abril y julio para la estación de Miradores, en tanto que en la estación La Concepción, Jilotepec, la temperatura máxima de 38 grados centígrados se presentó en el mes de mayo. En el resto de las estaciones las temperaturas máximas oscilaron en los meses más calurosos entre los 23 y los 34 grados centígrados

TEMPERATURAS MÍNIMAS

De forma semejante al tratamiento que se dio a la información recabada, relativa a las temperaturas máximas analizadas en el apartado anterior, se procedió para el caso de las temperaturas mínimas observadas en las mismas estaciones en estudio, generándose para este caso las tablas No. III.3.ANX-B.3.1 a la III.3.ANX-B.3.9 (Ver Anexo B) para el estudio de las temperaturas mínimas por estación. Del conjunto de información analizada se desprende lo siguiente: las estaciones ubicadas en elevaciones del orden de los 3000 m.s.n.m., tales como La Tembladera, Jico; Los Pescados, Perote; Las Tembladeras, Jico; y Las Vigas, Las Vigas, reportaron las temperaturas mínimas más bajas que oscilan entre los - 8 grados centígrados en el mes de marzo en la estación Las Vigas y 2 en los meses de julio y agosto en la estación de La Tembladera y en el resto oscilaron entre los cero y los 17.5 grados centígrados, presentándose las más altas en la estación Emiliano Zapata.

PRECIPITACIÓN

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento que presenta la precipitación en la zona de estudio se procedió al análisis de la información obtenida en el Servicio Meteorológico Nacional, relativa a las precipitaciones en 24 horas, registradas durante su periodo de observación. Esta información se procesó para obtener la precipitación media mensual, así como la lámina total anual de cada año analizado. Los resultados obtenidos de este análisis para cada estación considerada se muestran en las tablas No. III.3.ANX-B.4.1 a la III.3.ANX-B.4.9 (Ver Anexo B).

Los resultados obtenidos muestran que las máximas precipitaciones se presentan en las estaciones localizadas en la vertiente orientada hacia el Golfo de México, como en la Estación La Tembladera que registra una precipitación promedio de 1629 mm durante el periodo de observación de 26 años; las estaciones Las Animas y Xalapa ubicadas alrededor de la elevación 1400 m.s.n.m. registraron precipitaciones promedios de 1295 y 1378 mm, en tanto que en la Estación Emiliano Zapata, la más cercana al área de proyecto de la Estación de Compresión Emiliano Zapata se registró una precipitación promedio de 884 mm en un periodo de observación de 24 años.

EVAPORACIÓN

El fenómeno de la evaporación presenta un comportamiento inverso al de la precipitación, o sea que en las partes altas se presentan las evaporaciones más bajas, del orden de los 700 mm en la Estación La Tembladera y van aumentando hasta los 1042 mm en la Estación Emiliano Zapata. Los datos particulares de las evaporaciones promedios procesados por mes,

por año y por estación se muestran en las tablas No. III.3.ANX-B.5.1 a la III.3.ANX-B.5.9 (Ver Anexo B).

III.4.- PROCESAMIENTO DE DATOS

ANÁLISIS DE LLUVIAS

En cartas topográficas escala 1:50,000 editadas por el INEGI, se ubicó el tramo de gasoducto de 48" D.N. y se procedió a identificar la cuenca hidrológica que incidiría a través de sus corrientes superficiales directamente sobre el trazo de sustitución, motivo de este proyecto. Una vez identificada la cuenca se localizaron las estaciones climatológicas que tienen influencia en el régimen de lluvias de la zona en estudio

El tramo de sustitución del gasoducto de 48" D.N. del kilómetro 68+000 al 88+000, se localiza sensiblemente al norte de la ciudad de Xalapa, está incluido en la Cuenca del Río Actopan la que a su vez se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 28, de acuerdo con la división en 37 regiones hidrológicas que considera la Dirección de Hidrología de la extinta S. A. R. H., En el área de estudio que afecta al proyecto de sustitución del gasoducto se identificaron tres estaciones climatológicas con pluviómetro: La Tembladera, Las Vigas y La Concepción, y un observatorio meteorológico ubicado en la ciudad de Xalapa. Como no se dispone de estaciones hidrométricas en el área de interés, el análisis hidrológico se llevará a cabo a través de un Estudio Regional de Lluvias que involucre conocer su frecuencia, distribución y relación con el escurrimiento

Por lo tanto, primero se procederá a analizar las lluvias máximas anuales en 24 horas registradas con pluviómetro en las Estaciones de La Tembladera, Las Vigas y La Concepción, mismas que permitirán conocer la distribución de las tormentas puntuales analizadas en pluviógrafo para definir el modelo de tormenta Del total de precipitaciones máximas en 24 horas registradas en estas estaciones, se seleccionarán las más desfavorables, se ordenarán de mayor a menor y se les asignará su respectivo período de retorno.

