



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

Afectación al suministro de agua de las redes de tuberías de distribución ante un sismo

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ANGEL BAUTISTA TADEO

TUTOR: OSCAR ARTURO FUENTES MARILES
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, enero 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Jesús Gracia Sánchez

Secretario: M. en I. Víctor Franco

Vocal: Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles

1^{er.} Suplente: Dr. Ramón Domínguez Mora

2^{d o.} Suplente: Dra. Ismene Libertad A. Rosales Plascencia

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles

FIRMA

En esta sección es donde todos hacen catarsis, así que antes de tratar de agradecer a todos los que han influido en mí avanzar personal y científico, compartiré una idea que me dejó un libro acerca de los terremotos y es que regularmente se refiere a las personas o ideas con fundamento sólidos, que “están con los pies sobre tierra”, pero que sucede cuando ocurre un evento de naturaleza sísmica que simplemente vuelve inestable la base de todo, tierra, suelo o fundamentos, es en estos caso que el ser humano puede explotar su potencial, sin caer en individualidades.

AGRADECIMIENTOS

*A mis padres: **Elvira Tadeo** y **Armando Bautista**, porque simplemente sin ellos no existiría, en el sentido literal y figurado de la palabra, soy producto de su incansable esfuerzo y apoyo jamás doblegado.*

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, que se convirtió en parte de mi identidad desde mis estudios en preparatoria, y que debido a su grandeza permite el desarrollo de jóvenes que como yo tiene un sueño.*

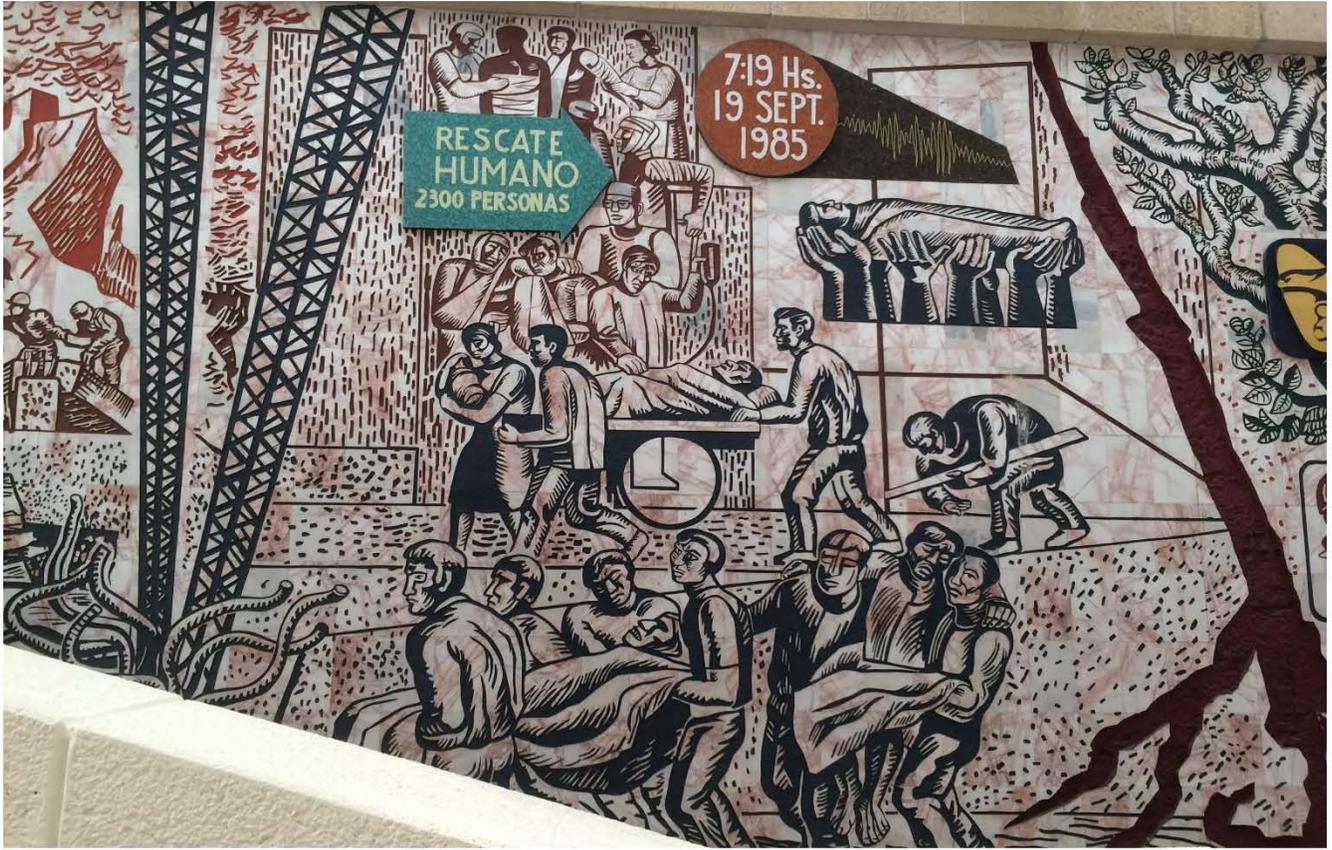
*Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** y al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por esa labor titánica que en con junto o separado es la de formar jóvenes con visión y mira hacia al progreso.*

*Al **Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles**, por todo el apoyo brindado antes y durante mis estudios de posgrado, por ser una persona afable y brillante, por contar con una trayectoria impecable como persona, científico e ingeniero, es usted digno inspiración y de toda mi admiración, por tratar de ser ortodoxo en un campo de conocimiento donde rige el empirismo; estas cortas palabras no son suficientes para expresar lo agradecido que le estoy a usted y a su equipo de trabajo que han dejado en mi incontables aprendizajes.*

*A **Guadalupe Torres** por todo el apoyo y sufrimiento que hemos soportado juntos, por esa gran fuerza con la que cuenta y me ha sabido transmitir y porque sin importar la situación siempre ha estado a mi lado y a todas las personas, seres o entes que han dejado algo en mí, porque de cualquier situación hay que saber sacar algo positivo.*

Y a todas las personas que llegue a omitir debido a las premuras de terminar este documento.

Por ultimo les comparto una foto que tome en el Hospital Centro Medico, del mural en conmemoración del sismo del 19 de septiembre de 1985 del pintor José Chávez Morado, terminado en 1989



Contenido

Afectación al suministro de agua de las redes de tuberías de distribución ante un sismo	1
Índice de Tablas y Figuras.....	6
Resumen.....	9
Capítulo 1 Introducción.....	10
Capítulo 2 - Comportamiento sísmico de las tuberías enterradas.....	12
2.1.-Condiciones mecánicas en tuberías enterradas	12
2.2.-Efectos sísmicos	13
2.2.1.-Paso de onda sísmica	14
2.2.2.-Deformación permanente del suelo	15
2.3.-Fallas en las tuberías.....	16
2.3.1.-Falla total y parcial	16
2.3.2.-Flotación y licuefacción.....	17
Capítulo 3 - Relaciones empíricas para estimar la vulnerabilidad sísmica de tuberías	18
3.1.- Relaciones de vulnerabilidad en función de la Velocidad máxima horizontal del suelo	18
3.2.- Relaciones de vulnerabilidad en función de la Deformación Permanente del Suelo.....	19
3.3.- Recomendaciones, consideraciones y modificaciones de La Asociación Americana de Líneas Vitales (2001)	21
3.4.- Función de vulnerabilidad sísmica para Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de México.....	23
Capítulo 4 - Afectaciones de tipo hidráulico en las redes de distribución de agua potable.....	25
4.1.-Aspectos Sísmicos	26
4.1.1.- Velocidad máxima horizontal del suelo, VMHS.	30
4.2.-Aspectos hidráulicos	34
4.2.1.- Método estático modificado para calcular redes de tuberías de agua potable	34
4.3.-Metodología propuesta para evaluar el daño y suministro de una Red de Distribución de Agua Potable.	35
4.3.1-Parametro DPS/D	37
4.3.2-Verificación del método.....	39
Capítulo 5 - Análisis de daño al suministro de agua considerando aspectos sísmicos.....	67
Capítulo 6 - Conclusiones	96
Referencias Bibliográficas	98

Índice de Tablas y Figuras

<i>Figura R-1.- Daños en tuberías por el terremoto del 19 de septiembre de 1985 (Fototeca Milenio).</i>	9
<i>Figura 2-1.-Acciones mecánicas que puede presentar una tubería</i>	12
<i>Figura 2-2.-Representación de los movimientos que son resultado de acciones sísmicas</i>	17
<i>Tabla 3-1.- Datos de los sismos utilizados para la función de daños sísmico de la A.L.A (A. L. A. , 2001).</i>	19
<i>Tabla 3-2.- Mecanismos de falla presentados en distintos sismos. (A.L.A.2001).</i>	20
<i>Tabla 3-3.- Valores de la variable K1, en función de las características de tubería y tipo de suelo.(F.E.M.A., 1994).</i>	22
<i>Tabla 3-4.-Valores para la variable K2 en función del tipo de junta entre tuberías. (F.E.M.A., 1994)</i>	22
<i>Tabla 3-5.-No de reparaciones realizadas por delegación, después del sismo de 1985. (Ayala G. y O'Rourke, 1993).</i>	23
<i>Tabla 4-1.-Valores para el espectro de respuesta sísmico por zona. (NTC, 2010)</i>	27
<i>Figura 4-1.--Zonificación sísmica para la Ciudad de México (NTC. 2010).</i>	28
<i>Figura -4-2.- Zonificación para periodos naturales de vibración del suelo en la Ciudad de México (NTC 2010).</i>	29
<i>Tabla 4-1.-Datos de los sismos utilizados en los mapas de Velocidad Máxima Horizontal del suelo. (Pineda y Ordaz, 2004).</i>	30
<i>Figura -4-3.- Ubicación de los sismos para los mapas de VMHS respecto a la Ciudad de México. (Pineda y Ordaz, 2004).</i>	31
<i>Figura -4-4.- Mapas de Velocidad Máxima Horizontal del Suelo N-S (Pineda y Ordaz, 2004)</i>	32
<i>Figura -4-5.- Mapas de Velocidad Máxima Horizontal del Suelo E-W (Pineda y Ordaz, 2004)</i>	33
<i>Figura -4-6.- Representación de la Relación Carga-gasto.</i>	34
<i>Figura -4-7.-Diagrama descriptivo de la metodología propuesta.</i>	35
<i>Figura 4-8.-Representación de la red presentada por Rosales. (2012)</i>	40
<i>Tabla 4-1.-Topología de la red presentada por Rosales (2012)</i>	40
<i>Figura -4-9.- Mapas de velocidad máxima horizontal del suelo para la combinación del suelo 1 en la red de Rosales (2012).</i>	41
<i>Figura -4-10.-Zonificación propuesta para la combinación del suelo 1 en la red de Rosales (2012)</i>	42
<i>Tabla 4-2.- Valores de VMHS y de zonificación sísmica para cada tubería</i>	42
<i>Figura 4-11.- Vista de la interfaz gráfica de software REDESTA del Instituto de ingeniería dela UNAM</i>	46
<i>Tabla 4-3.-Resultados por tubería de la aplicación de la metodología propuesta.</i>	47
<i>Tabla 4-4.-Resultados por tubería de la aplicación de la metodología propuesta.</i>	48
<i>Figura 4-12.- Curva de variación horaria para la ciudad de México. (Mapas, 2007)</i>	49
<i>Tabla 4-5.-Probabilidades y Frecuencias de clase por tubería.</i>	49
<i>Tabla 4-6.-Tuberías en orden descendente según la probabilidad de falla, para la combinación de suelo 1.</i>	50
<i>Figura 4-13.- Cargas de presión sobre el terreno en la Red.</i>	51
<i>Figura 4-14.-Representación de Déficit en la red (nulo).</i>	51
<i>Figura 4-15.- Carga de presión en la red eliminando una tubería, combinación de suelo 1.</i>	52
<i>Figura 4-16.-Representación del déficit en la red, eliminando una tubería, combinación de suelo 1</i>	52
<i>Figura 4-17.- Carga de presión en la red, eliminado 2 tuberías, combinación de suelo 1.</i>	53
<i>Figura 4-18.- Representación del déficit, eliminando 2 tuberías, combinación de suelo 1.</i>	53
<i>Figura 4-19.-Carga de presión en la red, eliminado 4 tuberías y representando una fuga, combinación de suelo 1.</i>	54
<i>Figura 4-20.-Representación del déficit, eliminado 4 tuberías y representando una fuga, combinación de suelo 1.</i>	54
<i>Figura 4-21.- Carga de presión en la red, eliminado 4 tuberías y representando 4 fugas, combinación de suelo 1.</i>	55
<i>Figura 4-22.-Representación del déficit, eliminado 4 tuberías y representando 4 fugas, combinación de suelo 1.</i>	55

<i>Figura 4-23.-Evolución del déficit con respecto al número de fallas</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4-24.-Zonificación propuesta para la combinación del suelo 2 en la red de Rosales (2012).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4-25.-Mapas de velocidad máxima horizontal del suelo para la combinación del suelo 2 en la red de Rosales (2012).</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 4-7.-Velocidad máxima horizontal del suelo para cada tubería para la zonificación propuesta de suelo 2.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4-8.-Resultados por tubería, para la combinación de suelo 2 en la Red de Rosales (2012)......</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4-9.- Tuberías en orden descendente según la probabilidad de falla, para la combinación de suelo 2 .</i>	<i>60</i>
<i>Figura -4-26.-Carga de presión en la red eliminando una tubería, combinación de suelo 2.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4-27.-Representación de déficit en la red eliminando una tubería, combinación de suelo 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura -4-28.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 3 fugas, combinación de suelo 2.</i>	<i>62</i>
<i>Figura -4-29.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 3 fugas, combinación de suelo 2.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4-30.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 5 fugas, combinación de suelo 2.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4-31</i>	<i>63</i>
<i>Figura-4-31.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 5 fugas, combinación de suelo 2.</i>	<i>63</i>
<i>Figura-4-33.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 13 fugas, combinación de suelo 2.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4-34.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 13 fugas, combinación de suelo 2.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4-35</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4-35.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 18 fugas, combinación de suelo 2.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4-36.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 18fugas, combinación de suelo 2.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4-37-Evolución del déficit con respecto al número de fallas</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5-1.-Tanques que abastecen al Megasector 5.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5-1.- Ubicación del Megasector 5 en la Ciudad de México, (sin Escala).</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5-2.-Esquematación del Megasector 5, sobre foto satelital.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5-3.- Distribución espacial de Qmed. en el Megasector 5</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 5-2.-Periodos de recurrencia de los sismos en análisis.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5-4.- Zonificación sísmica del Megasector 5.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5-5.- Mapa de Velocidad Máxima Horizontal N-S del Suelo pata el Megasector 5.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5-6.-Mapa de Velocidad Máxima Horizontal W-E del Suelo pata el Megasector 5.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5-7.-Mapa de Velocidad Máxima Horizontal Resultante del Suelo pata el Megasector 5.</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 5-3.- Tabla resumen de análisis de daño por tubería para el sismo del 19/09/85.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5-4.-Frecuencias de clase para las probabilidades de daño.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5-5.-Tuberías clasificadas por frecuencias de clase.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 5-6.-Probabilidades para cada tubería según frecuencias de clase.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5-8.- Representación de la carga de presión en el Megasector 5 sin ninguna falla.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5-9.- Representación del Déficit en el Megasector 5, sin ninguna falla.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5-10.- Representación de cargas de presión en el Megasector 5, con una fuga.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5-11.-Representación de déficit en el Megasector 5, con una fuga.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5-12.-Representación de cargas de presión en el Megasector 5, con 10 fugas.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5-13.- Representación de déficit en el Megasector 5, con 10 fugas.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5-14.- Representación de la representación de carga en el Megasector 5, sin 2 tuberías y 18 fugas..</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5-15.- Representación de déficit en el Megasector 5, sin 2 tuberías y 18 fugas.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5-16.- Representación de carga de presión en el Megasector 5, sin 3 tuberías y 27 fugas.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5-17.- Representación de déficit en el Megasector 5, sin 3 tuberías y 27 fugas.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5-18.- Representación de la carga de presión del Megasector 5, sin 5 tuberías y 35 fugas.....</i>	<i>84</i>

<i>Figura 5-19.- Representación de déficit del Megasector 5, sin 5 tuberías y 35 fugas.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5-20.- Grafica de evolución del Déficit para el sismo del 19 sep. 1985</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5-7.- Resumen de los resultados de análisis de vulnerabilidad sísmica para el Megasector 5, durante el sismo de 1989.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 5-8.- Frecuencias de clase para la probabilidad de falla ante el sismo 1989.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5-9.- Identificación de tuberías por frecuencias de clase, para el sismo de 1989.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5-10.- Probabilidad de falla de por frecuencias de clase para el sismo de 1989</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5-21.- Representación de carga de presión del Megasector 5, sin ninguna falla.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5-22.- Representación del déficit del Megasector 5, sin ninguna falla.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5-23.- Representaciones de carga de presión del Megasector 5, con una falla por el sismo de 1985 ..</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5-24.- Representación del déficit del Megasector 5, con una falla por el sismo de 1985.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-25.-Representación de carga de presión del Megasector 5, con 10 fallas para el sismo de 1989</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-26.- Representación de déficit del Megasector 5, con 10 fallas para el sismo de 1989.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5-27.- Representación de carga de presión del Megasector 5, con 20 fallas par el sismo de 1989</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5-28.- Representación de déficit para el Megasector 5, con 20 fallas por sismo de 1989.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-29.- Representación de carga de presión en el Megasector 5, con 30 fallas por el sismo de 1989....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-30.- Representación de déficit para el Megasector 5, con 30 fallas por el sismo de 1989.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5-31.-Representación de déficit para el Megasector 5, con 34 fallas por el sismo de 1989.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-32.-Representación de déficit para el Megasector 5, con 34 fallas por el sismo de 1989.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-33.-Grafica de evolución del Déficit para el sismo del 29 de abril 1989.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 6-1.-Déficit en el Megasector 5.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 6-1.- Comparación de la evolución del déficit.</i>	<i>97</i>

Resumen

El objetivo de las redes de distribución de agua potable consiste en conducir el agua solicitada por las personas en los distintos sitios de una ciudad con la finalidad de satisfacer las necesidades en la misma.

Con frecuencia los conductos de las redes de distribución sufren averías que no les permiten cumplir plenamente con la entrega de agua solicitada. Los sismos suelen dañar fuertemente en poco tiempo las tuberías, por lo que el servicio del suministro de agua de las redes se reduce o suspende totalmente.

El conocer la vulnerabilidad del suministro de agua de las redes de distribución ante sismos permite estimar cuánta agua deja de proporcionarse y en qué zonas ocurre el mayor desabasto de este recurso. También es útil para prever los puntos críticos, para las zonas susceptibles a fallas, o encaminar las reparaciones para que éstas sean más efectivas, en el restablecimiento del servicio de distribución de agua, y la cuantificación de la afectación al suministro del vital líquido

Se propone un método para evaluar el suministro de agua potable que proporciona las redes de tuberías de distribución a los habitantes de una ciudad a partir de las roturas y fallas en las conexiones de los conductos de una red de tuberías, como consecuencia de un sismo.

Se analizan las fallas físicas parciales en las tuberías (fugas) y las totales que se presentan cuando los conductos se desconectan de otros conductos de la red, por los movimientos del suelo durante los temblores.

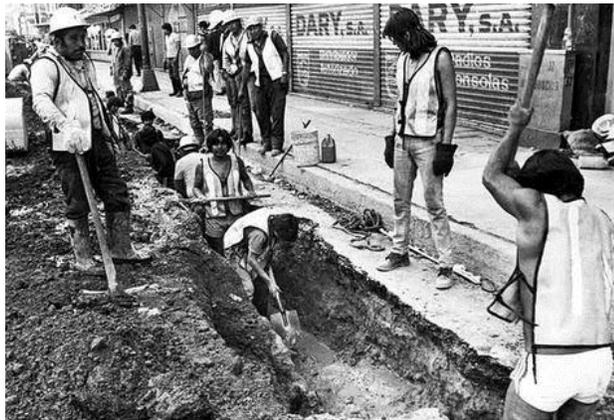


Figura R-1.- Daños en tuberías por el terremoto del 19 de septiembre de 1985 (Fototeca Milenio).