Por otra parte, de la información que proporciona el Observatorio Meteorológico de Xalapa, relativa a los pluviogramas de las tormentas que se han presentado durante su período de observación, se seleccionaron los correspondientes a las tormentas más desfavorables que se han presentado; de cada pluviograma se formó la curva masa de la tormenta y una vez integrada dicha curva, se calcularon las precipitaciones máximas que se presentaron durante la tormenta para dos grupos de duraciones: un primer grupo para duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 minutos y un segundo grupo de duraciones para 2, 6, 12, 18 y 24 horas. Esta información se ordenó de mayor a menor y se asoció con su respectivo período de retorno, finalmente estas precipitaciones máximas se trasladaron a su equivalente como intensidades máximas de lluvia.

Este conjunto de precipitaciones máximas para diferentes duraciones reflejan el comportamiento de las lluvias en relación con el tiempo; se considerará la forma en que se presentan en el área de influencia del Observatorio Meteorológico de Xalapa y se asimilarán a los valores de las precipitaciones máximas en 24 horas que se registran en las estaciones climatológicas con pluviómetro, relacionando el período de retorno de las tormentas seleccionadas del observatorio con el correspondiente período de retorno de las precipitaciones máximas en 24 horas seleccionadas en las estaciones climatológicas de La Tembladera, Las Vigas y La Concepción.

A continuación se muestran las tablas III.4.ANX-B.1 a la III.4.ANX-B.4 (Ver Anexo B) que contienen las precipitaciones e intensidades para duraciones desde 10 minutos hasta 2 horas y de 2 a 24 horas obtenidas de la información registrada en el Observatorio Meteorológico de Xalapa, Ver.

Por otra parte, de la información registrada en la Estaciones Climatológicas La Tembladera, Las Vigas y La Concepción, relativa a las precipitaciones máximas en 24 horas, se seleccionaron las correspondientes a las tormentas más desfavorables en el período de 1964 a 1990, 1961-1990 y 1974-1990, respectivamente, se ordenaron de mayor a menor y se les asignó su período de retorno, y se calcularon las intensidades máximas para los períodos de

retorno considerados en las tablas III.4.ANX-B.2 y III.4.ANX-B.4 (para duraciones de 10 a 120 minutos y de 120 a 1440 minutos) en el Observatorio Meteorológico Xalapa, Ver. tal como se muestra en las tablas III.4.ANX-B.5 A la III.4.ANX-B.10. (Ver Anexo B).

Con la información anterior se calcularon las precipitaciones máximas y sus correspondientes intensidades para duraciones de 10 a 120 minutos y de 120 a 1440 minutos para las Estaciones, La Tembladera, Las Vigas y La Concepción considerando la forma de las tormentas registradas en el pluviógrafo del Observatorio Meteorológico Xalapa, Ver., (tablas III.4.ANX-B.1 a III.4.ANX-B.4), con lo que se generaron las tablas III.4.ANX-B.11 a la III.4.ANX-B.16 (Ver Anexo B).

CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO

La única manera de acotar un evento de diseño de una estructura hidráulica, cuando el análisis se apoya en los registros de lluvia, es a través del conocimiento de la variación de las características de las tormentas en relación con su período de retorno.

Como los pluviógrafos registran en forma continua la variación de la altura de lluvia respecto al tiempo, son sus registros los que permiten realizar un análisis más completo del comportamiento del fenómeno, deduciéndolo por medio de las curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno, las cuales requieren del conocimiento de la variación de la altura de lluvia respecto a intervalos de duración constante. Las condiciones más críticas de altura de lluvia-duración para duraciones de 10 a 120 minutos y de 120 a 1440 minutos (TABLAS DE INTENSIDADES MÁXIMAS) ya fueron calculadas en las tablas III.4.ANX-B.2, III.4.ANX-B.4, III.4.ANX-B.11, III.4.ANX-B.14 y III.4.ANX-B.16 (Ver Anexo B), las dos primeras para el Observatorio Meteorológico de Xalapa y las tres siguientes para las Estaciones Pluviométricas de La Tembladera, Las Vigas y La Concepción.

Para determinar las curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno, se requiere obtener la curva que proporciones el mejor ajuste entre los diversos grupos de valores de la intensidad de lluvia, su duración y sus períodos de retorno. Se ha encontrado que el modelo que relaciona estas variables es de la forma:

$$I = \frac{K \times t^h}{d^g}$$

En donde:

| | |
|-----------|-----------------------------------------|
| I, | Intensidad de la lluvia |
| K, h y g, | Parámetros que dependen de la localidad |
| d, | Duración de la tormenta |
| t, | Período de Retorno |

La obtención de los parámetros K, h y g requieren de la aplicación de un análisis de regresión múltiple para resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} N & \sum X1_i & \sum X2_i \\ \sum X1_i & \sum X1_i^2 & \sum X1_i \times X2_i \\ \sum X2_i & \sum X1_i \times X2_i & \sum X2_i^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum Y_i \\ \sum X1 \times Y_i \\ \sum X2 \times Y_i \end{pmatrix}$$

En donde:

- N = número de valores desde X1 hasta Xn, Y, y las sumas desde i=1 hasta i=N
- a₀ = log K
- a₁ = h
- a₂ = g