Capítulo 1 Introducción

Por la importancia que tienen las redes de distribución de agua potable, se han desarrollado metodologías para la estimación del daño ocasionado por sismos. La mayoría de las investigaciones en este tema, se han hecho con un enfoque de ingeniería sísmica, tomando en cuenta las características físicas de las tuberías y del evento. Es escaso el análisis hidráulico de redes por las fallas producidas en tuberías por temblores.

En este documento se realiza el modelado matemático para flujo permanente de una red de distribución de agua potable (método estático modificado) y se caracterizan, las posibles fallas originadas por un sismo, con cierto periodo de retorno.

Cuando ocurren eventos dañinos como sismos se suele estar enfocado en las afectaciones económicas dejando para después las afectaciones funcionales, como es el caso de las redes de distribución de agua.

Los análisis desarrollados en México a partir del terremoto del 19 de septiembre de 1985 se centraron en las afectaciones a la infraestructura de las líneas de conducción. Por lo que se desea revisar el funcionamiento de una red de distribución después de ocurrido un sismo con las respectivas afectaciones probables, para plantear una mejor planeación para la operación y restitución del servicio de la distribución de agua potable a la población.

Por lo que se tiene que analizar el estado de servicio de una red de abastecimiento de agua potable, bajo las fallas que puedan presentarse en las tuberías o en las conexiones entre ellas por los efectos de un sismo.

El funcionamiento de las redes de tuberías de distribución de agua potable después de un sismo es fundamental para reducir los daños a la población. Para estimar la afectación al suministro de agua por los temblores, se dispone de metodologías que estiman el daño físico que sufren las tuberías por los movimientos de las masas superficiales del suelo que producen los sismos (American Life Alliance, 2001).

La mayoría de las investigaciones sobre los daños a las redes de tuberías provocados por los sismos tienen un enfoque estructural, basado en análisis propios de la ingeniería sísmica. Se han realizado estimaciones sobre la probabilidad de daño físico a las tuberías de la red con base en las velocidades de desplazamiento horizontal de las masas de tierra que se producen durante los temblores; sin embargo, existen pocos trabajos en lo que se refiere a la cantidad de agua potable que dejan de suministrar las redes de tuberías que han sido afectadas por un sismo.

Se describe en este trabajo un análisis de tipo hidráulico a las redes de tuberías de agua potable para calcular la cantidad de agua que deja de proporcionarse a los habitantes de una ciudad según el daño que se origine en sus tuberías por roturas (fugas) o desconexiones entre sus conductos

Se utilizó un modelo matemático de una red de distribución de agua potable con flujo permanente donde de los caudales de salidas de la red son dependientes de la carga de presión (modelo estático modificado) para estimar que cantidad de agua deja de entregarse a las personas ante fallas ocurridas en la red. Ello permite determinar las zonas con desabasto y las tuberías que son más vulnerables desde el punto de vista de la entrega de líquido a los habitantes.

En el capítulo 2 se describen las consideraciones sísmicas que afectan a las tuberías de distribución de agua potable, como: la velocidad máxima horizontal del suelo durante los temblores y la deformación permanente de la masa de tierra y la manera en que las tuberías de conducción pueden fallar debido a las acciones descritas. El capítulo 3 trata las formulaciones de vulnerabilidad sísmica para tuberías de distribución de agua, estas obtenidas a través de los reportes de daños presentados en sistemas de distribución de ciudades importantes por grandes terremotos, como la obtenida para el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México.

El método propuesto para evaluar el suministro de una red de distribución de agua potable bajo las acciones de un sismo, está contenido en el capítulo 4, probando la metodología con distintas condiciones; en el capítulo 5 se presenta la aplicación del método propuesto a una red de distribución existente en la Ciudad de México, bajo las acciones de dos sismos de periodo de ocurrencia y magnitud diferentes. Por último, en el capítulo 6, se exponen las conclusiones y recomendaciones del trabajo de tesis.

Capítulo 2 - Comportamiento sísmico de las tuberías enterradas

La respuesta ante sismos de las tuberías colocadas en el suelo cerca de la superficie, no está asociada directamente a la propagación de ondas sísmicas. Las ondas sísmicas producen la deformación del suelo, que causa desplazamientos relativos del mismo; que es el principal causante de daños en tuberías. Aunque las ondas y sus efectos de deformación se caracterizan por parámetros como son: intensidad sísmica, aceleración máxima horizontal y velocidad máxima horizontal, es ésta última con la que se estiman las afectaciones por sismo de las líneas de conducción, ya que es poco subjetiva y que se cuenta con buena estimación.

2.1.-Condiciones mecánicas en tuberías enterradas

Las condiciones y combinaciones de carga generan en las tuberías enterradas estados de compresión o tensión que referidos a una sección transversal se pueden resumir en:

- Tensión por la presión interna
- Tensión por acciones externas
- Tensión por acciones combinadas
- Compresión por acciones externas

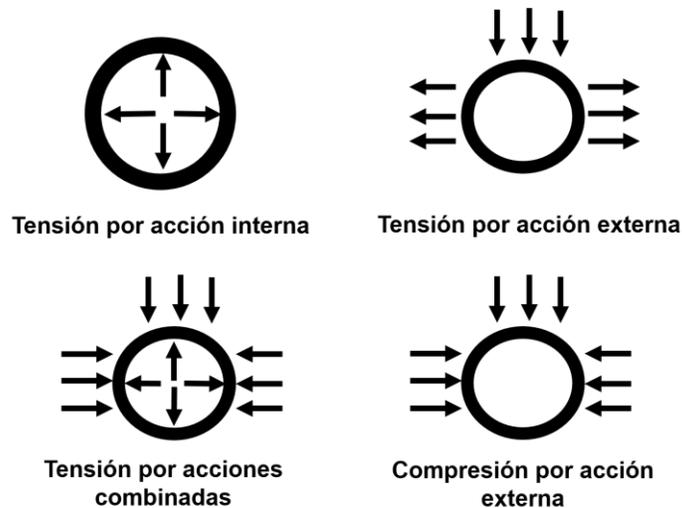


Figura 2-1.-Acciones mecánicas que puede presentar una tubería

Estas condiciones y sus combinaciones se consideran como las bases para determinar el comportamiento mecánico del sistema suelo-tubería para los conductos subterráneos, aunque lo ideal sería calcular por medio de un método específico las acciones a las que se encuentra sometida la tubería.

2.2.-Efectos sísmicos

Existen zonas donde los grandes movimientos del terreno por los sismos son críticos para las líneas de conducción de agua potable, como son aquellas donde existen:

- asentamientos diferenciales de gran magnitud
- esfuerzos cortantes
- estratigrafía variable a poca profundidad
- transición entre tuberías y estructuras
- transición horizontal entre suelos rocosos y blandos; en algunos suelos se puede presentar licuefacción por las vibraciones provocadas por sismos, en cuyo caso las tuberías pueden emerger o flotar.

Las tuberías flexibles sufren menos daños ante un sismo, y más aún si estas cuentan con juntas flexibles, ya que se adaptan al movimiento del suelo, reduciendo la probabilidad de falla.

En la actualidad el diseño de tuberías bajo efectos sísmicos en México es prácticamente nulo y en algunos países se ha reducido sólo para líneas de conducción de materiales tóxicos o inflamables en algunas zonas propensas a acciones sísmicas.

Son pocos los investigadores que se han dedicado a recopilar información de los daños provocados por los sismos en las líneas de conducción de agua potable. O'Rourke (A.L.A., 2001) ha recolectado durante 20 años un gran número de datos del comportamiento de tuberías durante sismos, con esto ha logrado presentar algunos puntos acerca de la integridad de tuberías enterradas, estos son:

- Tuberías unidas por soldadura de penetración y soldadura de arco, por lo general no presentan fallas
- Las tuberías segmentadas (sin juntas fijas, ensambladas por juntas mecánicas) sufren daños en terremotos de gran magnitud
- Las fallas en las tuberías son producto de fallas en el suelo (licuefacción, deslizamientos y ampliación de fallas geológicas) por el paso de ondas sísmicas
- El daño sísmico en estructuras o tanques de almacenamiento son causa de fallas en las tuberías de interconexión con estas.
- Es recomendable construir las tuberías de materiales dúctiles (acero, polivinilo de cloro PVC, polietileno de alta densidad PEAD).

Es importante disponer de criterios de protección, prevención y diseño que hagan énfasis en las características que influyen en las fallas de las tuberías enterradas; las cuales se pueden resumir en: estructura de la tubería, estructura del suelo y condiciones de trabajo del sistema tubería-suelo.

De las formulaciones existentes para el diseño sísmico de tuberías enterradas, la más utilizada es la de Marston (Marston, Anderson, 1913) la cual, se considera como el comienzo del cálculo de cargas sobre tuberías enterradas.

La teoría de cargas de Marston- Anderson está basada en el concepto de que el prisma de suelo en la zanja del tubo, es el que impone cargas a la tubería, la zanja de una conducción se define como un foso estrecho escavado en suelo inalterado. Así el asentamiento del relleno y la tubería generan esfuerzos de corte o fricción a los lados de la zanja. La cantidad de carga vertical impuesta en el conducto depende de la compresión relativa (rigidez) de la tubería y el suelo, para tuberías muy rígidas el relleno lateral puede ser muy compresible en relación con la tubería y la tubería puede llevar prácticamente toda la carga. Para las tuberías flexibles la imposición de carga puede ser sustancialmente menor, ya que la tubería puede ser menos rígida que el relleno lateral

Un sismo presenta dos acciones que puede afectar la integridad de una tubería enterrada; estas son el paso de la onda sísmica (deformación transitoria del suelo) y la deformación permanente del suelo.

2.2.1.-Paso de onda sísmica

El desplazamiento de ondas sísmicas y la vibración transitoria que produce en el suelo genera esfuerzos de compresión, tensión, y flexión en las tuberías enterradas. Aunque esto no es el único factor que provoca las fallas, por lo que se hacen análisis mecánicos del sistema suelo-tubería.

Las investigaciones sobre el comportamiento de las tuberías enterradas durante sismos han determinado que el paso de la onda sísmica, por sí solo, no es capaz de generar fallas en tuberías flexibles, mientras que en tuberías rígidas o viejas, con juntas mecánicas son más susceptibles a los movimientos sísmicos transitorios del suelo debido al paso de la onda.

Las técnicas que existen para el análisis de los efectos del paso de la onda sísmica en tuberías enterradas pueden llegar altos niveles de complejidad. En el caso más simple, el esfuerzo en la tubería se iguala al esfuerzo generado por el suelo y se compara con un esfuerzo límite, este último no se encuentra estandarizado, usualmente el límite de esfuerzo de compresión que puede generar una rotura en las paredes de la tubería es del orden de $0.4t/D$ o $2.42 (t/D)^{1.6}$, donde t es la rigidez de la tubería y D su diámetro. Hall y Newmark (Newmark 1971) propusieron que el esfuerzo limite fuera de 1 o 2 % el diámetro del conducto; y el del esfuerzo de tensión es del orden de 3 a 6 % usado actualmente para las tuberías de acero.

Para un análisis más detallado es necesario realizar el modelo del suelo en las tres direcciones alrededor de la tubería. Durante el procedimiento se aplica el esfuerzo del suelo, se calculan y comparan los esfuerzos axiales y de flexión con los permisibles. En

este caso es difícil establecer una ecuación adecuada para el esfuerzo actuante y la determinación del esfuerzo permisible. Esto requiere de la aplicación de algún método numérico, como elemento finito en la tubería y el suelo, para establecer un comportamiento de estos en el tiempo. Las ondas sísmicas pueden ser aplicadas en ángulos críticos de incidencia, relativos a las tuberías enterradas.

Existen incertidumbres respecto al inicio de un sismo, la respuesta del suelo, y el comportamiento de la tubería; por lo que en ocasiones es necesario realizar análisis de sensibilidad variando los parámetros para obtener una mejor estimación de las acciones sísmicas.

2.2.2.-Deformación permanente del suelo

La deformación del suelo debido a los sismos incluye el deslizamiento de laderas o taludes, licuefacción y asentamientos diferenciales en líneas de fallas geológicas. Idealmente el trazo de líneas de conducción o tuberías enterradas se hace evitando peligros sísmicos; si esto no es posible, los efectos de sismos postulados deben ser considerados para la estimación del movimiento del suelo durante el diseño.

Para obtener una estimación de la deformación permanente del suelo (DPS), es necesario establecer el peligro sísmico, o contar con bases de diseño sísmico, y con la correspondiente predicción del movimiento del suelo. También se requiere de establecer los requerimientos de funcionamiento de tuberías enterradas, que en general son:

- Las tuberías pueden necesitar mantenimiento y reparación, por lo que se debe contar con herramientas adecuadas de inspección y mantenimiento.
- En cuanto a la operación, se requiere de válvulas de apertura para la entrega de las demandas y de seccionamiento para una sectorización conveniente.

Basados en los requerimientos de funcionamiento y esfuerzo permisible o límites establecidos, se analizan las respuestas de la tubería ante el movimiento del suelo por sismos postulados, la tensión, y las cargas de flexión o compresión resultantes en la tubería. Esto es simple en cálculos manuales, si las deformaciones son pequeñas; para las deformaciones grandes, es preferible el cálculo de la interacción suelo-tubería mediante métodos como el de Elemento Finito (Gálvez, 2011).

El diseño sísmico y las deformaciones asociadas para tuberías enterradas dependen de la precisión en la predicción de los movimientos del suelo y de las propiedades del suelo, así como de la precisión de los modelos del comportamiento suelo-tubería. Las variaciones paramétricas de entrada en los modelos dependen del caso en estudio, por esto los costos de diseño y construcción están en función del desarrollo del rango de propiedades del suelo y de las tuberías utilizadas durante el análisis.

2.3.-Fallas en las tuberías

El daño producido por un sismo en tuberías enterradas o líneas de conducción se divide en dos tipos principales de fallas: parcial y total. El daño parcial origina fugas en cualquier punto a lo largo de la longitud de la tubería; la afectación total o colapso, se considera que causa la desconexión entre conductos.

Se suele contabilizar el daño en tuberías a causa de sismo como el número de afectaciones por unidad de longitud. Además de estas fallas generales existen dos mecanismos de fallas comunes en las tuberías enterradas que están ligadas, estos son; licuefacción y flotación.

2.3.1.-Falla total y parcial

A pesar de ser mecanismos de fallas generales, por sí mismo son muy importantes, ya que describen cualquier otro tipo de falla en el análisis hidráulico, de redes de distribución de agua potable.

Los efectos de un sismo sobre las tuberías de una red de agua potable se simplifican en dos acciones horizontales del suelo sobre la tubería, si se representa a la superficie del terreno como un plano, se establece un componente longitudinal y otro transversal, los cuales al actuar en una tubería inmersa en cualquier posición del mismo plano de referencia es propensa a sufrir cualquiera de las afectaciones antes mencionadas.

En la figura 2-2 se esquematiza a las acciones transversales y longitudinales sobre el plano del terreno y sus efectos en las tuberías (fisuras longitudinales o transversales) para los movimientos transversales y de desconexión o colapso para las acciones longitudinales. Es necesario anotar que estas fallas y acciones son simples en comparación con la complejidad que tiene el sistema suelo-tubería.

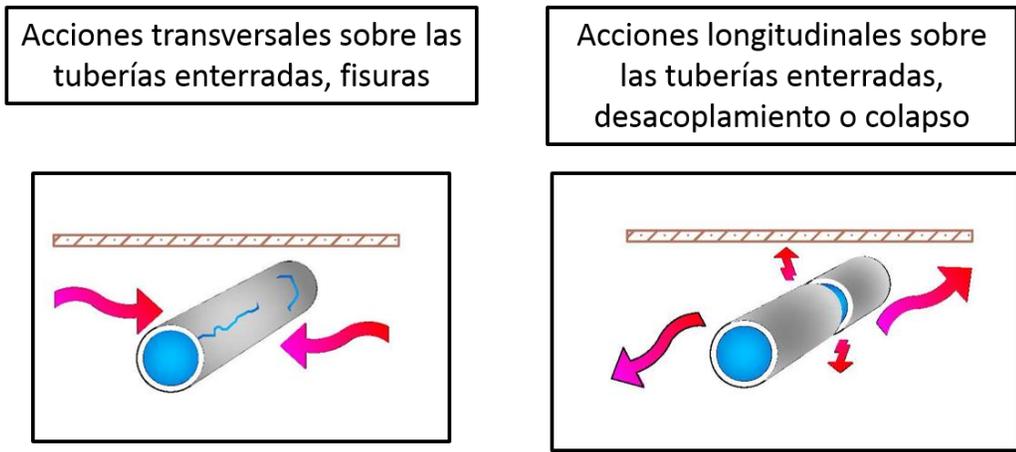


Figura 2-2.-Representación de los movimientos que son resultado de acciones sísmicas

2.3.2.-Flotación y licuefacción

La licuefacción y la flotación son mecanismos comunes en la fallas de tuberías enterradas y tanques, estos ocurren en suelos granulares cuando las estructuras se encuentran por debajo del nivel freático, una cobertura grande de suelo puede prevenir la presencia de estos mecanismos de falla, pero cuando la cobertura es superficial, o los pesos del suelo son pequeños. Si el peso del suelo es pequeño se requieren anclajes, losas o muertos de concreto.

Cuando el suelo se encuentra saturado de agua, existe la posibilidad de licuefacción, y la ocurrencia de flotación es mayor, el suelo puede tener licuefacción si está saturado y es sacudido. La sacudida del suelo por resultado de la actividad sísmica, es una condición crítica cuando el suelo está completamente saturado y la tubería está vacía, esta tendrá poca resistencia a la flotación subirá por el suelo líquido

Capítulo 3 - Relaciones empíricas para estimar la vulnerabilidad sísmica de tuberías

Debido a la naturaleza de los sismos y a las afectaciones que provocan en las redes de distribución de agua potable, se han establecido relaciones empíricas para medir el daño sísmico en las conducciones.

Suele establecerse el daño en la red en términos del número de reparaciones que se deben hacer después de un evento sísmico, se representan por medio de curvas que se construyen con los datos de afectaciones producidas en redes después de un sismo, en relación a algún parámetro representativo del sismo, como función del movimiento del suelo, comúnmente la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS), la deformación permanente del suelo (DPS), también se toman en cuenta diámetro y material de la tubería.

El desarrollo de los algoritmos de daño en tuberías enterradas se ha dado con base en la recopilación de datos de tuberías enterradas sometidas a diferentes niveles de acciones sísmicas y cuantas de éstas se rompieron o comenzaron a tener fugas por la acción sísmica. El principal objetivo de estas expresiones es contabilizar la cantidad de reparaciones, ya sean fracturas totales, fugas o daños en accesorios y estructuras de control, que tendrá que atender el organismo encargado de la distribución del agua después de un sismo.

3.1.- Relaciones de vulnerabilidad en función de la Velocidad máxima horizontal del suelo

La asociación Americana de Líneas Vitales (2001; A.L.A. por sus siglas en inglés) presenta funciones de vulnerabilidad a partir de la propagación de ondas sísmicas de 18 terremotos.

Cuando ocurren desastres naturales de este tipo, el objetivo es reestablecer lo más rápido posible el servicio de distribución de agua y es comprensible que la documentación del daño quede en segundo plano y se vuelva subjetiva, esto resulta, que las estimaciones de daño tengan imprecisiones y el daño real no pueda ser representado adecuadamente, debido a la omisión e incertidumbre de los datos, por que los algoritmos obtenidos de esta información son imprecisos.

En su estudio la A.L.A uso 81 datos de 12 sismos en diverso lugares como: Kobe en Japón, Northridge, Loma Prieta y San Fernando en California, ellos se resumen en la tabla 3-1.

Sismo	Datos	%
1995 Hyogoken-nanbu(Kobe)	9	11
1994 Northridge	35	43
1989 Loma Prieta	13	16
1971 San Fernando	13	16
Otros (8)	11	14
Total	81	100

Tabla 3-1.- Datos de los sismos utilizados para la función de daños sísmico de la A.L.A (A. L. A. , 2001).

La American Lifelines Alliance propone dos diferentes modelos;

- Modelo Lineal de tasa de reparación RR (reparaciones por 1000 pies de tubería), es una línea recta en función de VMHS.

$$RR = a \cdot VMHS \quad [3-1]$$

RR, Tasa de daño por 1000 ft de tubería con una pendiente media (a), pendiente media **0.00187**

VMHS, Velocidad máxima horizontal del suelo en in/s.

- Modelo potencial

$$RR = b \cdot VMHS^c \quad [3-2]$$

RR, Tasa de daño por 1000 ft de tubería

b, y c coeficientes obtenidos de un ajuste por mínimos cuadrados, como:

$$b = 0.00108 \text{ y } c = 1.173$$

VMHS, Velocidad máxima horizontal del suelo en in/s.

3.2.- Relaciones de vulnerabilidad en función de la Deformación Permanente del Suelo.

Los efectos de propagación de onda sísmica se ven reflejados en la deformación del suelo, es por eso que se ha utilizado la deformación permanente del suelo (DPS), para representar el daño de las tuberías enterradas. De igual manera se cuenta con una base de datos que contiene 42 puntos, recolectados en 4 sismos, donde los mecanismos de falla fueron licuefacción y la falla del terreno.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los datos utilizados en la obtención de la función de daño.

Sismo	Dato	%	Mecanismo de Falla
Loma Prieta 1989	12	28	Licuefacción por asentamiento
Nihonkai-Chubu 1983	20	48	Licuefacción por deslizamiento
San Fernando 1971	5	12	Flotación local
San Francisco 1906	5	12	Licuefacción por deslizamiento
Total	42	100	

Tabla 3-2.- Mecanismos de falla presentados en distintos sismos. (A.L.A.2001).

La Agencia Federal de Manejo de Emergencias (F.E.M.A.) por medio de su manual de riesgos HAZUS (1994), basándose en la experiencia y la información recolectada de fallas suelo por efecto sísmico, considera que un sistema de distribución de agua cuenta con mayor probabilidad de quedar inmediatamente inoperable después de fallas de este tipo.

Así los modelos lineal y potencial de daño sísmico en función de la deformación permanente del suelo DPS quedan de la siguiente manera.

- Modelo Lineal de tasa de reparación RR (reparaciones por 1000 pies de tubería), es una línea recta en función de DPS.

$$RR = a \cdot DPS \quad [3-3]$$

RR, Tasa de daño por 1000 ft de tubería

a, pendiente media del conjunto de datos, en este caso $a = 0.156$

DPS, Deformación permanente suelo en in.

- Modelo potencial

$$RR = b \cdot VMHS^c \quad [3-4]$$

RR, Tasa de daño por 1000 ft de tubería

b, y c coeficientes obtenidos mediante mínimos cuadrados, para esta serie de datos son $a = 1.06$ y $c = 0.319$

DPS, Deformación permanente suelo en in.

3.3.- Recomendaciones, consideraciones y modificaciones de La Asociación Americana de Líneas Vitales (2001)

La A.L.A. recomienda usar las siguientes funciones de vulnerabilidad cuando no se cuenta con datos de las tuberías: como tipo de unión, diámetro, material, estado físico

Las funciones anteriores representan el comportamiento promedio de todos los tipos de tuberías y se utilizan para predecir el daño en tuberías enterradas, debido a las acciones sísmicas, cuando no se cuenta con la información necesaria para realizar un análisis más detallado.

En caso de contar con información, como: material, diámetro y estado de la instalación, es posible modificar las curvas, para contar con una mejor estimación del comportamiento de los distintos tipos de tuberías.

A continuación se presentan las funciones de daño modificadas por un coeficiente K que se encuentra en función del material y tamaño de la tubería, tipo de unión y condición respecto al tipo de suelo

- Función de daño de la Velocidad Máxima horizontal.

$$RR = K_1 \cdot 0.00187 \cdot (VMHS) \quad [3-5]$$

RR, Tasa de daño por 1000 ft de tubería

K_1 , Factor que está en función de las características del suelo y la tubería.

VMHS, Velocidad máxima horizontal del suelo en in/s.

- Función de daño de la Deformación Permanente del Suelo.

$$RR = K_2 \cdot 1.06 \cdot DPS^{0.319} \quad [3-6]$$

RR, Tasa de daño por 1000 ft de tubería

K_2 , Factor que está en función de las características del suelo y la tubería.

DPS, Deformación permanente del suelo en in.

Las tablas para los factores K_1 y K_2 se presentan en las tablas 3-3 y 3-4, respectivamente.

Material de la tubería	Tipo de junta	Suelo	Diámetro	Factor K_1
Acero fundido	Cemento	Todos	Pequeños	1
Acero fundido	Cemento	Corrosivo	Pequeño	1.4
Acero fundido	Cemento	No Corrosivo	Pequeño	0.7
Acero fundido	Junta de Goma	Todos	Pequeño	0.8
Acero soldado	Soldadura de arco	Todos	Pequeño	0.6
Acero soldado	Soldadura de arco	Corrosivo	Pequeño	0.9
Acero soldado	Soldadura de arco	No Corrosivo	Pequeño	0.3
Acero soldado	Soldadura de arco	Todos	Grande	0.15
Acero soldado	Junta de Goma	Todos	Pequeño	0.7
Acero soldado	Atornillado	Todos	Pequeño	1.3
Acero soldado	Remaches	Todos	Pequeño	1.3
Asbesto Cemento	Junta de Goma	Todos	Pequeño	0.5
Asbesto Cemento	Cemento	Todos	Pequeño	1
Concreto	Junta de arco	Todos	Grande	0.7
Concreto	Cemento	Todos	Grande	1
Concreto	Junta de Goma	Todos	Grande	0.8
PVC	Junta de Goma	Todos	Pequeño	0.5
Acero Dúctil	Junta de Goma	Todos	Pequeño	0.5

Tabla 3-3.- Valores de la variable K_1 , en función de las características de tubería y tipo de suelo. (F.E.M.A., 1994)

Material de la tubería	Tipo de junta	Factor K_2
Acero fundido	Cemento	1
Acero fundido	Junta de Goma	0.8
Acero fundido	Junta Mecánica	0.7
Acero soldado	Soldadura de arco, Diámetro grande, Suelo no corrosivo	0.15
Acero soldado	Junta de Goma	0.7
Asbesto Cemento	Junta de Goma	0.8
Asbesto Cemento	Cemento	1
Concreto	Soldadura	0.6
Concreto	Cemento	1
Concreto	Junta de Goma	0.7
PVC	Junta de Goma	0.8
Acero Dúctil	Junta de Goma	0.5

Tabla 3-4.-Valores para la variable K_2 en función del tipo de junta entre tuberías. (F.E.M.A., 1994)

3.4.- Función de vulnerabilidad sísmica para Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de México

Pineda y Ordaz (2002) realizaron una investigación con el objetivo de obtener una expresión que relacione los daños recibidos en una red de distribución de agua con la velocidad máxima horizontal de un sismo, para el caso específico de la red de distribución de agua potable del Distrito Federal, basada en el evento del 19 de septiembre de 1985 con datos de los daños reportados por Ayala G. y O'Rourke (1993), observados en los sistemas de agua potable primario y secundario del Distrito Federal después del evento de dicha fecha.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las fallas en la red de distribución de agua de los datos presentados de por O'Rourke en un reporte extenso de los daños provocados por el terremoto de 1985 en la Ciudad de México. En seis delegaciones se presentaron 159 fugas de 175 registradas en el valle de la ciudad de México.

Delegación	No de Fugas
Gustavo A. Madero	32
Cuauhtémoc	32
Venustiano C.	37
Benito Juárez	10
Iztacalco	19
Iztapalapa	29

Tabla 3-5.-No de reparaciones realizadas por delegación, después del sismo de 1985. (Ayala G. y O'Rourke, 1993)

El cálculo de la relación de vulnerabilidad para la Ciudad de México se realizó tomando en cuenta el mapa de velocidades horizontales del suelo para el sismo de dicha fecha, se promedian los valores de las velocidades de los componentes N-S y E-W.

La función varía según un rango de velocidades en cm/s y describe el daño como el número de fallas por unidad de longitud de tubería. La expresión es la siguiente;

$$D_i = \begin{cases} 0 & \text{si } V_{max} < 5.35 \text{ cm/s} \\ 0.1172 + 0.7281(\eta^{\wedge}) & \text{si } 5.35 \leq V_{max} < 95 \text{ cm/s} \\ 0.00137(V_{max}) + 0.70458 & \text{si } V_{max} \geq 95 \text{ cm/s} \end{cases} \quad [3-7]$$

$$\eta^{\wedge}(V_{max}) = \int_{-\infty}^{V_{max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{v-\mu}{\sigma}\right)^2} dv \quad [3-8]$$

El conjunto de datos con el que se elaboró esta expresión tiene un comportamiento parecido a la función de distribución de probabilidad normal acumulada; en el trabajo realizado por Pineda y Ordaz (2002) se observa que la estimación de daño es adecuada para un intervalo de 5.35 a 95 cm/s para la velocidad máxima horizontal del suelo. Para velocidades máximas a los 95 cm/s la ecuación propuesta, se comporta de manera asintótica y llega a un valor medio de 0.8453 fallas/km. Esto no quiere decir que se el valor máximo de fallas que pueda ocurrir, y se debe tomar en cuenta las condiciones de la infraestructura, además de que la expresión es empírica y únicamente representa un grupo de datos. Por esto en el mismo trabajo se realizó una corrección manteniendo el comportamiento de la función y solo sería posible obtener una mejor representación si se tuvieran datos de daño ocurrido por sismos de mayor magnitud.

Capítulo 4 - Afectaciones de tipo hidráulico en las redes de distribución de agua potable.

En este trabajo se propone una metodología para evaluar la vulnerabilidad de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP), considerando múltiples fallas en la red, se asumen diferentes probabilidades de falla para cada tubería bajo las condiciones de un sismo y se calculan las afectaciones que el daño representa al suministro de agua. La estimación del daño hace posible establecer el estado de servicio y la confiabilidad de una red de agua potable, además de hacer posible planes de emergencia en los que se pueda encaminar las reparaciones a los sitios donde sea más importante el restablecimiento del servicio.

En los estudios de vulnerabilidad de infraestructura hidráulica pocas veces se ha estudiado el funcionamiento de los sistemas después de la afectaciones sísmicas, algunos estudios proponen metodologías que realizan modelación hidráulica por medio de software como Epanet (Rossman, 2000) o KYpipe (Boulos and Wood, 1990).

En años recientes se han introducido nuevos modelos matemáticos para evaluar la confiabilidad de las RDAP, como GIRAFFE, que realiza el análisis de la respuesta de manera gráfica e iterativa para el seguimiento del flujo en un terremoto, desarrollado en la Universidad de Cornell en el 2008, implementa Sistemas de Información Geográfica (SIG) y contiene algunas consideraciones de pérdida de agua como fugas. GIRAFFE, está basado en un análisis de presión-conducción; esto es, que se cumple con las demandas del usuario a pesar de la presión existente en el sistema, esta representación no es del todo correcta, una mejor representación es presión-déficit, debido a un funcionamiento anormal, incluyendo las abruptas alteraciones en la topología después de un sismo.

Se propone una metodología donde se integren las condiciones necesarias para llevar a cabo un análisis del funcionamiento de un sistema de distribución de agua potable después de un evento sísmico, se revisarán aspectos sísmicos e hidráulicos con el fin de obtener un modelo que represente en cierto grado el comportamiento y respuesta de las RDAP.

4.1.-Aspectos Sísmicos

Es necesario conocer los tipos de suelo y las respuestas que estos tendrán ante acciones y movimientos provocados por terremotos, estos pueden ser resumidos en los espectros de respuesta elásticos, los cuales son espectros de aceleraciones de diseño en función del periodo natural de vibración del suelo, sirven para obtener las fuerzas de inercia que sirven para estimar los esfuerzos que deberá que resistir una estructura, ante una acción sísmica.

A partir del terremoto de 1989 las normativas de construcción y diseño en la Ciudad de México se modificaron en función de los efectos causados por este sismo. Se generaron para cada tipo de suelo presente, espectros de diseño sísmico; de acuerdo con la zona en que este ubicada es posible asignar a cada una de las tuberías de una RDAP valores de un espectro de respuesta sísmico. En la ciudad de México se cuenta con las Normas Técnicas Complementarias de Diseño Sísmico, en ellas podemos encontrar la zonificación sísmica, la cual se define por las condiciones de sitio, esta clasificación considera seis zonas y sub zonas con las siguientes características:

- Zona I: Tierra Dura
- Zona II: Transición
- Zona III: Suelo Suave (dividido en cuatro sub zonas)
 - ◆ III a
 - ◆ III b
 - ◆ III c
 - ◆ III d

Las aceleraciones pico horizontales por zona, están definidas en las ecuaciones 4-1 a 4-4 y los variables presentes definidas en la tabla 4-1, junto con los parámetros para calcular los espectros de aceleración.

$$a = a_0 + (c - a_0) \cdot \frac{T}{T_0} ; \text{ Si } T < T_a \quad [4-1]$$

$$a = c ; \text{ Si } T_a \leq T \leq T_b \quad [4-2]$$

$$a = q \cdot c ; \text{ Si } T > T_b \quad [4-3]$$

$$q = \left(\frac{T_b}{T} \right)^r, \quad [4-4]$$

Zona	c	a₀	T_a	T_b	r
I	0.16	0.04	0.2	1.35	1.0
II	0.32	0.08	0.2	1.35	1.33
IIIa	0.40	0.10	0.53	1.8	2.0
IIIb	0.45	0.11	0.85	3	2.0
IIIc	0.40	0.10	1.25	4.2	2.0
IIIId	0.30	0.10	0.85	4.2	2.0

Tabla 4-1.-Valores para el espectro de respuesta sísmico por zona. (NTC, 2010)

c, coeficiente sísmico

a, ordenada del espectro, como fracción de la aceleración de la gravedad

a₀, valor de aceleración que corresponde al periodo T=0

r, exponente en las expresiones para el cálculo de las ordenadas de los espectros de diseño

T, Periodo natural de vibración de la estructura

T_a , T_b Periodos característicos de los espectros de diseño

En la figura 4-1 se muestran las zonas sísmicas según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico (2010)

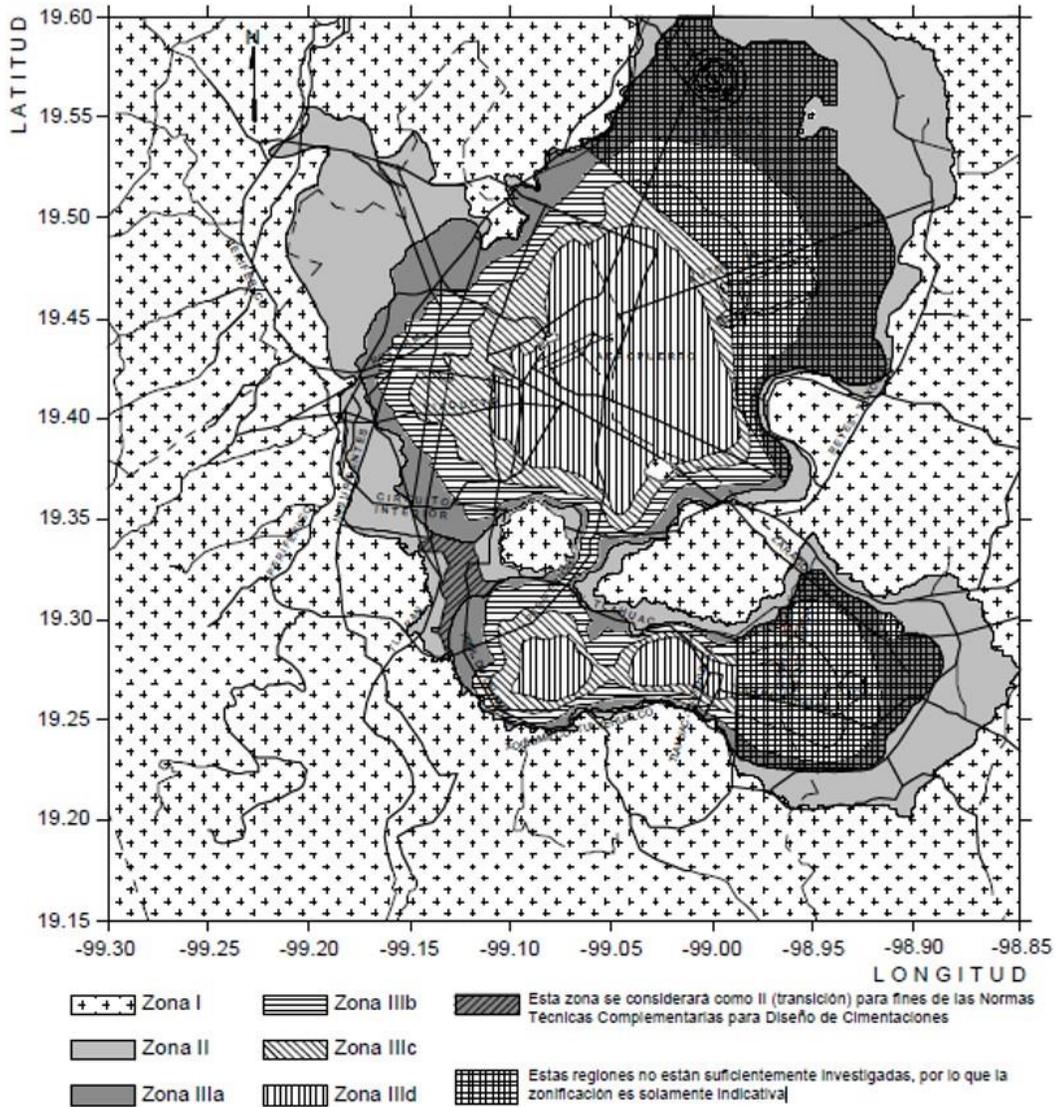


Figura 4-1.--Zonificación sísmica para la Ciudad de México (NTC. 2010)

La zonificación anterior nos indica los diferentes tipos de suelo que existen en la Ciudad de México, la figura 4-2 muestra los periodos naturales de vibración para cada tipo de suelo en el Valle de México.

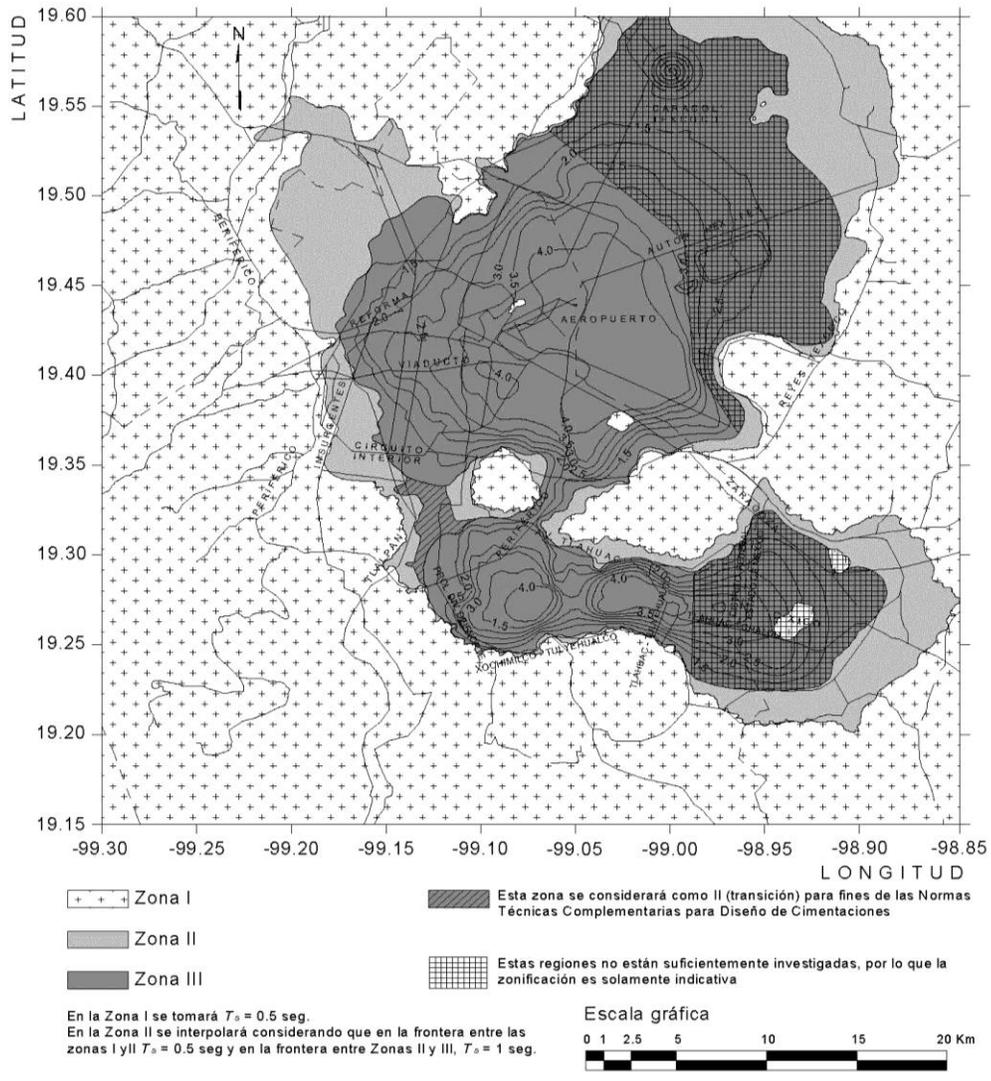


Figura -4-2.- Zonificación para periodos naturales de vibración del suelo en la Ciudad de México (NTC 2010)

La información anterior es de gran valor, es el resultado de trabajo de investigación y desarrollo de técnicas en ingeniería sísmica, que ahorran análisis geotécnicos sofisticados. En caso de no contar con una zonificación como la anterior será necesario obtener espectros de sitio, para obtener los valores de aceleración y periodo natural de vibración, requeridos en el análisis.