El sistema de ecuaciones encontrado para las condiciones más críticas para duraciones de 10 a 120 minutos para el Observatorio Meteorológico Xalapa, Ver. Con la información contenida en la tabla III.4.ANX-B.2 (Ver Anexo B) es el siguiente

$$\begin{pmatrix} 324 & 127.318066 & 558.369098 \\ 127.318066 & 91.6766708 & 219.415042 \\ 558.369098 & 219.415042 & 994.274034 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 533.656579 \\ 224.150906 \\ 904.825302 \end{pmatrix}$$

Del proceso del sistema de ecuaciones se encontraron los siguientes valores de los parámetros

$$\begin{aligned} a_0 &= \log K \Rightarrow K = 206.756894 \\ a_1 &= h = 0.335268 \\ a_2 &= g = -0.464275 \end{aligned}$$

y la función queda integrada finalmente de la siguiente forma:

$$I = \frac{206.756894 \times t^{0.335268}}{d^{0.464275}}$$

El sistema de ecuaciones encontrado para las condiciones más críticas para duraciones de 120 a 1440 minutos para el Observatorio Meteorológico Xalapa, Ver. Con la información contenida en la tabla III.4.ANX-B.4 (Ver Anexo B) es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} 100 & 38.1723765 & 273.69205 \\ 38.1723765 & 26.4062515 & 104.47476 \\ 273.69205 & 104.47476 & 763.978789 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.98902 \\ 0.384664 \\ -0.849328 \end{pmatrix}$$

Del proceso del sistema de ecuaciones se encontraron los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} a_0 &= \log K \Rightarrow K = 975.0345387 \\ a_1 &= h = 0.384664 \\ a_2 &= g = -0.849328 \end{aligned}$$

y la función queda integrada finalmente de la siguiente forma:

$$I = \frac{975.034538 \times t^{0.384664}}{d^{0.849328}}$$

En forma semejante al procedimiento anterior, el sistema de ecuaciones encontrado para las condiciones más críticas para duraciones de 120 a 1440 minutos para la Estación La Tembladera, a partir de la información de la tabla III.4.ANX-B.12 (Ver Anexo B) es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} 100 & 38.1723765 & 273.69205 \\ 38.1723765 & 26.4062515 & 104.47476 \\ 273.69205 & 104.47476 & 763.978789 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 89.4233174 \\ 38.9724663 \\ 232.598087 \end{pmatrix}$$

Del proceso del sistema de ecuaciones se encontraron los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} a_0 &= \log K \Rightarrow K = 930.0793455 \\ a_1 &= h = 0.408744 \\ a_2 &= g = -0.8149 \end{aligned}$$

Y la función, una vez conocidos los valores de los parámetros, queda:

$$I = \frac{930.0793455 \times t^{0.408744}}{d^{0.8149}}$$

En forma semejante al procedimiento anterior, el sistema de ecuaciones encontrado para las condiciones más críticas para duraciones de 120 a 1440 minutos para la Estación Las Vigas, a partir de la información de la tabla III.4.ANX-B.14 (Ver Anexo B) es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} 100 & 38.1723765 & 273.69205 \\ 38.1723765 & 26.4062515 & 104.47476 \\ 273.69205 & 104.47476 & 763.978789 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 91.6233065 \\ 38.3944242 \\ 238.619282 \end{pmatrix}$$

Del proceso del sistema de ecuaciones se encontraron los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} a_0 &= \log K \Rightarrow K = 1087.051201 \\ a_1 &= h = 0.288943 \\ a_2 &= g = -0.8149 \end{aligned}$$

Y la función, una vez conocidos los valores de los parámetros, queda:

$$I = \frac{1087.051201 \times t^{0.288943}}{d^{0.8149}}$$

En forma semejante al procedimiento anterior, el sistema de ecuaciones encontrado para las condiciones más críticas para duraciones de 10 a 120 minutos para la Estación La Concepción, a partir de la información de la tabla III.4.ANX-B.16 (Ver Anexo B) es el siguiente:

$$\begin{pmatrix} 324 & 127.318066 & 558.369098 \\ 127.318066 & 91.6766708 & 219.415042 \\ 558.369098 & 219.415042 & 994.274034 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 526.337247 \\ 218.860832 \\ 892.211447 \end{pmatrix}$$

Del proceso del sistema de ecuaciones se encontraron los siguientes valores de los parámetros:

$$\begin{aligned} a_0 &= \log K \Rightarrow K = 204.6774511 \\ a_1 &= h = 0.288933 \\ a_2 &= g = -0.464275 \end{aligned}$$

Y la función, una vez conocidos los valores de los parámetros, queda:

$$I = \frac{204.6774511 \times t^{0.288933}}{d^{0.464275}}$$

III.5.- GASTOS MÁXIMOS

MÉTODOS EMPÍRICO

Dadas las características fisiográficas de las cuencas de aportación de 7 arroyos, se utilizará el Método Racional, el cual requiere del conocimiento del tiempo de concentración para estimar la intensidad de la precipitación ligada a un período de retorno, así como de un coeficiente de

escurrimiento que es función de las características de la superficie de la cuenca y se calcula con la siguiente expresión:

$$Q = 0.000278 \times C \times I \times A$$

En la que:

- C, Coeficiente de escurrimiento
- I, Intensidad máxima de la lluvia, en mm/h
- A, Área de la cuenca en m²

MÉTODOS BASADOS EN RELACIONES LLUVIA-ESCURRIMIENTO

Las cuencas de aportación de dos cruces cuyas áreas son menores de 3000 km², se ubican dentro del rango de las cuencas menores, en las que los gastos máximos se estiman aplicando el Método de Chow; el cálculo de gastos se lleva a cabo en función de las características de la lluvia con la expresión que se anota enseguida:

$$Q = A \times X \times Y \times Z$$

En la que:

- Q, Gasto en m³/s
- A, Área de la cuenca en km²
- X, Factor de escurrimiento en cm/h

$$X = \frac{Pe}{d}$$

En donde:

- Pe, Precipitación en exceso, en cm.
- d, Duración de la tormenta, en horas

$$Pe = \frac{\left(\frac{Pt - 508}{N + 5.08} \right) \times POT2}{\left(\frac{pT + 2032}{n - 20.32} \right)}$$

En donde:

- Pt, Precipitación total, en cm., se obtiene a partir de las Curvas Intensidad-Duración-Período de Retorno
- N, Número de escurrimiento, depende del tipo de suelo
- Y, Factor climático (2.78*Pt/Pb)
- Pb, Precipitación en la estación base, en cm.
- Z, Factor de reducción del pico (d / Tp)

Tp, Tiempo de retraso que de acuerdo con Chow (en horas), se calcula con la siguiente expresión:

$$Tp = 0.00505 * (\text{longitud del cauce, en m} / \text{pendiente del arroyo})$$

Pendiente del cauce, en %.

CARACTERÍSTICAS FIOGRÁFICAS DE LAS CUENCAS DE LOS CRUCES.

En el tramo de sustitución del Gasoducto de 48" D.N., se identificaron siete cruces con arroyos y un río, los cuales se muestran en la figura III.5.ANX-B.1 (Ver Anexo B), así como las características fisiográficas de sus cuencas de aportación.

CÁLCULO DE GASTOS MÁXIMOS.

El cálculo de gastos máximos con el Método Racional, se aplicará a los cruces Q-306, Q-307, Q-318, Q-319, Q-309, Q-312 y Q-314. Las intensidades máximas se encontrarán con los modelos de tormenta para duraciones de 10 a 120 minutos para Xalapa para los dos primeros cruces y con el modelo de La Concepción para los cinco restantes, y el tiempo de concentración con el criterio de Chow, los gastos máximos se muestran en la Tabla III.5.I a continuación:

GASTOS MÁXIMOS EN CRUCE DE CORRIENTES SUP. CON EL DUCTO DE 48" D.N.

| Tabla III.5.I | CRUCES | | | | | | |
|-------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|-------|
| | Q-306 | Q-307 | Q-318 | Q-319 | Q-309 | Q-312 | Q-314 |
| ÁREA DE CUENCA (Ha.) | 770 | 480 | 71 | 75 | 78 | 975 | 38 |
| LONGITUD DE CAUCE (M) | 7000 | 5500 | 1700 | 1890 | 2005 | 8500 | 1500 |
| DESNIVEL (M) | 800 | 460 | 73 | 83 | 90 | 400 | 60 |
| PENDIENTE (-) | 0.1143 | 0.0836 | 0.04535 | 0.04574 | 0.04141 | 0.047 | 0.04 |
| COEF. DE ESC. | 0.35 | 0.25 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| TIEMPO DE CONCEN. (MIN) | 79.51 | 75.31 | 43.2 | 46.11 | 49.43 | 119.65 | 41.51 |
| PERÍODO DE RETORNO | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| INTENSIDAD MÁXIMA(MM/H) | 125 | 130.2 | 134.8 | 130.8 | 126.6 | 84 | 137.3 |
| GASTO MÁXIMO (M3/SEG.) | 95.12 | 43.44 | 5.3 | 5.45 | 5.49 | 45.53 | 2.9 |

En el caso de los cruces Q-320 y Q-326, el cálculo de gastos máximos se hará a partir del Método de Chow de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Cruce Q-320 (Río Sedeño)

Las características fisiográficas de la cuenca del Río Sedeño hasta el cruce con el trazo del tramo de sustitución del Gasoducto de 48" D.N., son las siguientes:

| | |
|-------------------------|--------------------|
| Área de la cuenca | 69 km ² |
| Longitud del cauce | 28600 m |
| Pendiente del cauce | 6.822% |
| Número de escurrimiento | 72 |
| Tiempo de retraso | 1.94 h |
| Período de Retorno | 100 años |

Las intensidades máximas se calcularán con la siguiente expresión que se obtuvo en el apartado CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO para duraciones de 120 a 1440 minutos en el Observatorio Meteorológico Xalapa, ver., dentro de cuya área de influencia se encuentra la cuenca del Río Sedeño:

$$I = \frac{975.034538 \times t^{0.384664}}{d^{0.849328}}$$

Como no se conoce la duración de la tormenta más desfavorable, se supondrán diversos valores de ésta hasta encontrar el gasto máximo, como se muestra en la tabla III.5.II.

| Tabla III.5.II; GASTOS MÁXIMOS, CRUCE Q-320 (RÍO SEDEÑO) | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|------------|------|------------|-------|-----------------------|
| DURACIÓN DE LA TORMENTA (h) | INTENS. DE LLUVIA (cm/h) | PRECIP. TOTAL (cm) | PRECIP. EN EXC. (cm) | X (cm/h) | Y | t/tp | Z | Q (m ³ /s) |
| 0.5 | 31.8997705 | 15.9498853 | 8.09294734 | 16.1858947 | 2.78 | 0.25730967 | 0.155 | 481.240639 |
| 0.75 | 22.6062394 | 16.9546795 | 8.92687551 | 11.9025007 | 2.78 | 0.38596451 | 0.23 | 525.121666 |
| 1 | 17.7057511 | 17.7057511 | 9.55889018 | 9.55889018 | 2.78 | 0.51461935 | 0.31 | 568.411757 |
| 1.5 | 12.5474397 | 18.8211596 | 10.5097107 | 7.00647378 | 2.78 | 0.77192902 | 0.45 | 604.79181 |
| 2 | 9.82745696 | 19.6549139 | 11.2290526 | 5.6145263 | 2.78 | 1.02923869 | 0.58 | 624.647492 |
| 2.5 | 8.13079035 | 20.3269759 | 11.813762 | 4.72550479 | 2.78 | 1.28654837 | 0.7 | 634.512431 |
| 3 | 6.96437125 | 20.8931137 | 12.3094489 | 4.10314963 | 2.78 | 1.54385804 | 0.82 | 645.394253 |
| 3.5 | 6.10973158 | 21.3840605 | 12.7414861 | 3.64042459 | 2.78 | 1.80116771 | 0.92 | 642.441746 |
| 4 | 5.45466328 | 21.8186531 | 13.12554 | 3.281385 | 2.78 | 2.05847739 | 1 | 629.43527 |

De los números que arroja la tabla se desprende que el gasto máximo resulta de 645.4 m³/seg. para una duración de la tormenta de 3 horas, con el que se podrá proceder al diseño de la estructura de cruce con el gasoducto.

Cruce Q-326

Las características fisiográficas de la cuenca del cruce Q-326 hasta el cruce con el trazo del tramo de sustitución del Gasoducto de 48" D.N., son las siguientes:

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Área de la cuenca | 14.2 km ² |
| Longitud del cauce | 7200 m |
| Pendiente del cauce | 4.7 % |
| Número de escurrimiento | 82.5 |
| Tiempo de retraso | 0.9 h |
| Período de Retorno | 100 años |

Las intensidades máximas se calcularán con la siguiente expresión que se obtuvo en el apartado CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-PERÍODO DE RETORNO para duraciones de 10 a 120 minutos en el Observatorio Meteorológico Xalapa, ver., dentro de cuya área de influencia se encuentra la cuenca del cruce Q-326:

$$I = \frac{206.756894 \times t^{0.335268}}{d^{0.464275}}$$

Como no se conoce la duración de la tormenta más desfavorable, se supondrán diversos valores de ésta hasta encontrar el gasto máximo, como se muestra en la tabla III.5.III.

| Tabla III.5.III; GASTOS MÁXIMOS, CRUCE Q-326 | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|----------|------|------|------|-----------------------|
| DURACIÓN DE LA TORMENTA (h) | INTENS. DE LLUVIA (cm/h) | PRECIP. TOTAL (cm) | PRECIP. EN EXC. (cm) | X (cm/h) | Y | t/tp | Z | Q (m ³ /s) |
| 0.5 | 19.96 | 9.98 | 5.45 | 10.91 | 2.78 | 0.55 | 0.33 | 142.11 |
| 0.75 | 16.54 | 12.4 | 7.56 | 10.09 | 2.78 | 0.83 | 0.49 | 193.1 |
| 1 | 14.47 | 14.47 | 9.43 | 9.43 | 2.78 | 1.1 | 0.62 | 230.75 |
| 1.5 | 11.99 | 17.98 | 12.68 | 8.45 | 2.78 | 1.66 | 0.87 | 290.29 |
| 2 | 10.49 | 20.98 | 15.51 | 7.75 | 2.78 | 2.21 | 1 | 306.13 |
| 2.5 | 9.46 | 23.64 | 18.06 | 7.22 | 2.78 | 2.76 | 1 | 285.11 |
| 3 | 8.69 | 26.06 | 20.39 | 6.8 | 2.78 | 3.31 | 1 | 268.33 |
| 3.5 | 8.09 | 28.31 | 22.57 | 6.45 | 2.78 | 3.87 | 1 | 254.51 |
| 4 | 7.6 | 30.41 | 24.61 | 6.15 | 2.78 | 4.42 | 1 | 242.84 |

De los números que arroja la tabla se desprende que el gasto máximo resulta de 306.1 m³/seg. Para una duración de la tormenta de 2 horas, con el que se podrá proceder al diseño de la estructura de cruce con el gasoducto.