4.1.1.- Velocidad máxima horizontal del suelo, VMHS.

Para la determinación del daño sísmico se utiliza la formulación propuesta por Pineda y Ordaz (2002), dado que está hecha específicamente para los efectos sísmicos en la Ciudad de México. Para la obtención de la velocidad máxima horizontal se utilizan los mapas de velocidad máxima horizontal realizados por los mismo autores.

En el trabajo “*Mapas de Velocidad Máxima del Suelo para la Ciudad de México*” (Pineda y Ordaz, 2004) se representa la velocidad máxima horizontal de suelo para sismos supuestos o históricos, a partir de un software desarrollado para estimar espectros de sitio. Usaron datos de estaciones acelerográficas y se relacionan las frecuencias de un espectro de amplitudes de Fourier con la magnitud y distancia focal de sismo

Los mapas de VMHS presentados en el trabajo mencionado anteriormente, corresponden a tres sismos en los cuales se pudo registrar información de gran calidad, y para el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985, este último, debido a su magnitud, aceleraciones generadas y daños provocados. Esta información se encuentra representada de esta forma solo para el Valle de la Ciudad de México y en caso de que se necesite en cualquier otra ciudad se puede realizar en base a la obtención de espectros de respuesta sísmica para el sitio en estudio y a estaciones acelerográficas cercanas.

Sismo	Magnitud	Distancia Focal (Km)	Profundidad Focal (Km)	No de Registros
25 abril 1989	6.9	304	19	60
14 sep. 1995	7.4	305	22	42
9 oct. 1995	8.0	560	5	42
19 sep. 1985	8.1	295	15	8

Tabla 4-1.-Datos de los sismos utilizados en los mapas de Velocidad Máxima Horizontal del suelo. (Pineda y Ordaz, 2004)

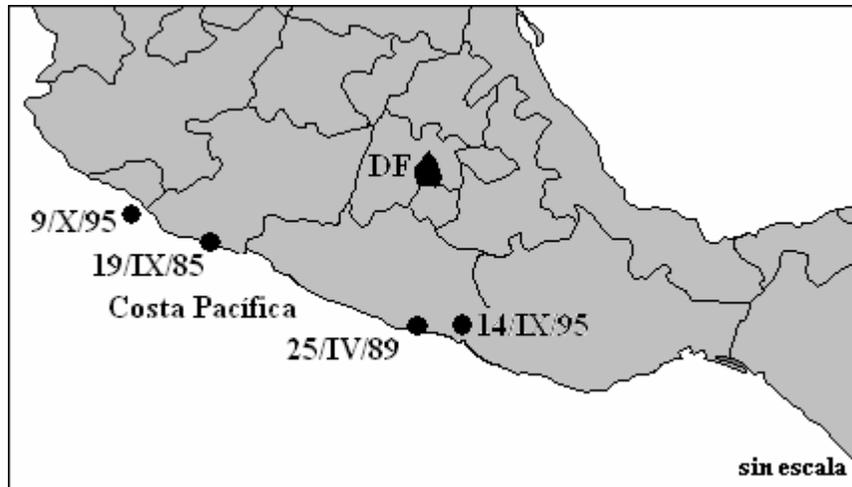


Figura -4-3.- Ubicación de los sismos para los mapas de VMHS respecto a la Ciudad de México. (Pineda y Ordaz, 2004)

A continuación se presentan los mapas de velocidades máximas en sus componentes Norte-Sur y Este-Oeste para el sismo de 1985.

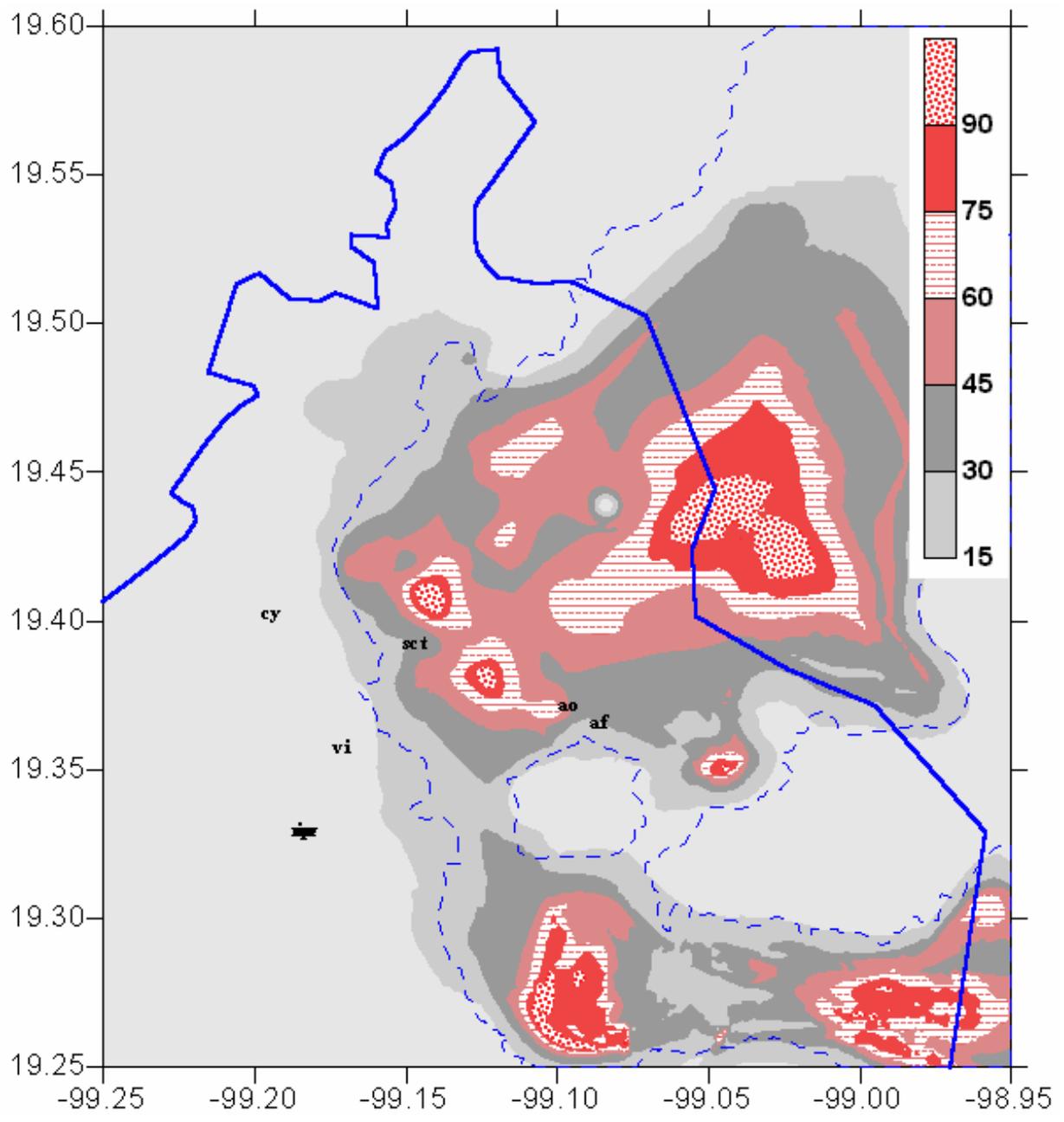


Figura -4-4.- Mapas de Velocidad Máxima Horizontal del Suelo N-S (Pineda y Ordaz, 2004)

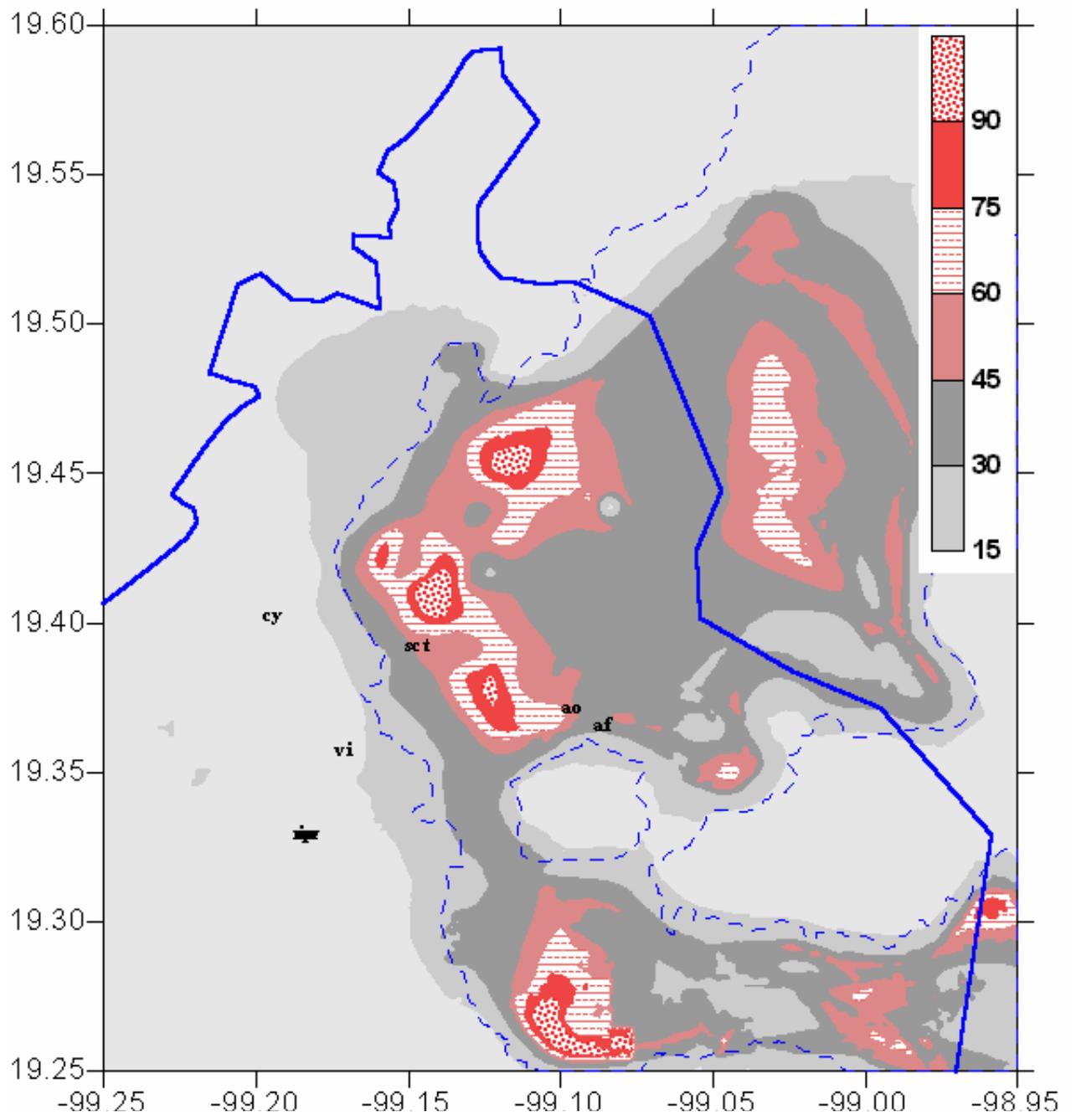


Figura -4-5.- Mapas de Velocidad Máxima Horizontal del Suelo E-W (Pineda y Ordaz, 2004)

4.2.-Aspectos hidráulicos

El análisis hidráulico se realiza con el modelo para flujo permanente en redes de distribución de agua potable REDESTA (Fuentes y Sanchez 1991), del Instituto de Ingeniera, UNAM. Se eligió este modelo, debido a que permite considerar la entrega de agua a los usuarios de la red en función de las cargas disponibles para cada punto donde se solicita, y en el mismo modelo se estima el estado de servicio, como el déficit de la cantidad de agua demanda.

4.2.1.- Método estático modificado para calcular redes de tuberías de agua potable

El caudal suministrado por una red de distribución de agua, está en función de la presión disponible en el punto de entrega, en los métodos tradicionales de cálculo se considera que siempre se entrega el volumen de agua demandado, sin importar la carga de presión disponible; el procedimiento llamado método estático modificado (MEM), considera que la carga de presión debe de ser mayor a una mínima establecida, para poder entregar el caudal demandado, así se entrega un caudal proporcional a la carga de presión disponible. Cuando se comparan todos los caudales demandados con los que realmente se entregaron, es posible determinar si existe un déficit en el suministro.

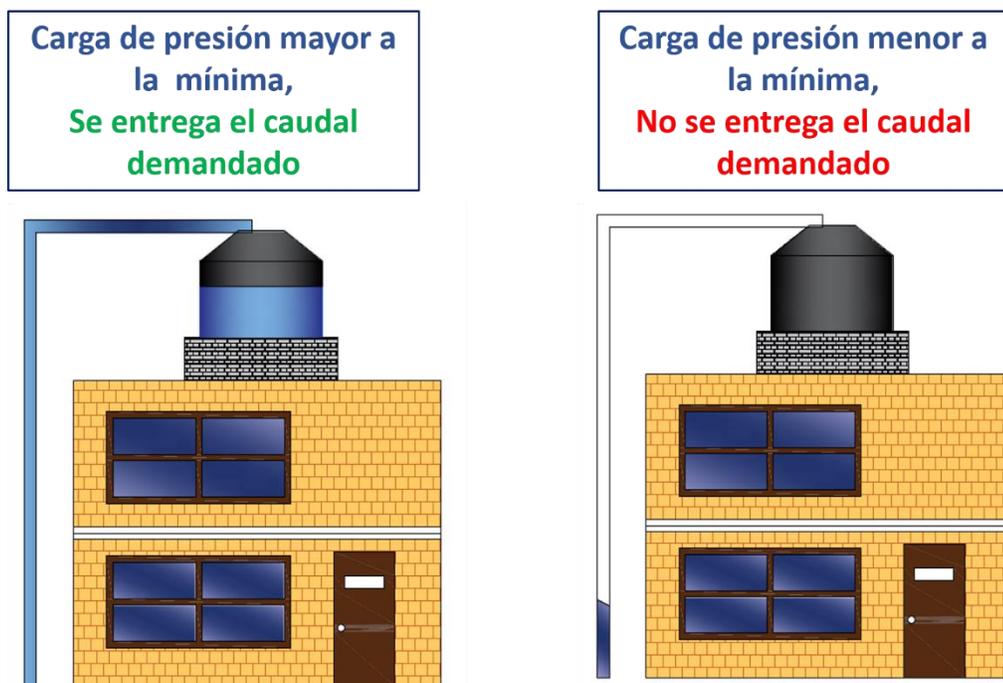


Figura -4-6.- Representación de la Relación Carga-gasto.

4.3.-Metodología propuesta para evaluar el daño y suministro de una Red de Distribución de Agua Potable.

Con el modelo matemático de una red de distribución de agua se identifican las tuberías con mayor susceptibilidad de recibir un daño por efecto de un sismo. Ello se hace en función del material de la tubería, efectos del sismo, tipo de suelo y las condiciones hidráulicas de la red.

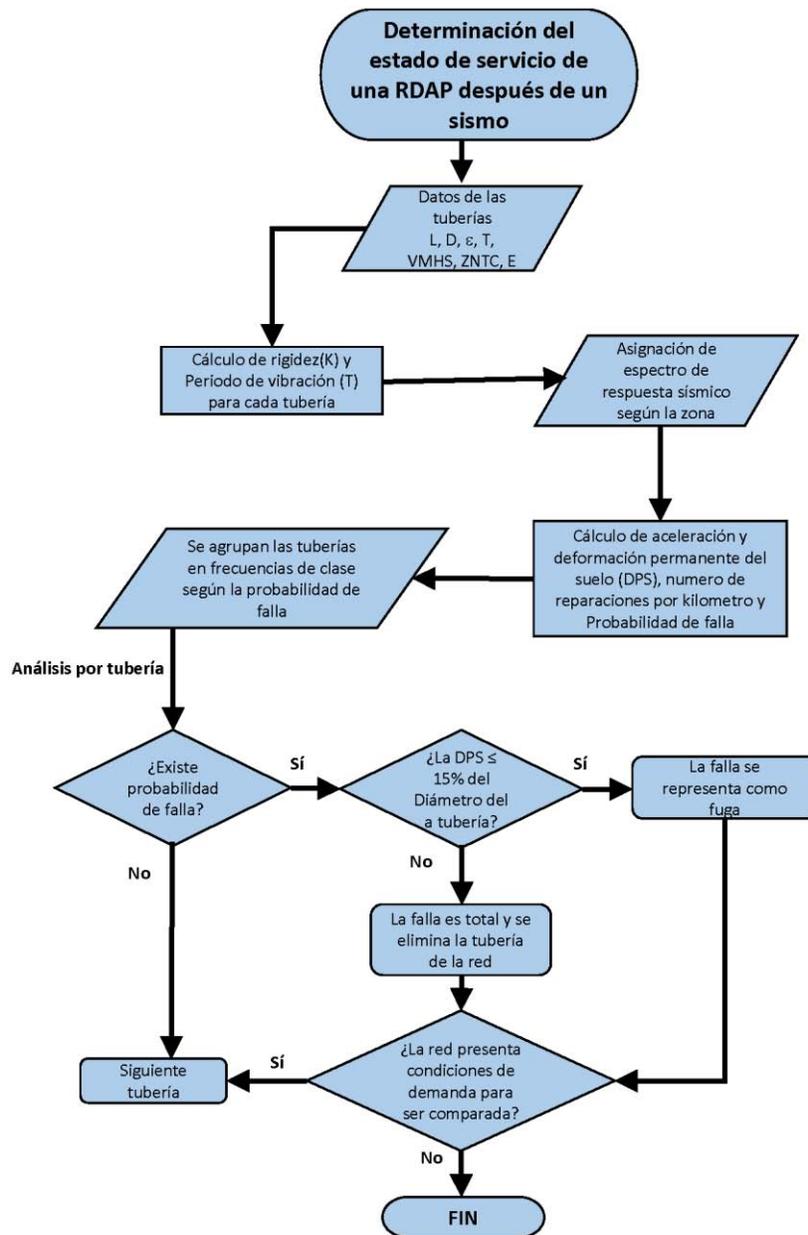


Figura -4-7.-Diagrama descriptivo de la metodología propuesta.

La secuencia de la metodología propuesta se puede seguir en el diagrama de flujo de la figura 4-7, tiene el objetivo de determinar la vulnerabilidad de las tuberías con el siguiente orden:

a) Se ubica espacial y geográficamente la red de distribución para asignar a cada tubería un valor de velocidad máxima horizontal de suelo (VMHS) debido al sismo.

b) Con base en la zonificación sísmica, normada en la Ciudad de México, se asignan las variables de periodo y aceleración de un espectro de respuesta sísmica.

c) Con los valores de la velocidad máxima horizontal se estima el daño por unidad de longitud en cada tubería con la ecuación 3-7 y la probabilidad de ocurrencia de esta, con la expresión 4-1, planteada por ALA (2001).

$$P_{os} = 1 - e^{-N_i L} \quad [4-5]$$

P_{os} , Probabilidad de falla en la tubería

N_i , Numero de reparación por Km

L , longitud de la tubería en km

d) Para determinar si las fallas son parciales o totales utilizamos la relación entre el diámetro y la deformación permanente del suelo, la cual se obtiene a partir de la teoría del movimiento armónico simple como.

$$DPS/D \quad [5]$$

DPS , Deformación permanente del suelo en m.

D , Diámetro de la tubería en m.

e) El periodo natural de vibración efectivo del sistema suelo-tubería, se obtiene de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los periodos de vibración en los elementos del sistema se supone la influencia de la rigidez del agua dentro de la tubería:

$$T_{ef} = \sqrt{T_{tub}^2 + T_h^2} \quad [4-7]$$

T_{ef} Periodo natural de vibración efectivo del sistema en s.