III.6.- CÁLCULO HIDRÁULICO

El cálculo del perfil del flujo de las corrientes naturales para determinar las características hidráulicas que produce el paso del gasto máximo en la sección donde se efectúa el cruce del gasoducto con los escurrimientos, se llevará a cabo con la utilización del Método de Incrementos Finitos aplicado a corrientes naturales.

Para este efecto, se alimentará el método con información de las características geométricas de secciones transversales a lo largo del eje del cauce de las corrientes convenientemente ubicadas, en un tramo que refleje el funcionamiento hidráulico, tales como área hidráulica, perímetro mojado, radio hidráulico, tirante de agua y ancho del espejo del agua, plasmadas en gráficas que permitan obtener estos datos para diversas variaciones del tirante de agua o del nivel del espejo del agua, para cada sección considerada en el análisis hidráulico. Estas secciones estarán referidas a un estado de niveles, de manera que se podrá conocer la pendiente geométrica del cauce; así también, de los recorridos de campo se tendrá una visión de las condiciones de los cauces en cuanto a vegetación, taludes, materiales predominantes en el cauce e irregularidades en el curso del cauce, elementos necesarios para conocer el valor del coeficiente de rugosidad de Manning que se requiere en la aplicación del método de cálculo.

El proceso consiste básicamente en un proceso de integración numérica, en el que es necesario trabajar a partir de valores propuestos para la longitud de separación entre secciones transversales y proceder al cálculo del tirante de agua a través de un procedimiento de aproximaciones sucesivas, como sigue:

Se determina el sentido en que habrá de llevarse a cabo el análisis hidráulico, ya sea hacia aguas arriba o hacia aguas abajo, dependiendo de que el régimen del flujo que se presenta en la corriente sea subcrítico o supercrítico, o de que se presente alguna condición de control aguas abajo, tal como la presencia de una corriente más importante o un vertedor u otro tipo de estructura.

Establecida el sentido del análisis, se aplica la ecuación de la energía entre dos secciones, asumiendo razonablemente que la línea de energía que se presenta en el tramo es recta, considerando que el flujo que se presenta es gradualmente variado, de esta manera, en una sección se conocen dado el gasto máximo, el tirante de agua, velocidad, energía por carga de velocidad y la carga de posición, lo que proporciona la energía total en esa sección, quedando pendiente por definir la energía en la siguiente sección que es función de un cierto tirante que satisfaga la condición de igualdad de energías entre ambas secciones, como se muestra en la siguiente expresión:

$$Z_1 + d_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + d_2 + \frac{V_2^2}{2g} + hf_{1-2} + h_e$$

En donde (1) corresponde a la sección donde se conocen las condiciones de inicio del análisis y (2) a la sección en la que hay encontrar el tirante de agua o la elevación del espejo de agua que proporcione la igualdad de energías buscada. Esta expresión se aplica sucesivamente hacia aguas arriba o hacia aguas abajo, según el funcionamiento hidráulico de la corriente, tantas veces como sea necesario, hasta encontrar el perfil del flujo en el tramo de interés.

El Método expuesto para determinar el perfil del flujo en una corriente, se aplicó en el caso de los cruces con corrientes naturales del gasoducto de 48" D.N. denominados Q-306, Q-307, Q-318, Q-319, Q-309, Q-312, Q-314, Q-320 y Q-326.

El gasoducto también cruza dos arroyos (Q-321 y Q-323) que se localizan sensiblemente en el inicio de dos cuencas pequeñas, donde se inician prácticamente los escurrimientos, como no se cuenta con un perfil de flujo, no se aplicó el método de cálculo. También se tienen los cruces Q-322 y Q-325 en la orilla de dos lagunas, las que eventualmente descargan sus excedencias a corrientes naturales, por lo que tampoco en estos casos se cuenta con las condiciones hidráulicas para determinar un perfil de flujo; sin embargo, para fines de protección de la tubería se consideró un colchón mínimo de dos metros en los cuatro casos mencionados.

En todos los casos, se consideraron para fines del análisis hidráulico los gastos máximos para un período de retorno de 100 años calculados en el apartado III.5.- GASTOS MÁXIMOS.

III.7.- CÁLCULO DE EROSIÓN

SOCAVACION GENERAL EN CAUCES

Cuando ocurre una avenida en un río, se producen alteraciones en la corriente, en el fondo y orillas del cauce. Los cambios que sufre la forma del cauce se deben a la mayor capacidad de arrastre de la corriente, la cual, al arrastrar un mayor número de partículas en suspensión y tomarlas del fondo, hace que este descienda.

Para el cálculo de la socavación en cualquier sección del cauce se dispone de un método en donde se valúa la socavación máxima que se presenta al paso de una avenida.

La socavación general, se determinó mediante el criterio de Lischtvan-Lebediev. Este criterio consiste en realizar una serie de clasificaciones de los cauces de los ríos.

La primera clasificación consiste en determinar si existe un cauce principal definido, es decir, con márgenes bien delimitadas por donde hay arrastre de fondo constante, o si es indefinido, es decir que existe una superficie casi plana sobre la que el río escurre por varias partes al mismo tiempo. Una segunda clasificación toma en cuenta la naturaleza del material del fondo, si es cohesivo como limos y arcillas, o no lo es como las arenas y gravas, etc.

En el estudio de la socavación general, se considero la distribución del material en el subsuelo, esta puede ser en forma homogénea o heterogénea. La erosión del fondo del cauce en una sección transversal se realiza con la constante aportación de material sólido de arrastre y es provocada por el desequilibrio local entre el material arrastrado aguas abajo y el aportado.

METODOLOGÍA APLICABLE.

El cálculo de la erosión se realizó bajo el siguiente criterio: Al presentarse una avenida aumenta la velocidad del cauce, el aumento de la velocidad provoca el incremento de la capacidad de arrastre de la corriente, con lo que se empieza a degradar el fondo. Al descender el terreno del fondo aumenta paulatinamente el área hidráulica, de la misma forma se reduce el valor medio de la velocidad de la corriente y por lo tanto aumenta la capacidad de equilibrio. Ese equilibrio existe cuando son iguales la velocidad media real de la corriente y la velocidad media que se requiere para que un material de las características dadas sea arrastrado.

SOCAVACIÓN GENERAL EN SUELOS COHESIVOS.

Como se mencionó anteriormente para el cálculo de la socavación máxima general en las secciones transversales de interés bajo el paso de una avenida, es necesario el cálculo del gasto de diseño Q_d con un periodo de retorno de $T_r = 50$ años como mínimo, así el tirante máximo medido desde el fondo del cauce hasta la superficie del agua en esa sección. El gasto de diseño se obtiene mediante datos hidrológicos de la región y las características fisiográficas de la cuenca, el tirante máximo se determinó, mediante las curvas elevaciones-gastos de cada sección estudiada. Es importante mencionar que la magnitud de la erosión en los suelos limosos y arcillosos depende principalmente del peso volumétrico del suelo seco. El valor de la velocidad media que se requiere para degradar el fondo esta dado por:

$$V_e = 0.60 \times \gamma_s^{1.18} \times \beta \times H_s^X \quad (1)$$

Donde:

Hs, Es el tirante considerado, a cuya profundidad se desea conocer que el valor se Ve se requiere para arrastrar y levantar el material.

β , Coeficiente de paso, que depende de la frecuencia con que se repite la avenida que se estudia y cuyo valor aparece en la Tabla III.7.I.

X, Exponente variable que esta en función del $\gamma\sigma$, el cual se encuentra en la tabla 2. Ahí mismo se indica el valor de $1/(1+X)$ necesario para calculo posterior, y el de X cuando el material del fondo no es cohesivo; en este estudio caso X es función del diámetro medio de los granos.

γ_s , Peso volumétrico del material seco que se encuentra en la profundidad Hs ton/m³.

Tabla III.7.I; VALORES DEL COEFICIENTE β

| PROBABILIDAD, EN % QUE SE PRESENTE EL GASTO DE DISEÑO. | COEFICIENTE β |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|
| 100 | 0.77 |
| 50 | 0.82 |
| 20 | 0.86 |
| 10 | 0.9 |
| 5 | 0.94 |
| 2 | 0.97 |
| 1 | 1 |
| 0.3 | 1.03 |
| 0.2 | 1.05 |
| 0.1 | 1.07 |

Tabla III.7.II.

Valores de x, $1/(1+x)$, para suelos cohesivos y no cohesivos coeficiente β

| $\gamma\sigma$ | x | $1/(1+x)$ | $\gamma\sigma$ | x | $1/(1+x)$ | Dm (mm) | X | $1/(1+x)$ | Dm (mm) | X | $1/(1+x)$ |
|----------------|-----|-----------|----------------|-----|-----------|---------|-----|-----------|---------|-----|-----------|
| 0.8 | 0.5 | 0.66 | 1.2 | 0.4 | 0.72 | 0.05 | 0.4 | 0.7 | 40 | 0.3 | 0.77 |
| 0.8 | 0.5 | 0.66 | 1.2 | 0.4 | 0.72 | 0.15 | 0.4 | 0.7 | 60 | 0.3 | 0.78 |
| 0.9 | 0.5 | 0.67 | 1.3 | 0.4 | 0.73 | 0.5 | 0.4 | 0.71 | 90 | 0.3 | 0.78 |
| 0.9 | 0.5 | 0.67 | 1.3 | 0.4 | 0.74 | 1 | 0.4 | 0.71 | 140 | 0.3 | 0.79 |
| 0.9 | 0.5 | 0.67 | 1.4 | 0.4 | 0.74 | 1.5 | 0.4 | 0.72 | 190 | 0.3 | 0.79 |
| 0.9 | 0.5 | 0.68 | 1.5 | 0.3 | 0.75 | 2.5 | 0.4 | 0.72 | 250 | 0.3 | 0.8 |
| 1 | 0.5 | 0.68 | 1.5 | 0.3 | 0.75 | 4 | 0.4 | 0.73 | 310 | 0.2 | 0.81 |
| 1 | 0.5 | 0.69 | 1.6 | 0.3 | 0.76 | 6 | 0.4 | 0.74 | 370 | 0.2 | 0.81 |
| 1 | 0.4 | 0.69 | 1.6 | 0.3 | 0.76 | 8 | 0.4 | 0.74 | 450 | 0.2 | 0.83 |
| 1 | 0.4 | 0.7 | 1.7 | 0.3 | 0.77 | 10 | 0.3 | 0.75 | 570 | 0.2 | 0.83 |
| 1.1 | 0.4 | 0.7 | 1.8 | 0.3 | 0.78 | 15 | 0.3 | 0.75 | 750 | 0.2 | 0.83 |
| 1.1 | 0.4 | 0.71 | 1.9 | 0.3 | 0.78 | 20 | 0.3 | 0.76 | 1000 | 0.2 | 0.84 |
| 1.2 | 0.4 | 0.71 | 2 | 0.3 | 0.79 | 25 | 0.3 | 0.76 | | | |