T_{tub} Periodo natural de vibración de la tubería en s.

T_h Periodo natural de vibración hidráulico en s.

Para la obtención del periodo natural de vibración de la tubería e hidráulico, se utiliza la expresión de rigidez de Moser (2001) considerada la segunda en importancia para el diseño de tuberías enterradas, como, para obtener el periodo de vibración.

$$k(h, tub) = \frac{E_{(h,tub)} t^3}{12 d_m^3} \quad [6]$$

$k(h, tub)$, Rigidez de la tubería o debida al agua (hidráulica) en kg/m^2
 $E_{(h,tub)}$, Módulo de elasticidad volumétrico del agua y de la tubería en kg/m^2
 t , Espesor de la tubería en m .
 d_m , Diámetro de la tubería en m .

Y así el periodo natural de vibración según el movimiento armónico simple (P Beer, R. Jhonston, 2010):

$$T_{(h,tub)} = \frac{2 \cdot \pi}{k_{(h,tub)}^{1/2}} \quad [4-9]$$

$T_{(h,tub)}$ Periodo natural de vibración de la tubería o hidráulico en s .
 $k(h, tub)$, Rigidez de la tubería o debida al agua (hidráulica) en kg/m^2
 π Constante pi.

4.3.1-Parametro DPS/D

Una vez que para cada tubería de la red, se estimó la tasa de daño y la probabilidad de ocurrencia de las fallas, se compara el valor la de deformación permanente del suelo respecto al diámetro del conducto y *si este es mayor al 15%, se considera que la tubería colapsa, si es menor, la falla se caracteriza como fuga.*

El cálculo de la deformación permanente del suelo (DPS) de las líneas de conducción de agua potable es muy importante, ya que es un parámetro que ha sido utilizado para medir el daño en tuberías enterradas y el cual es complicado de estimar, por si solo el sistema suelo-tubería implica análisis complicados, además, ellos implican la revisión de los esfuerzos generados por el suelo y la tubería, y la comparación con los estados limite, lo cual no es simple.

La deformación permanente se obtiene con una expresión basada en la teoría del movimiento armónico simple (Newmark,1971).

$$DPS = \alpha_g \cdot S \cdot T_c \cdot T_D \quad [4-10]$$

α_g , *aceleración del suelo en m/s².*

S , *coeficiente del suelo (adimensional).*

T_c , *límite superior del periodo de tramo de aceleración constante en s.*

T_D , *Valor de comienzo del tramo de respuesta de desplazamiento constante en*

s.

La relación entre la deformación permanente del suelo (DPS) y el diámetro de la tubería (D) nos permite visualizar en qué manera un sismo afecta un conducto, considerando que el desplazamiento de tuberías o entre tuberías ocasionado por un sismo no puede ser mayor del 15%, valor conservador si se toman en cuenta los valores reportados por Moser (2001), de pruebas de laboratorio donde las tuberías se someten a pruebas de resistencia y se fracturan o se desconectan unas de otras en un rango de deformación relativa a su diámetro del 5 al 10 %.

La consideración de la deformación relativa al diámetro es una primera aproximación para contar con un parámetro que permita decidir el tipo de falla que presentara una tubería debido a las acciones sísmicas, el cual se debe afinar mediante experimentación, donde las acciones o esfuerzos a los que se encuentre sometida la tubería simulen condiciones más cercanas a las que se presentarían durante un movimiento telúrico.

4.3.2-Verificación del método

Antes de aplicar la metodología a una red real, se presenta un ejemplo para mostrar de una manera más simple el método de cálculo propuesto.

Se considera la red de agua potable de la figura 4-8 que propuso Rosales (2012) en su trabajo de optimización y rehabilitación de redes de distribución.

En el trabajo de origen solo se dispone de la topología de la red, así que es necesario suponer una ubicación geográfica, por lo que se propondrán valores de velocidad máxima horizontal y de zonificación sísmica, en 2 combinaciones diferentes, con fines de comprobación.

La tabla 4-1 contiene la información para la representación de la red en el modelo matemático: tuberías con longitud, rugosidad, y nodos con elevación y demanda.

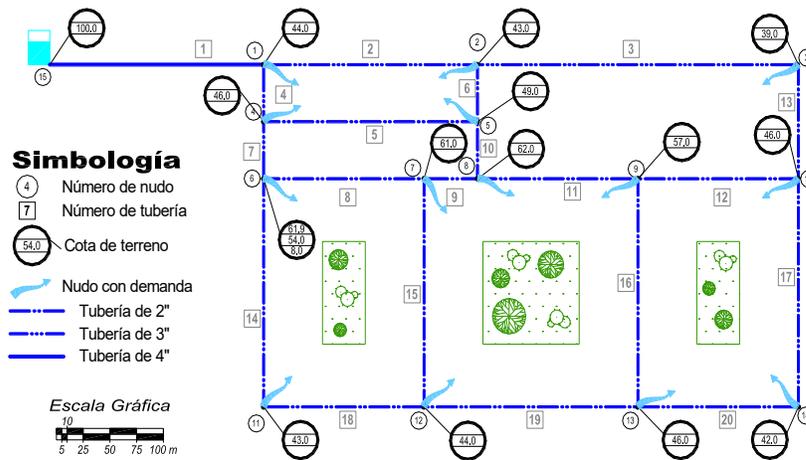


Figura 4-8.-Representación de la red presentada por Rosales. (2012)

Tubería	Distancia	ϵ (mm)	Diámetro (")	Nodo	Elevación	Demanda (l/s)
1	100	0.2	6	1	2444	0.451
2	200	0.2	3	2	2443	1.128
3	300	0.2	2	3	2439	1.353
4	50	0.2	3	4	2446	0.902
5	200	0.2	2.5	5	2449	1.917
6	50	0.2	2	6	2454	1.394
7	50	0.2	2	7	2461	1.958
8	150	0.2	2	8	2462	1.462
9	50	0.2	2	9	2457	3.464
10	50	0.2	2.5	10	2446	1.731
11	150	0.2	2	11	2443	1.056
12	150	0.2	2	12	2444	2.314
13	100	0.2	2	13	2446	2.314
14	200	0.2	2	14	2442	1.056
15	200	0.2	2	15	2512	Tanque
16	200	0.2	2			
17	200	0.2	2			
18	150	0.2	2			
19	200	0.2	2			
20	150	0.2	2			

Tabla 4-1.-Topología de la red presentada por Rosales (2012)

Se usa como herramienta auxiliar un sistema de información geográfica, para poder asignar a cada tubería un valor de velocidad máxima horizontal y dado que los análisis sísmicos la contienen, sus componentes norte-sur (N-S) y oeste-este (W-E), se obtiene una resultante. Por la escala de la red en estudio se supuso un zonificación de velocidades máximas resultantes que abarcara un rango variable en las tuberías.

Las velocidades supuestas se encuentran dentro de las magnitudes presentadas en la Ciudad de México durante el sismo de 1985, en la imagen 4-9 se presenta el mapa de velocidades supuesto para la combinación de zonificación sísmica del tipo de suelo 1.

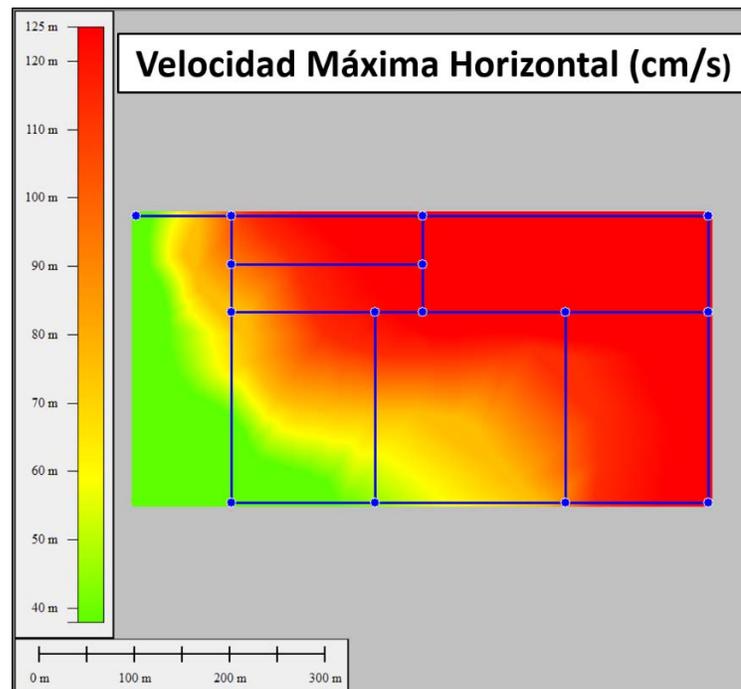


Figura -4-9.- Mapas de velocidad máxima horizontal del suelo para la combinación del suelo 1 en la red de Rosales (2012).

En la figura 4-10 se muestra la combinación del tipo de suelo 1; utilizada para asignar los periodos naturales de vibración y los espectros de respuesta sísmica.

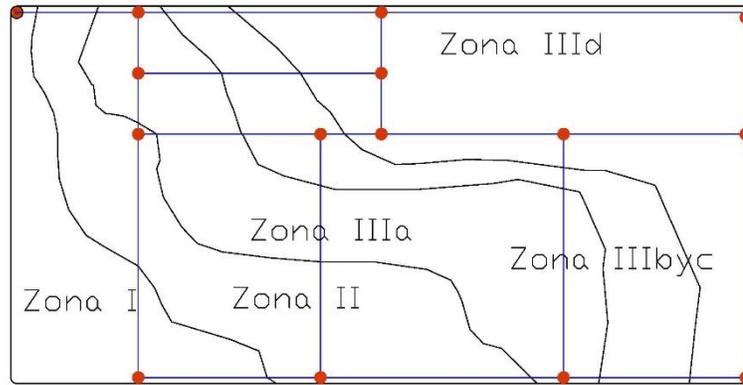


Figura -4-10.-Zonificación propuesta para la combinación del suelo I en la red de Rosales (2012)

En la tabla 4-2 se observa para cada tubería el valor asignado de velocidad máxima horizontal, junto con su correspondiente zonificación sísmica, conforme a las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México (2010).

Tubería	VMHS (cm/s)	Zonas
1	64.47	I
2	121.56	IIIc
3	125.00	IIId
4	97.88	II
5	115.38	IIIa
6	125.00	IIId
7	82.46	II
8	102.88	II
9	124.40	IIIc
10	125.00	IIId
11	125.00	IIId
12	125.00	IIId
13	125.00	IIId
14	50.76	I
15	82.73	II
16	107.50	II
17	125.00	IIId
18	38.94	I
19	63.71	I
20	117.73	IIIb

Tabla 4-2.- Valores de VMHS y de zonificación sísmica para cada tubería

El cálculo de las variables necesarias para el análisis en cada una de las tuberías representa una gran cantidad de información, por lo que se presenta el desarrollo de éste solo en una tubería y los resultados generales se presentan en tablas.

A manera de ejemplo y sin algún criterio concreto se toma la tubería No 5 para el desarrollo del cálculo, la cual cuenta con los siguientes datos:

Longitud= 200 m
Diámetro= 3 in.
Vmhs= 115.38 cm/s
Zonificación sísmica= IIIa
Módulo de elasticidad $E= 2.1 \cdot 10^{10}$ kg/m² (acero)

Con la ecuación 4-8 se calcula la rigidez de la tubería y la rigidez debida al agua dentro de la tubería. Para el caso de comprobación del método la rigidez hidráulica no influye demasiado en la rigidez efectiva, debido al tamaño de los conductos, sucede lo contrario para diámetros y longitudes mayores, los periodos de vibración correspondientes a cada rigidez se estiman con la ecuación 4-9 y el periodo de vibración efectivo con la ecuación 4-7.

Periodo natural de vibración de la tubería, $t_{tub}=0.412$ s.
Periodo natural de vibración hidráulica, $t_h=1.4 \cdot 10^{-5}$ s.
Periodo natural de vibración efectivo, $t_{ef}=0.413$ s.

Los valores del espectro de respuesta sísmico se asignan según la zona y el periodo de natural de vibración efectivo con las ecuaciones, como la tubería No. 5 se encuentra en la zona IIIa:

Coeficiente sísmico, $c=0.4$.
Valor de aceleración, $a_0=0.1$.
Periodo característico $T_a=0.53$.
Periodo característico $T_b=0.18$.
Exponente $r=2$.
Como $T= T_{ef}=0.413 \leq T_b$ y $T \geq T_a$, aceleración $a=33.36$ cm/s².

Con el valor de la velocidad máxima horizontal del suelo, VMHS=115.38 cm/s, se puede estimar el daño en la tubería 5 como el número de reparaciones por kilómetro y la probabilidad de que falle, con las ecuaciones 3-7 y 4-5 respectivamente.

Así el daño $D= 0.8627$ reparaciones/km, con una probabilidad de ocurrencia $P=0.16$.

Teniendo el valor de la aceleración del suelo se puede obtener con la ecuación 4-10 y 4-6 la deformación permanente del suelo y la relación de ésta con el diámetro de la tubería:

DPS=0.037m y DPS/D=59.03%, bajo el criterio y metodología propuestos la falla debe ser representado como un colapso de tubería.

Después de realizar el procedimiento descrito, a todas las tuberías se cuentan con un valor de daño sísmico, probabilidad de falla y deformación permanente del suelo. A partir de las cuales se realiza el análisis de la afectación al suministro de agua potable.

Las RDAP suelen tener un número grande de tuberías, por lo que la información se organiza a partir de frecuencias de clase. Para un histograma con once intervalos de clase, considerando la menor y mayor probabilidad calculadas, identificando el número de tubería.

Las frecuencias de clase se dividen en once intervalos para que se puedan visualizar las probabilidades en intervalo de un décimo, que dada la función de vulnerabilidad van del 0 al 1, otra fracción menor del entero no sería descriptiva para el análisis deseado y una mayor sería demasiada.

En la tabla no 4-3 se muestra los resultados de la aplicación del método propuesto, se tiene en cuenta que esta red tiene un número limitado de tuberías, por lo cual fue fácil visualizar la información obtenida.

En la columna 1, se encuentra el número con el que se etiqueta a cada tubería, la número 2 y 3 contienen la longitud y diámetro correspondientes, la cuarta columna contiene la velocidad máxima horizontal del suelo VMHS, la quinta contiene la aceleración correspondiente, la columna número 6 el periodo natural de vibración efectivo de la tubería, la séptima columna la deformación permanente del suelo DPS calculada, la columna número 8 contiene el daño como número de reparación por kilómetro de tubería, en la columna nueve la probabilidad de que esa tubería falle, el columna 10 el parámetro DPS/D como un porcentaje que permite definir si la falla es parcial o total y en la última columna la zonificación sísmica para cada tubería.

Posteriormente se ubican las tuberías con mayor probabilidad de fallar, en esta red 0.23, las cuales se caracterizan en el modelo matemático como falla total (colapso de tubería) o falla parcial (fuga).

Para estimar la vulnerabilidad del servicio, se supone que las tuberías cuentan con válvulas de aislamiento en sus extremos, para dado el caso de que colapse un conducto, sea posible aislar la red y la afectación al suministro no sea tan severa; esta suposición hace referencia a la importancia de la existencia de sectores hidráulicos para la operación de los sistemas de distribución de agua.

El modelo matemático utilizado para la representación hidráulica es el REDESTA (Fuentes, 1991) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual permite establecer una carga mínima para la cual el volumen de agua demandado dejara de ser entregado y a la vez estima el déficit de gastos de demanda.

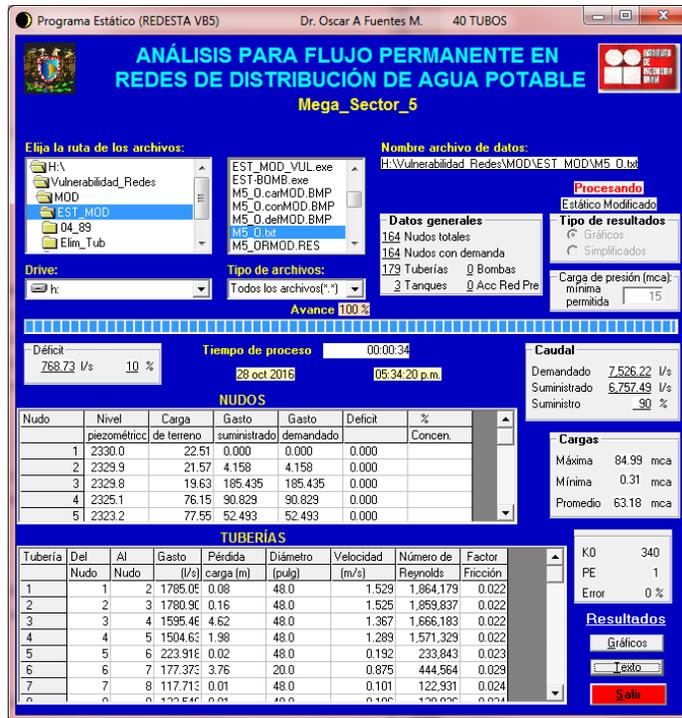


Figura 4-11.- Vista de la interfaz gráfica de software REDESTA del Instituto de ingeniería dela UNAM

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tub	L [m]	D [in]	V _{mhs} [cm/s]	a _{suelo} [cm/s]	T _{ef} [s]	DPS [m]	D _i [rep/Km]	P _{os}	DPS/ D [%]	Zona
1	150	6	117.731	25.056	0.351	0.081	0.8659	0.122	53.453	I
2	200	3	121.557	19.671	0.403	0.123	0.8711	0.160	161.343	IIIc
3	300	2	125.004	19.953	0.423	0.043	0.8758	0.231	85.135	IIIId
4	50	3	97.882	1.068	0.403	0.000	0.8387	0.041	0.179	II
5	200	3	115.382	33.365	0.413	0.037	0.8627	0.158	59.037	IIIa
6	50	2	125.004	19.953	0.423	0.043	0.8758	0.043	85.135	IIIId
7	50	2	82.465	1.141	0.423	0.000	0.7284	0.036	0.287	II
8	150	2	102.882	1.141	0.423	0.000	0.8455	0.119	0.287	II
9	50	2	124.398	20.152	0.423	0.126	0.8750	0.043	247.935	IIIc
10	50	3	125.004	19.712	0.413	0.043	0.8758	0.043	67.286	IIIId
11	150	2	125.004	19.953	0.423	0.043	0.8758	0.123	85.135	IIIId
12	150	2	125.004	19.953	0.423	0.043	0.8758	0.123	85.135	IIIId
13	100	2	125.004	19.953	0.423	0.043	0.8758	0.084	85.135	IIIId
14	200	2	50.759	16.000	0.423	0.007	0.7290	0.136	13.606	I
15	200	2	82.730	1.141	0.423	0.000	0.7284	0.136	0.287	II
16	200	2	107.503	1.141	0.423	0.000	0.8519	0.157	0.287	II
17	200	2	125.004	19.953	0.423	0.043	0.8758	0.161	85.135	IIIId
18	150	2	38.941	16.000	0.423	0.007	0.7289	0.104	13.606	I
19	200	2	63.714	16.000	0.423	0.007	0.7289	0.136	13.606	I
20	100	2	64.472	16.000	0.423	0.007	0.7289	0.070	13.606	IIIb

Tabla 4-3.-Resultados por tubería de la aplicación de la metodología propuesta.

En la tabla 4-4 se observan las frecuencias de clase de la probabilidades de fallas que se obtuvieron del análisis de la red en estudio, las probabilidades en este caso son bajas dado que éstas son función de la longitud de la tubería, por eso se toma en cuenta el valor de la probabilidad máxima presentada.

Probabilidad	Frecuencia
0.00	0
0.02	5
0.05	0
0.07	2
0.09	1
0.12	7
0.14	4
0.16	0
0.18	0
0.21	0
0.23	1

Tabla 4-4.-Resultados por tubería de la aplicación de la metodología propuesta.

En la tabla 4-5 se identifican por frecuencia y probabilidad cada una de las tuberías de la red y se agrupan según su frecuencia de clase. Este acomodo permite identificar la tubería con mayor probabilidad de falla, para después determinar en función de DPS/D si la falla es parcial o total.

Para la representación de los dos tipos de falla, parcial como fuga y total sacando de funcionamiento la tubería, se toma en cuenta la curva de variación horaria de demanda para la Ciudad de México. Para representar el requerimiento máximo de agua a la RDAP; puesto que cuando la demanda se encuentra al máximo, la carga de presión en la red es la mínima y viceversa.

Dada la naturaleza aleatoria de los sismos todavía no es posible saber en qué instante puede suceder alguno, lo que en el caso de la revisión del estado de servicio de una red de distribución de agua potable presenta la complicación que según la hora del día en que un sismo ocurra, la red contara con condiciones de consumo distintas, lo que se refleja en combinaciones de carga de presión y caudal que afectaran de maneras variadas a la población. Por lo que se decide utilizar para el análisis del suministro el gasto medio diario (Qmed), el cual corresponde al valor del coeficiente de variación igual a 1 en la curva de variación horaria en la demanda para la Ciudad de México.

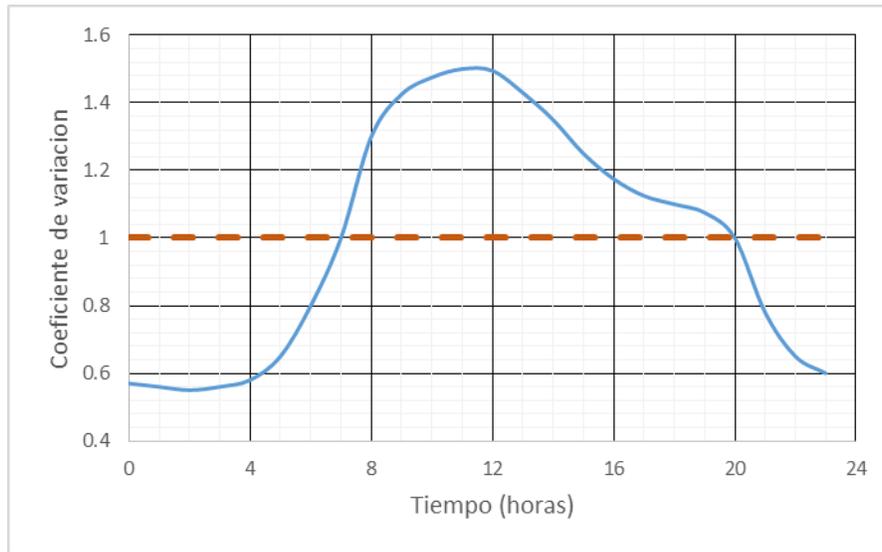


Figura 4-12.- Curva de variación horaria para la ciudad de México. (Mapas, 2007)

Clase	0.000	0.023	0.046	0.069	0.092	0.116	0.139	0.162	0.185	0.208	0.231
Frecuencia	0	5	0	2	1	7	4	0	0	0	1
No de Tubería		4		13	18	1	2				3
		6		20		8	5				
		7				11	16				
		9				12	17				
		10				14					
		0				15					
		0				19					
Probabilidad		0.041		0.084	0.104	0.122	0.160				0.231
		0.043		0.070		0.119	0.158				
		0.036				0.123	0.157				
		0.043				0.123	0.161				
		0.043				0.136					
						0.136					
						0.136					

Tabla 4-5.-Probabilidades y Frecuencias de clase por tubería.

Tubería	P _{os}	DPS/ D [%]	Zona
3	0.231	85.135	IIId
17	0.161	85.135	IIId
2	0.160	161.343	IIIfc
5	0.158	59.037	IIIa
16	0.157	0.287	II
14	0.136	13.606	I
19	0.136	13.606	I
15	0.136	0.287	II
11	0.123	85.135	IIId
12	0.123	85.135	IIId
1	0.122	53.453	I
8	0.119	0.287	II
18	0.104	13.606	I
13	0.084	85.135	IIId
20	0.070	13.606	IIIb
6	0.043	85.135	IIId
10	0.043	67.286	IIId
9	0.043	247.935	IIIfc
4	0.041	0.179	II
7	0.036	0.287	II

Tabla 4-6.-Tuberías en orden descendente según la probabilidad de falla, para la combinación de suelo 1.

La tabla 4-6 muestra en forma descendente la probabilidad de falla de cada tubería, la cual se considera como el orden en que consecutivamente fallan las tuberías en la red, a continuación se presenta la caracterización en secuencia de las fallas probables y su afectación en el suministro de distribución de agua. Para tener un punto de comparación y conocer el funcionamiento de la red presentada, se parte de la modelación matemática de la red con el Qmed, se establece una carga mínima de 10 m.c.a., esta última se puede establecer según las necesidades del abasto y condiciones topográficas; en este caso se contempla que sea suficiente para atender la altura de una casa hogar de dos niveles y las respectivas pérdidas por fricción.

Las fallas parciales se representan como una fuga, en el modelo matemático como un orificio en alguno de los nodos extremos de la tubería; para la falla total se elimina por completo el conducto, manteniendo los nudos de conexión a otras tuberías.

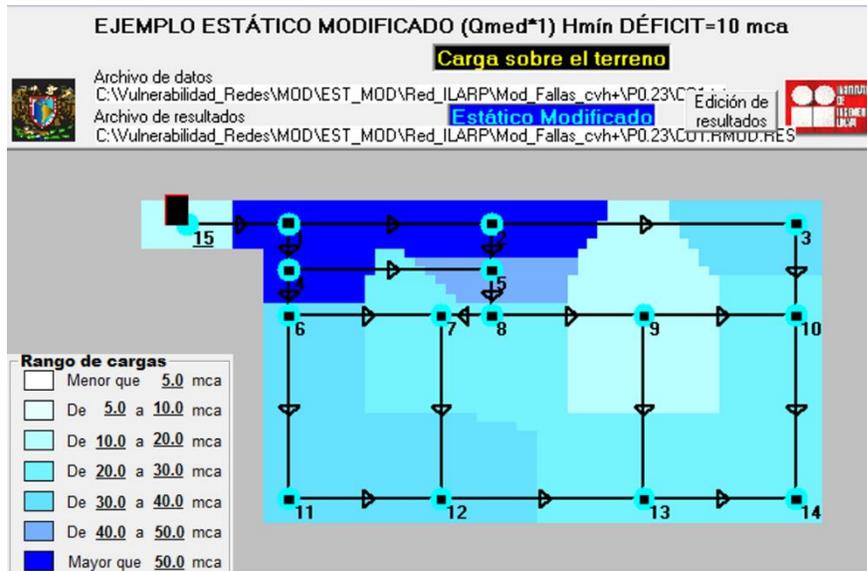


Figura 4-13.- Cargas de presión sobre el terreno en la Red.

En la figura 4-14 se muestra el mapa de déficit, el cual no presenta información dadas las condiciones en el sistema; el gasto demandado es 22.50 l/s igual al suministrado.

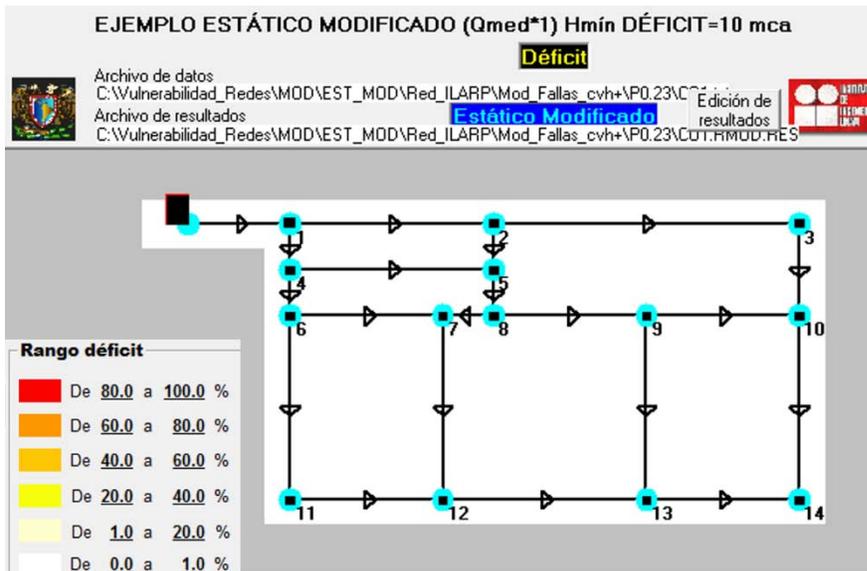


Figura 4-14.-Representación de Déficit en la red (nulo).

Para el primer escenario se elimina la tubería no 3, que es la que cuenta con mayor probabilidad de falla y la deformación permanente del suelo (DPS) que presenta es de 0.043m. Con respecto al diámetro que es de 2 pulgadas, 0.051m, por lo que tiene una relación deformación del suelo diámetro $DPS/D= 85\%$. Al contar con una tubería menos se suministra el 81 % del caudal demandado, igual a 20.37 l/s, se observa disminución en la carga de presión en algunos puntos de la red, se puede cuantificar una reducción promedio en la carga de presión de 4.64 m.c.a. También es visible el cambio de sentido del flujo en algunas de las tuberías, para entregar el volumen demandado en cada punto, esto se puede observar en la figura 4-15.

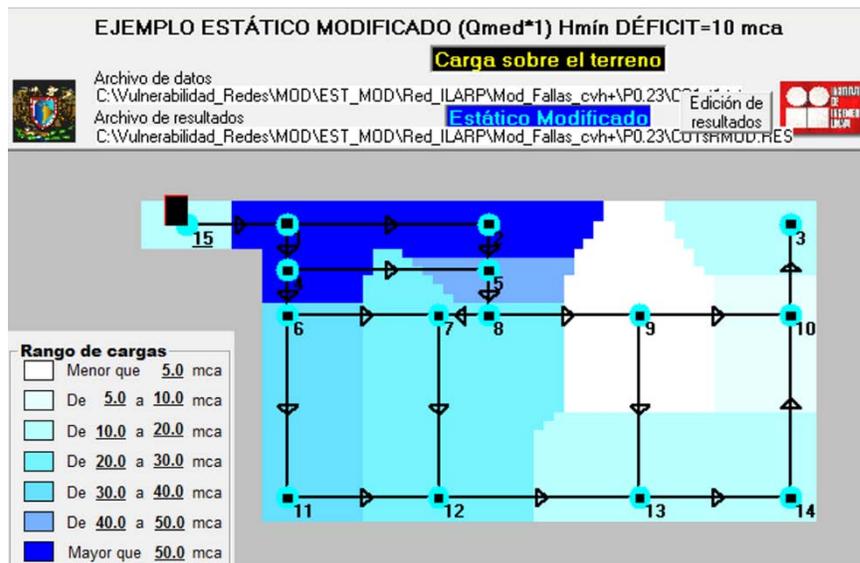


Figura 4-15.- Carga de presión en la red eliminando una tubería, combinación de suelo 1.

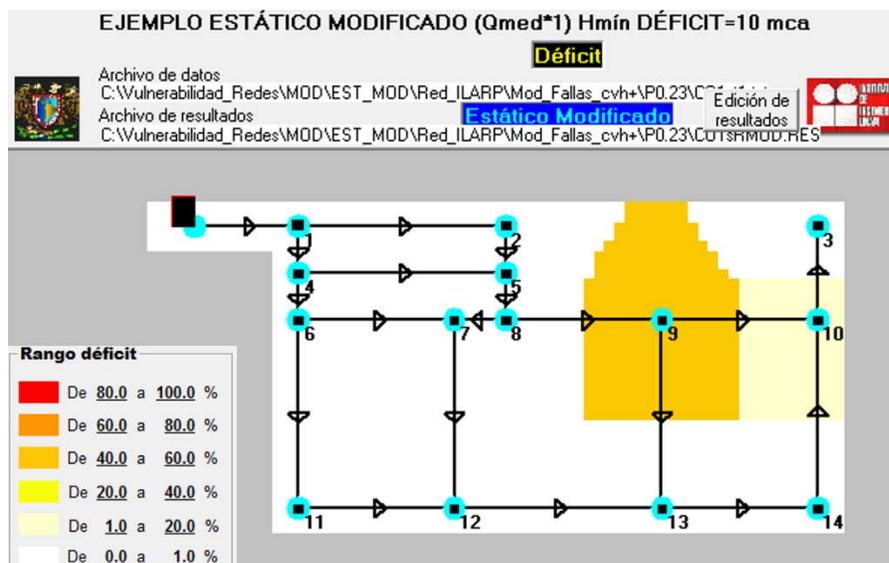


Figura 4-16.-Representación del déficit en la red, eliminando una tubería, combinación de suelo 1.

Se presentan solo algunos de los resultados de las modelaciones con el fin de no saturar la presentación de los mismos. La siguiente tubería en escala descendente con mayor probabilidad de falla es la numero 17, cuyo valor de DPS es de 0.043m. y tiene un diámetro de 0.051m., la falla se representa como colapso. La red tiene un suministro del 90%, 20.27 l/s ,la disminución de la carga de presión, con respecto a la red sin daño en promedio es de 4.34 m.c.a. al eliminar una segunda tubería.

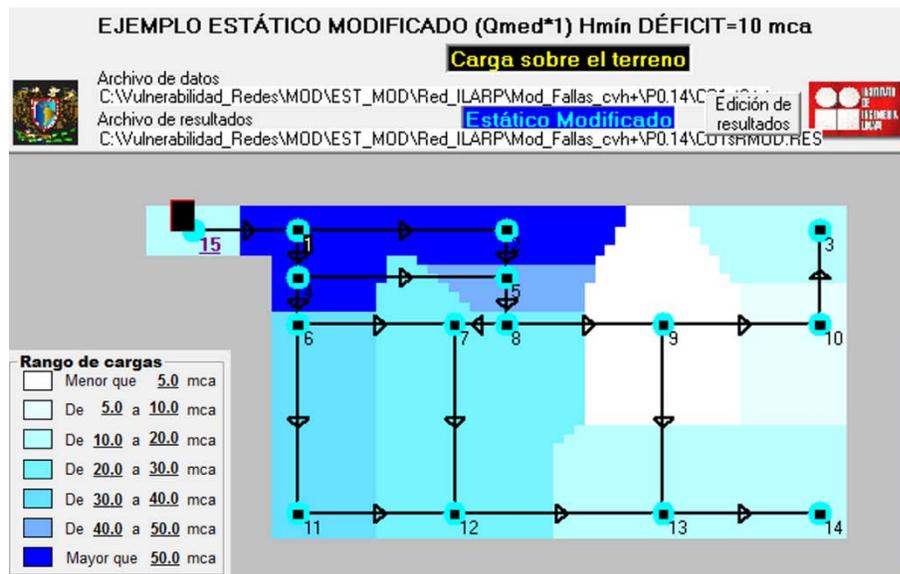


Figura 4-17.- Carga de presión en la red, eliminado 2 tuberías, combinación de suelo 1.

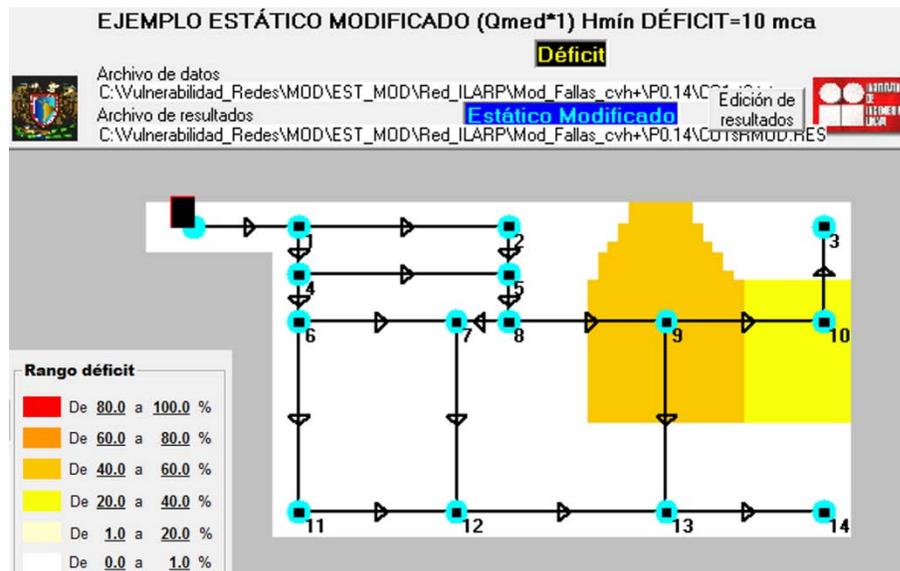


Figura 4-18.- Representación del déficit, eliminando 2 tuberías, combinación de suelo 1.

Se continua representando fallas consecutivamente en la red, en las figuras 4-19 y 4-20 se muestra la modelación para 5 fallas, donde 4 son fallas totales y una fuga, la carga de presión en este caso disminuyen en promedio 19.5 m con respecto a la red completa y tiene un suministro del 48%, observándose también aumentando de caudal en la mayoría de las tuberías.

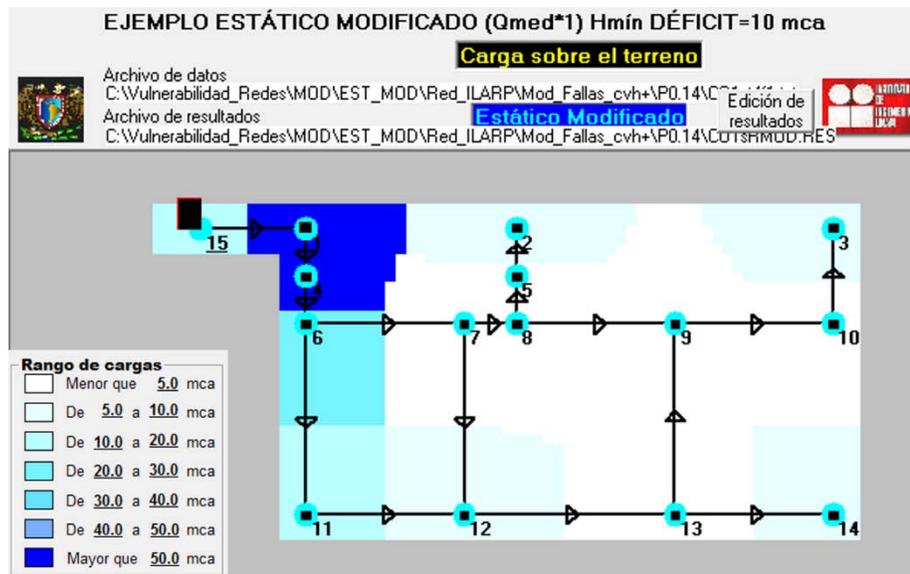


Figura 4-19.-Carga de presión en la red, eliminado 4 tuberías y representando una fuga, combinación de suelo 1.

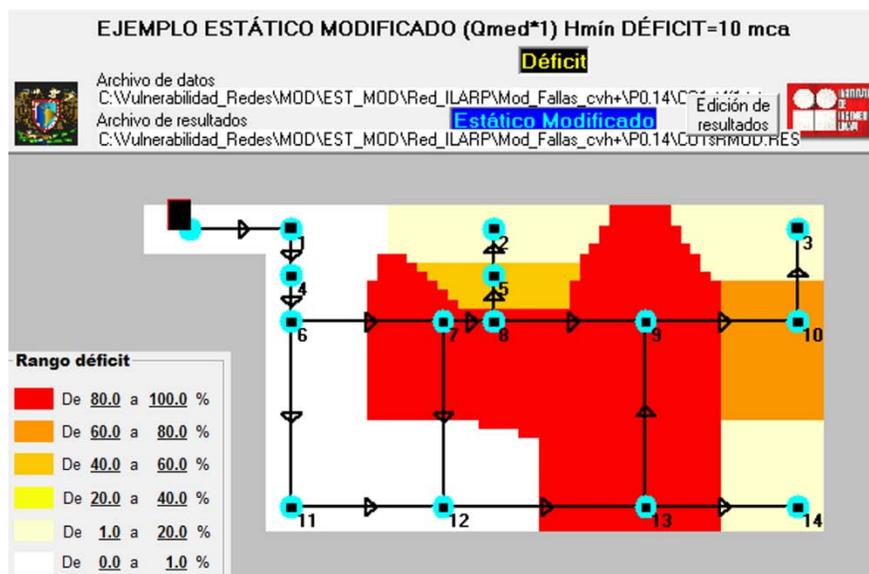


Figura 4-20.-Representación del déficit, eliminado 4 tuberías y representando una fuga, combinación de suelo 1.

Cuando llegamos a la representación de 8 fallas de las cuales 4 son fallas totales y 4 son fugas, en la red se suministran 12.99 l/s equivalentes al 42% de la demanda. La carga en los nodos centrales de la red no llega a ser suficiente para suministrar el caudal, la disminución promedio de carga de presión en el sistema es de 14.69m.