La variación de la velocidad Vr de la corriente, en función de la profundidad y para cada punto de la sección, se obtiene analizando una franja vertical de la sección transversal la hipótesis que se formula para el calculo es que el gasto unitario en cada franja permanece constante mientras dura el proceso erosivo.

El gasto que pasa por la sección esta dado, según Manning por:

$$\Delta Q = V \times \Delta A = \frac{S^{1/2} \times H^{5/3} \times \Delta B}{n} \quad (2)$$

Donde:

S, Pendiente del gradiente hidráulico.

Como se ha considerado una rugosidad constante en toda la sección, $(1/n) S^{1/2}$ es constante para cualquier punto y se denomina α .

$$\Delta Q = \alpha \times H^{5/3} \times \Delta B$$

El valor de α puede ser expresado en forma general como una función del tirante medio, antes de la erosión, Hm, de la velocidad media, en toda la sección, V y del gasto, Qd, ya que:

$$Q_d = \frac{S^{1/2} \times H^{5/3} \times Be}{n}$$

Como la corriente del agua forma turbulencias cerca de pilas y estribos, es necesario afectar al valor de Qd por un coeficiente de contracción μ , el cual se encuentra en la tabla 3.

$$Q_d = \frac{\mu \times S^{1/2} \times H^{5/3} \times Be}{n} \quad (3)$$

En que

$$Q_d = \mu \times \alpha \times H^{5/3} \times Be$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{Hm^{5/3} \times Be \times \mu} \quad (4)$$

Donde:

Be, ancho de la superficie libre del agua.

Hm, tirante medio de la sección; el cual se obtiene dividiendo el área hidráulica efectiva entre el ancho Be.

Tabla III.7.III.
Coeficiente de contracción μ

| Velocidad Media en la Sección, en m/s. | Longitud libre entre dos pilas (claro), en m. | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 13 | 16 | 18 | 21 | 25 | 30 | 42 | 52 | 63 | 106 | 124 | 200 |
| Menor de 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.00 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.50 | 0.94 | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 2.00 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 2.50 | 0.90 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 3.00 | 0.89 | 0.91 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 3.50 | 0.87 | 0.90 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 4.00 ó mayor | 0.85 | 0.89 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

Ahora bien, en la franja en estudio, al incrementarse Ho y alcanzar un valor cualquiera Hs la velocidad disminuye aun nuevo valor Vr. En función de esa velocidad y tirante, ΔQ en la franja ΔB esta expresado por:

$$\Delta Q = Vr \times Hs \times \Delta B$$

igualando esta expresión con la 2' se tiene

$$Vr \times Hs \times \Delta B = \alpha \times Ho^{5/3} \times \Delta B$$

De donde la velocidad real de la corriente vale

$$Vr = \frac{\alpha \times Ho^{5/3}}{Hs} \quad (5)$$

La erosión se detendrá cuando a una profundidad cualquiera alcanzada, el valor de Vr, velocidad de la corriente capaz de producir arrastre y Ve, velocidad que se necesita para que el fondo se degrade, sean iguales.

$$Ve = Vr \text{ condición de equilibrio.}$$

SOCACVACIÓN GENERAL PARA SUELOS NO COHESIVOS.

En el estudio de la profundidad de erosión en suelos formados por granos sueltos, arena a boleos, Vr tiene el mismo valor que la ecuación 5; en cambio Ve esta expresado por:

$$Ve = 0.68 \times b \times dm^{0.28} \times Hs^x \quad (6)$$

Donde:

dm, diámetro medio de los granos del fondo, obtenidos según la expresión, mm

$$dm = 0.01 \times S \times di \times pi \quad (7)$$

di, diámetro medio de una fracción en la curva granulométrica de la muestra total que se analiza, mm.

pi, porcentaje del peso de esa misma porción, comprada con el peso total de la muestra. Las fracciones escogidas no deben ser necesariamente iguales entre si.