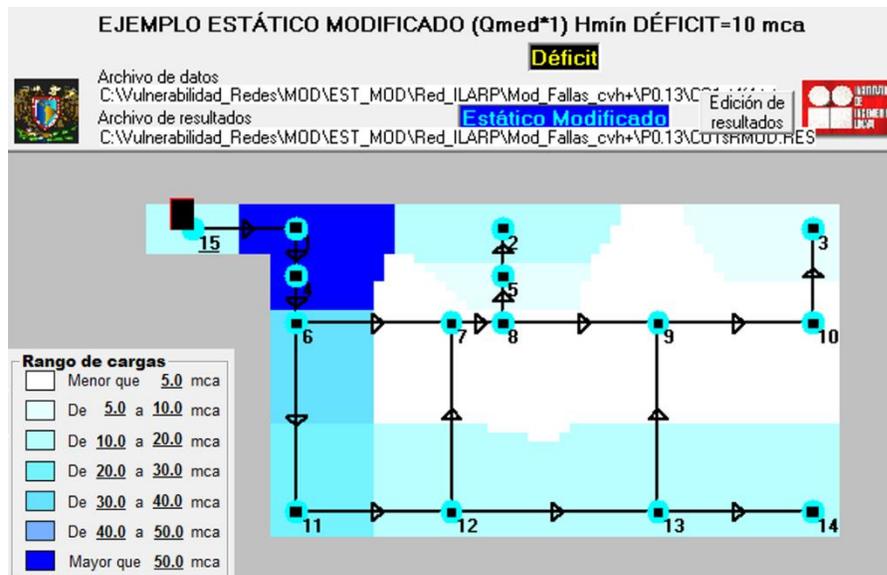


Figura 4-21.- Carga de presión en la red, eliminado 4 tuberías y representando 4 fugas, combinación de suelo 1.

En la figura 4-22 se muestra el déficit, se observa que al no contar con la carga de presión necesaria no es posible suministrar el caudal demandado, y el área de influencia del nodo sin caudal sufre el déficit.

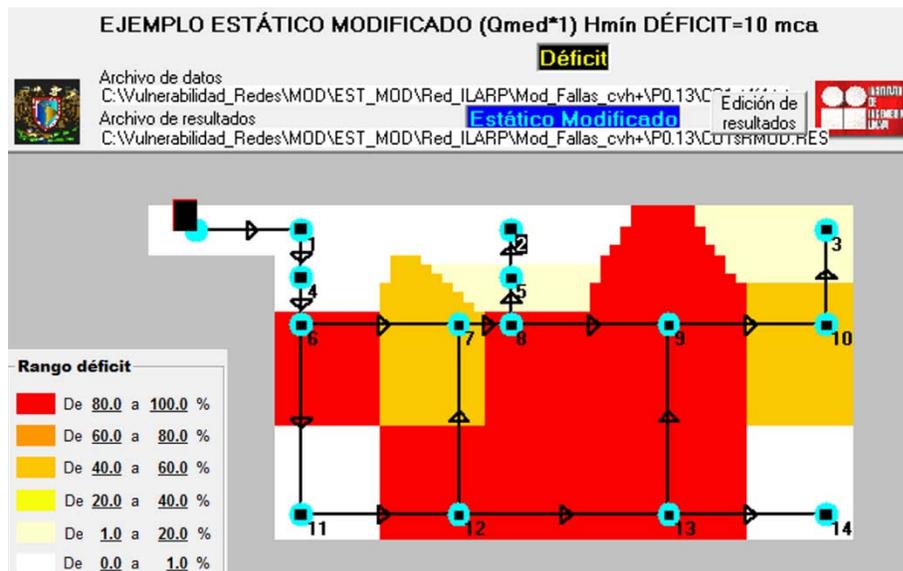


Figura 4-22.-Representación del déficit, eliminado 4 tuberías y representando 4 fugas, combinación de suelo 1.

La siguiente falla se localiza en la tubería no 11, tiene una relación de $DPS/D=85.14\%$, el eliminar esta tubería, suman un total de 5 tuberías colapsadas y 4 fugas; con este arreglo de fallas, la red deja de cumplir con su cometido.

En la siguiente gráfica se observa la evolución del porcentaje de déficit con respecto al número de fallas, es importante conocer que tuberías son más susceptibles a recibir daño ante un sismo y la influencia que estas tienen dentro del funcionamiento de la red, para proteger o contar con medidas de reparación inmediata, las tuberías que tengan una función vital dentro del sistema.

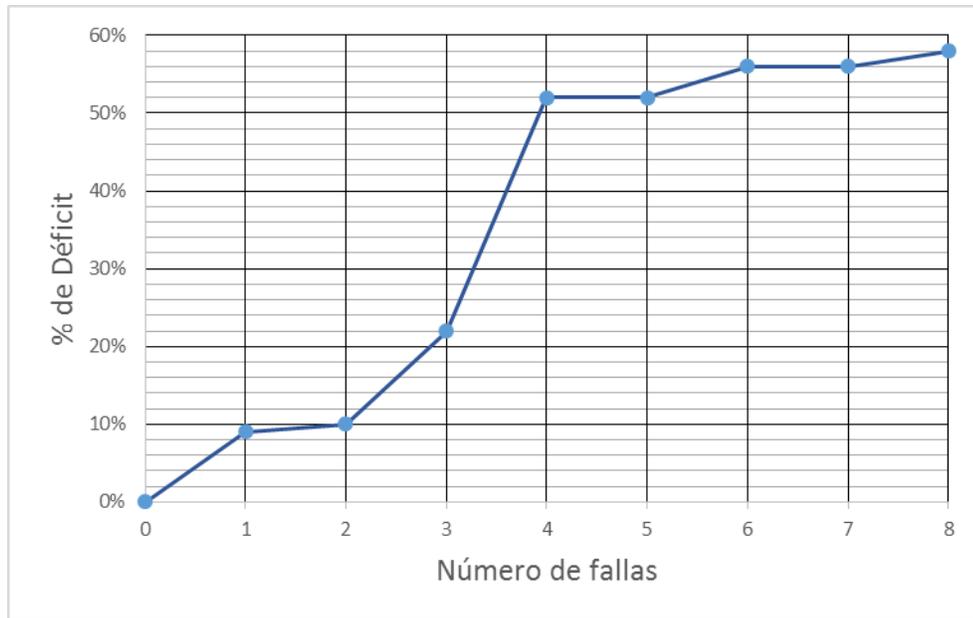


Figura 4-23.-Evolución del déficit con respecto al número de fallas

También se muestran los resultados de la modelación matemática para la misma red con condiciones hidráulicas similares, la diferencia para este cálculo está en la zonificación del tipo de suelo donde se encuentra la red, lo que produce cambios en las variables del tipo sísmico, como: la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS), periodo natural de vibración del suelo (T); las figuras 4-24 y 4-25 muestran la segunda combinación de tipo de suelo y la velocidad máxima horizontal del suelo (VMHS), respectivamente

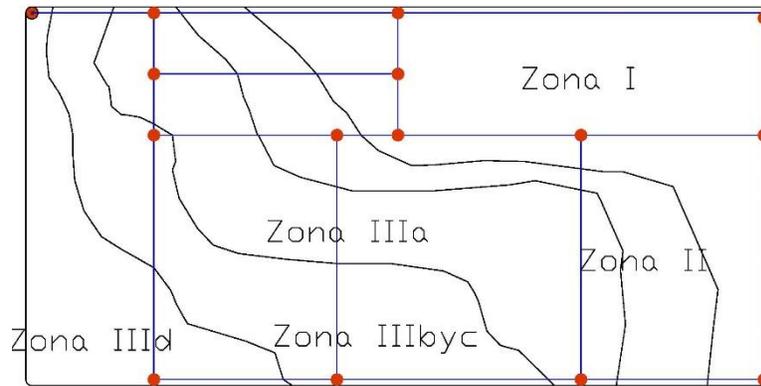


Figura 4-24.-Zonificación propuesta para la combinación del suelo 2 en la red de Rosales (2012)

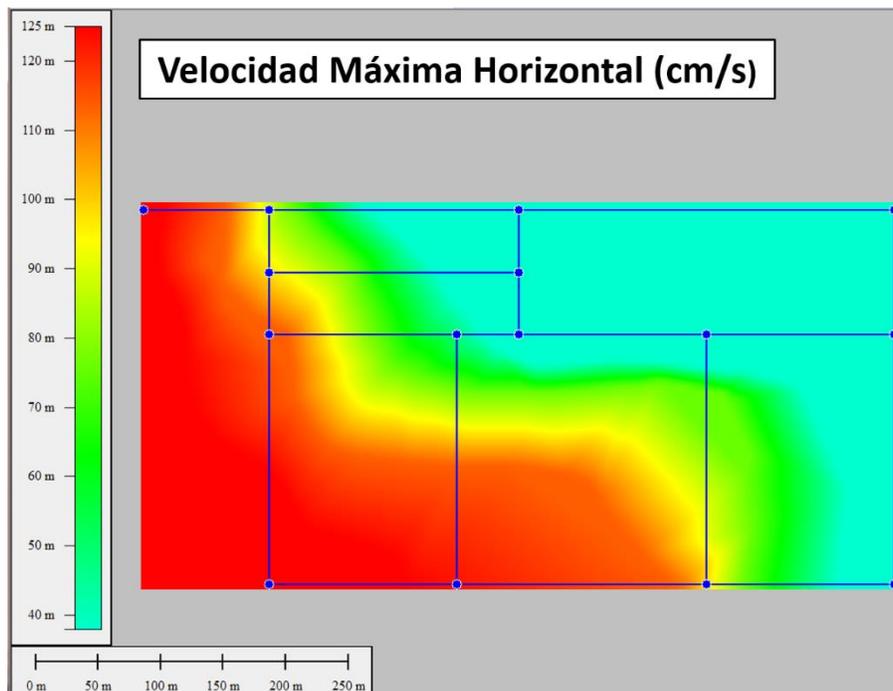


Figura 4-25.-Mapas de velocidad máxima horizontal del suelo para la combinación del suelo 2 en la red de Rosales (2012).

En la tabla 4-7 podemos observar los valores de VMHS para cada tubería según la zonificación propuesta para la combinación de suelo 2, que contrapone a la combinación propuesta 1.

Tubería	VMHS (cm/s)	NTC
18	0.123	II
14	0.160	IIIb
3	0.196	I
17	0.136	II
5	0.136	I
11	0.104	I
12	0.104	I
8	0.104	II
2	0.136	IIIc
13	0.070	II
9	0.036	I
6	0.036	I
1	0.104	I
10	0.036	I
19	0.156	I
15	0.154	II
16	0.136	II
20	0.081	I
7	0.042	I
4	0.041	I

Tabla 4-7.-Velocidad máxima horizontal del suelo para cada tubería para la zonificación propuesta de suelo 2.

Los resultados arrojados por la metodología, ahora con la segunda combinación de suelo propuesta para cada tubería se encuentran en la tabla 4-8, y en la tabla 4-9 se presenta el orden de las tuberías donde es posible que ocurra la falla.

Tub	L [m]	D [in]	V _{mhs} [cm/s]	a _{suelo} [cm/s]	T _{ef} [s]	DPS [m]	D _i [rep/Km]	P _{os}	DPS/ D [%]	Zona
1	150	0.152	57.919	16.000	0.351	0.007	0.7290	0.104	4.535	II
2	200	0.076	54.888	16.000	0.403	0.007	0.7290	0.136	9.071	I
3	300	0.051	37.880	16.000	0.423	0.007	0.7288	0.196	13.606	I
4	50	0.076	95.079	1.068	0.403	0.000	0.8348	0.041	0.179	II
5	200	0.064	57.994	16.000	0.413	0.007	0.7290	0.136	10.885	I
6	50	0.051	37.880	16.000	0.423	0.007	0.7288	0.036	13.606	I
7	50	0.051	108.488	1.141	0.423	0.000	0.8532	0.042	0.287	II
8	150	0.051	70.078	16.000	0.423	0.007	0.7287	0.104	13.606	I
9	50	0.051	41.365	16.000	0.423	0.007	0.7289	0.036	13.606	I
10	50	0.064	37.880	16.000	0.413	0.007	0.7288	0.036	10.885	I
11	150	0.051	37.880	16.000	0.423	0.007	0.7288	0.104	13.606	I
12	150	0.051	37.880	16.000	0.423	0.007	0.7288	0.104	13.606	I
13	100	0.051	37.880	16.000	0.423	0.007	0.7288	0.070	13.606	I
14	200	0.051	121.216	27.920	0.423	0.091	0.8706	0.160	178.693	IIIb
15	200	0.051	97.920	1.141	0.423	0.000	0.8387	0.154	0.287	II
16	200	0.051	77.957	1.141	0.423	0.000	0.7285	0.136	0.287	II
17	200	0.051	37.880	16.000	0.423	0.007	0.7288	0.136	13.606	I
18	150	0.051	123.489	20.152	0.423	0.126	0.8738	0.123	247.935	IIIc
19	200	0.051	106.253	1.141	0.423	0.000	0.8501	0.156	0.287	II
20	100	0.051	100.950	1.141	0.423	0.000	0.8429	0.081	0.287	I

Tabla 4-8.-Resultados por tubería, para la combinación de suelo 2 en la Red de Rosales (2012).

Tub	P_{os}	DPS/ D [%]	Zonificación
3	0.196	13.606	I
14	0.160	178.693	IIIb
19	0.156	0.287	II
15	0.154	0.287	II
2	0.136	9.071	I
5	0.136	10.885	I
17	0.136	13.606	I
16	0.136	0.287	II
18	0.123	247.935	IIIc
1	0.104	4.535	II
11	0.104	13.606	I
12	0.104	13.606	I
8	0.104	13.606	I
20	0.081	0.287	I
13	0.070	13.606	I
7	0.042	0.287	II
4	0.041	0.179	II
9	0.036	13.606	I
6	0.036	13.606	I
10	0.036	10.885	I

Tabla 4-9.- Tuberías en orden descendente según la probabilidad de falla, para la combinación de suelo 2

En función de la tabla 4-9 se representan las fallas, ya sea como fugas o como colapso de tubería, en las siguientes figuras se muestra un resumen de los resultados de la modelación matemática de la red bajo las condiciones de vulnerabilidad sísmica con la combinación de suelo 2.

Las condiciones hidráulicas son las mismas que para la modelación con las condiciones de combinación de suelo 1, Qmed y carga de presión mínima para el suministro de 10 m.c.a. La primera falla se representa como colapso de tubería y presenta un suministro de 98%, equivalente a 21.99 l/s con una carga de presión promedio de 32.81 m.c.a.

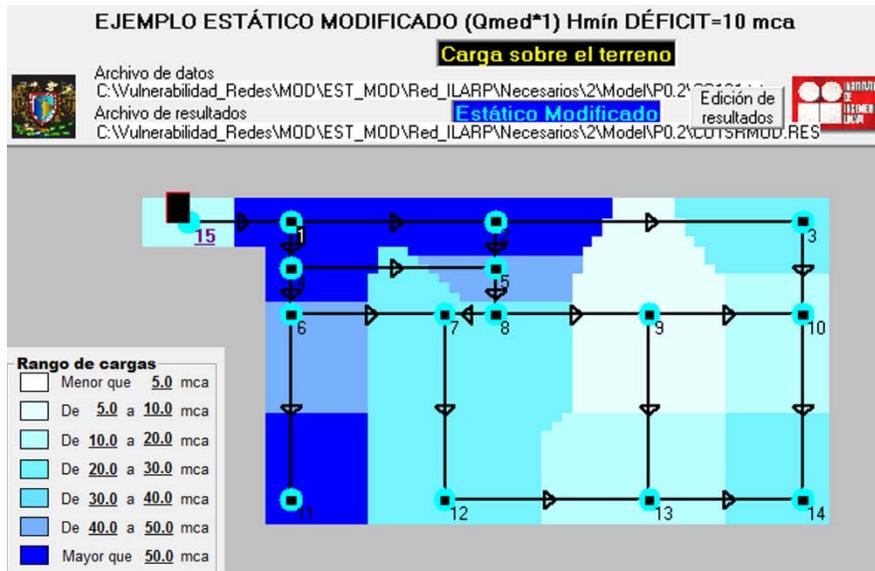


Figura -4-26.-Carga de presión en la red eliminando una tubería, combinación de suelo 2.

En la siguiente figura se muestra el mapa de déficit, en el cual se observa el área afectada y la magnitud del desabasto.

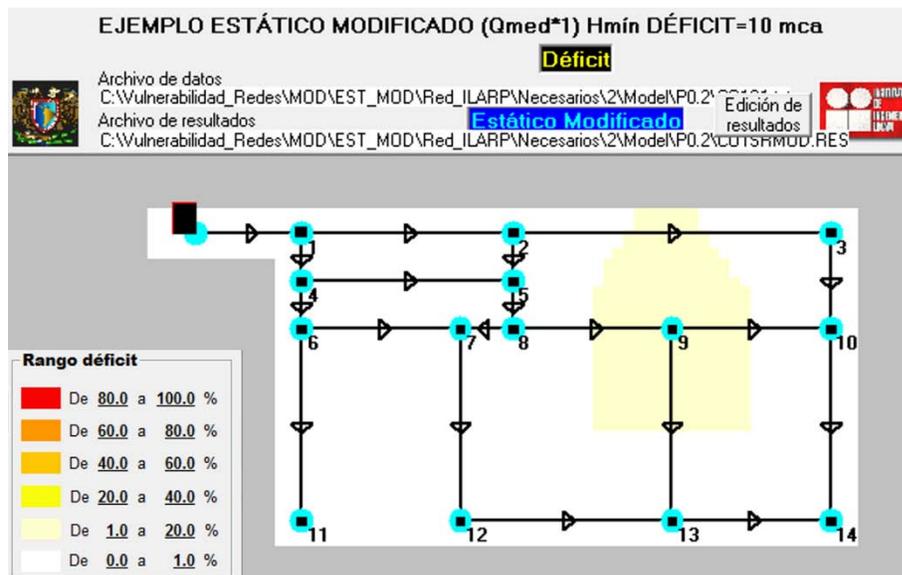


Figura 4-27.-Representación de déficit en la red eliminando una tubería, combinación de suelo 2

En las figuras 4-28 y 4-29 se presenta la modelación matemática del sistema con 5 fallas, de las cuales 3 son fugas y dos son colapso de tubería, para este número de fallas se cuenta con un suministro de 18.18 l/s, igual al 81%, en la cual se observa una redistribución de cargas de presión y de flujos, ocasionando que el desabasto se encuentre en distintas zonas.

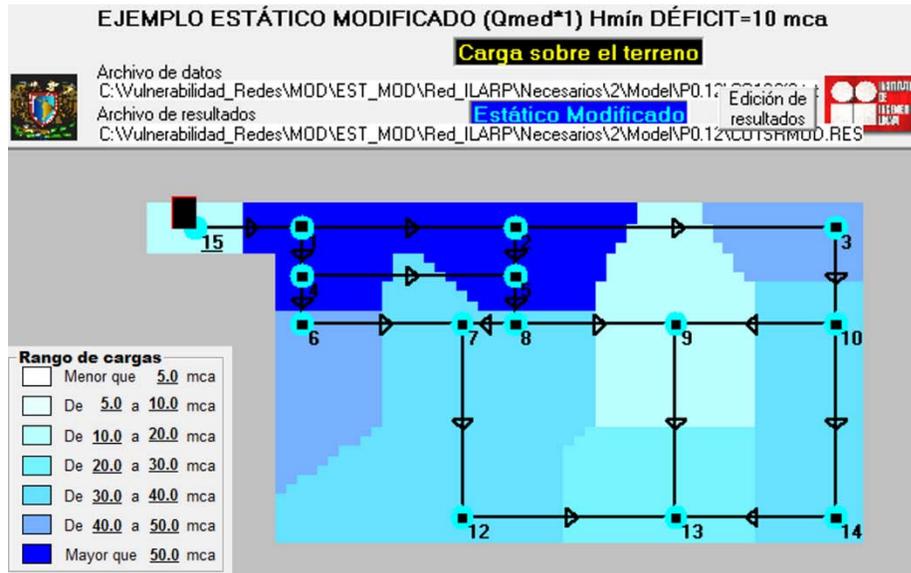


Figura -4-28.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 3 fugas, combinación de suelo 2.

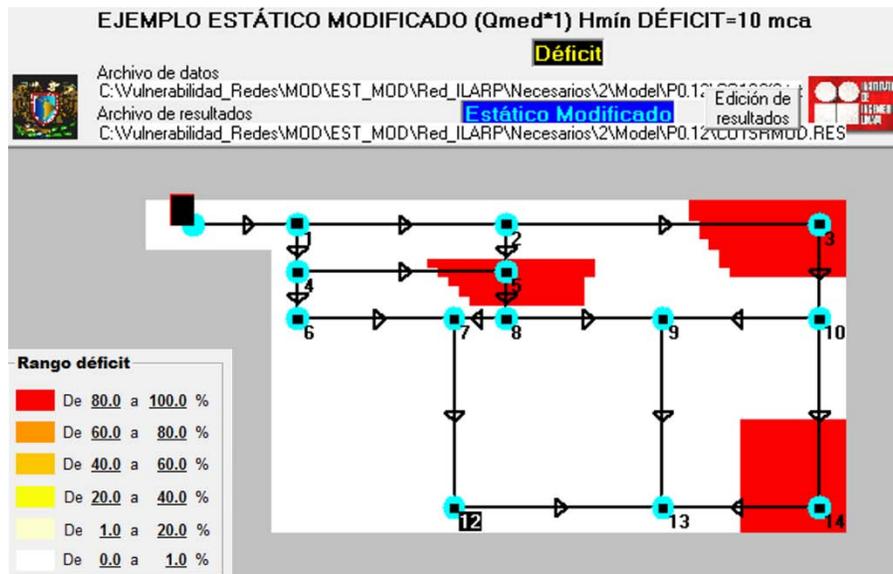


Figura -4-29.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 3 fugas, combinación de suelo 2.

Para cuando se tiene un total de 7 fallas compuestas por 2 colapsos de conductos y 5 fugas, el suministro es del 58%, con 12.99 l/s.

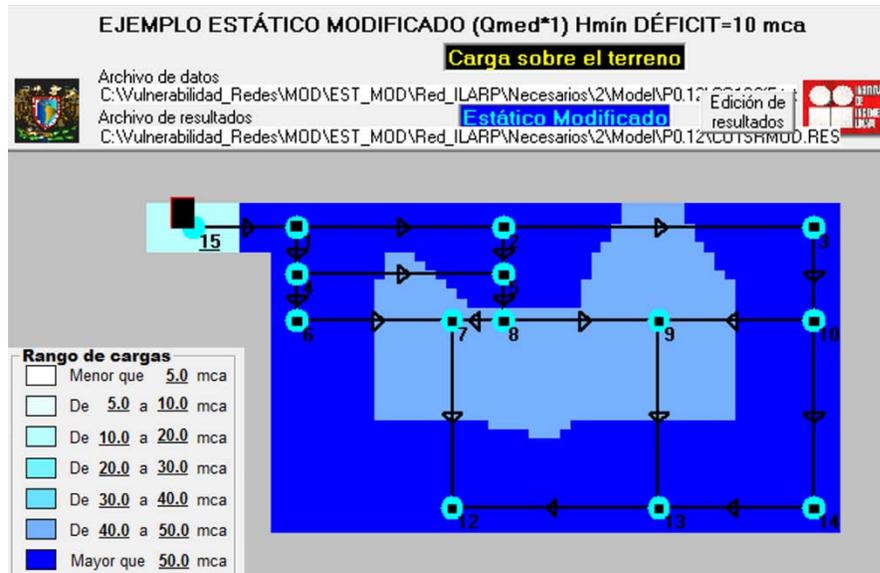


Figura 4-30.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 5 fugas, combinación de suelo 2.

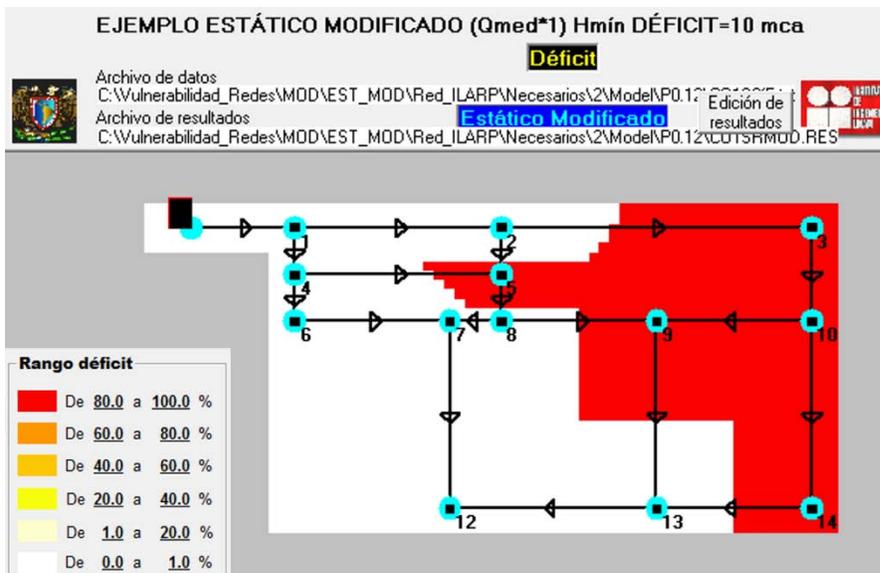


Figura 4-31

Figura-4-31.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 5 fugas, combinación de suelo 2.

Cuando se tienen 15 fallas simultáneas en la red el suministro se ha reducido al 26%, es importante mencionar que por cada tubería es posible representar una falla y en este punto se está representando que el 75% de la red tiene fallas, esto debido a que las acciones sísmicas no son tan severas y las mayor parte de las fallas son parciales.

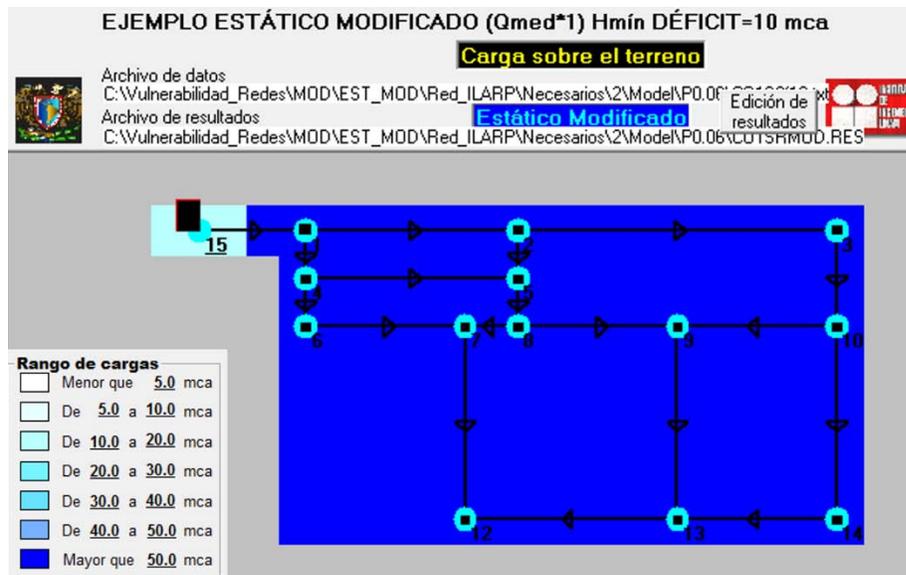


Figura-4-32.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 13 fugas, combinación de suelo 2.

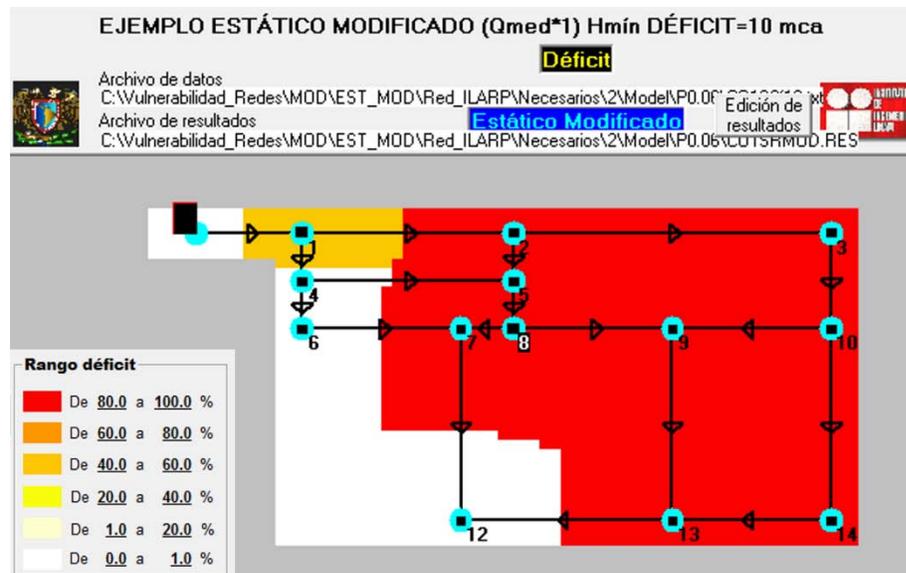


Figura 4-33.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 13 fugas, combinación de suelo 2.

Bajo estas condiciones es posible representar las fallas en todas las tuberías del sistema, para 20 fallas de las cuales 2 son fallas totales y 18 fugas el suministro es del 2 %, se entregan 0.87 l/s de los 22.5 l/s demandados, los nudos cercanos la fuente de abastecimiento son los únicos que cuentan con posibilidad ser abastecidos en cierta medida, también se observa que el desabasto no se debe a la falta de carga de presión en el sistema, si no a la pérdida de caudal debido a las fugas

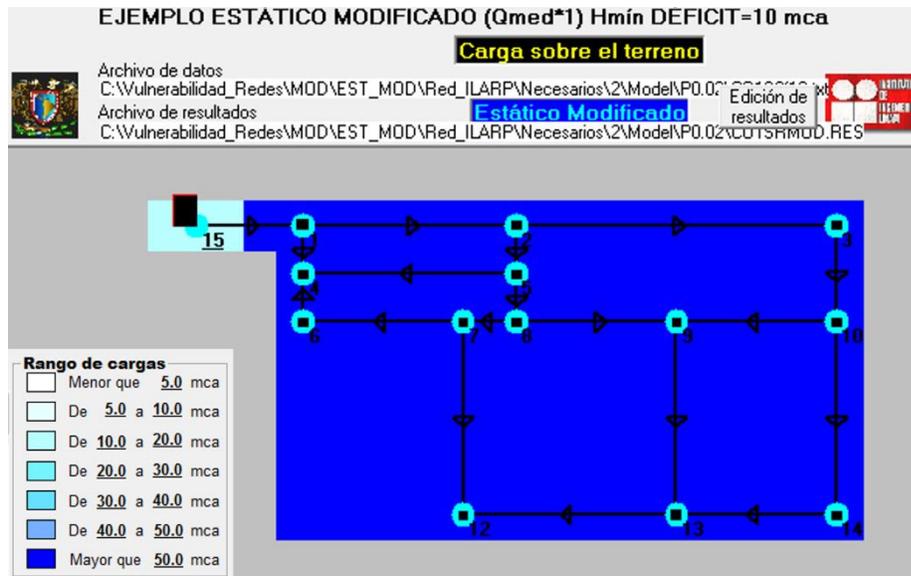


Figura 4-34

Figura 4-35.-Carga de presión en la red eliminando 2 tuberías y con 18 fugas, combinación de suelo 2.

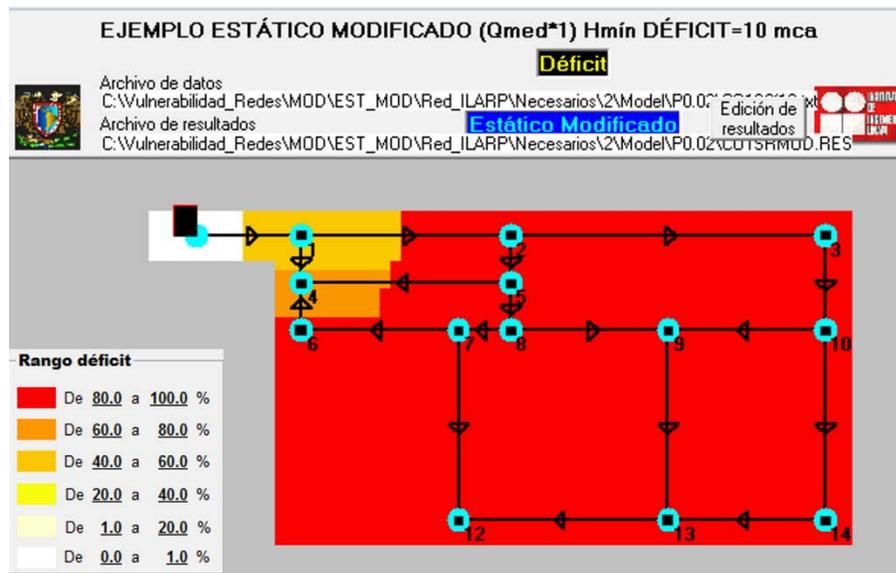


Figura 4-35.-Representación de déficit en la red eliminando 2 tuberías y con 18 fugas, combinación de suelo 2.

Se llevó a cabo la modelación de fallas en la totalidad de las tuberías de la red, para observar el comportamiento y funcionalidad del método propuesto, pero en una red real se considera que no es de gran relevancia efectuar, la representación de fallas en todas las tuberías y su correspondiente modelación, se recomienda establecer un porcentaje mínimo de abasto en función de los requerimientos de abastecimiento de la red en estudio.

En la figura 4-37 se presenta la gráfica de evolución del déficit en la red respecto al número de fallas.

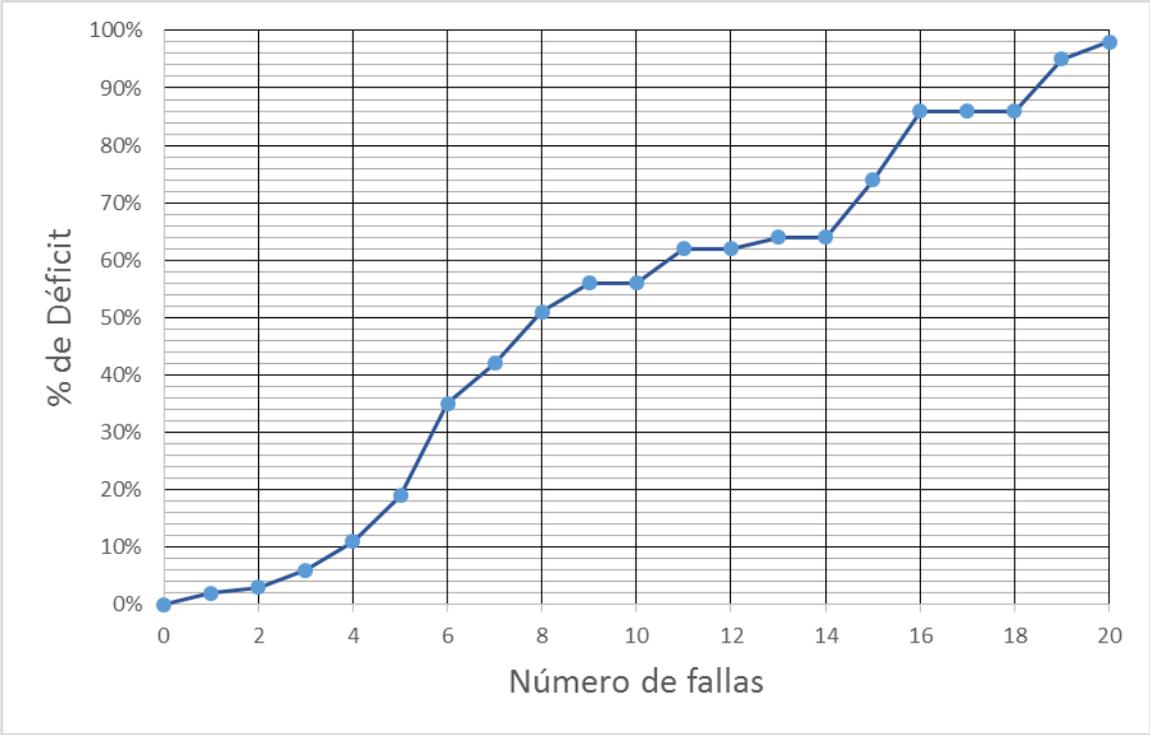


Figura 4-36-Evolución del déficit con respecto al número de fallas

Capítulo 5 - Análisis de daño al suministro de agua considerando aspectos sísmicos

En este capítulo se analiza el daño sísmico a tuberías de una red de distribución de agua real, y su efecto en el suministro de agua. El análisis se hace de uno de los Megasectores de la Red de Distribución de Agua Potable de la Ciudad de México (RAPCM); se elige el Megasector 5 puesto que geológicamente presenta los 6 tipos de suelo clasificados en la normativa, es una zona donde existe infraestructura de importancia, como carreteras federales y hospitales, además de estar en demarcaciones en las que existen constantes desabastos de agua potable.

La información de micro y macro medición en el valle de la Ciudad de México es deficientes en algunas zonas, por lo que para poder calibrar el modelo matemático se recurre a la información disponible, el Megasector 5 es alimentado por tres tanques: Cerro de la Estrella, La Caldera y Xaltepec; a partir de los volúmenes se obtiene el gasto medio que cada tanque puede entregar al sistema. En la tabla 5-1 se presentan los volúmenes de los tanques y el gasto medio que estos pueden aportar en función de un coeficiente de regulación para 24 hrs.

Tanque	Capacidad (m3/s)	Qmd (l/s)
Cerro de la Estrella	48720	3406.99
La Caldera	39270	2746.15
Xaltepec	19635	1373.08
	TOTAL	7526.22

Tabla 5-1.-Tanques que abastecen al Megasector 5.

Dado que no se cuenta con información de las demandas, se estima una distribución espacial de la demanda a partir del número de nodos que integran la red, el Megasector 5 está formado por 164 nodos y 179 tuberías, con diámetros de 20 a 70 pulgadas. Las conducciones cuentan que con diámetros menores a 30” son de acero y las mayores a este diámetro son de concreto.

Se analizaron dos sismos el del 19/09/1985 por sus efectos destructivos y el del 25/04/1989 ya que a pesar de no haber sido baja su magnitud, cuenta con un tiempo de recurrencia de entre 3 a 7 años.

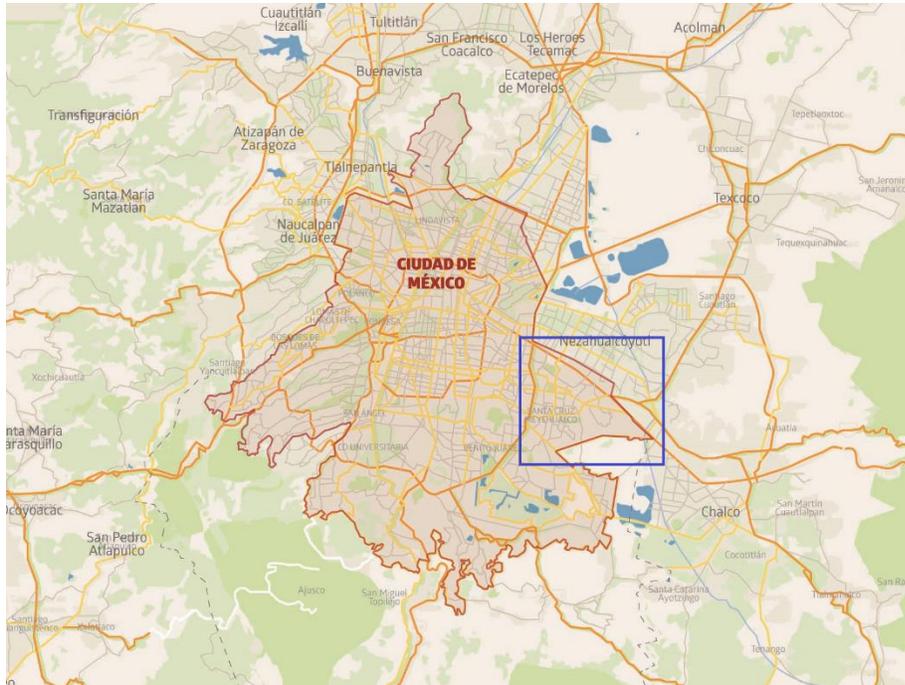


Figura 5-1.- Ubicación del Megasector 5 en la Ciudad de México, (sin Escala).

En la figura 5-1 se muestra la ubicación del Megasector 5 dentro de la ciudad de México, dicha infraestructura abarca alrededor de 220 km², dentro de las delegaciones Iztapalapa, Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta

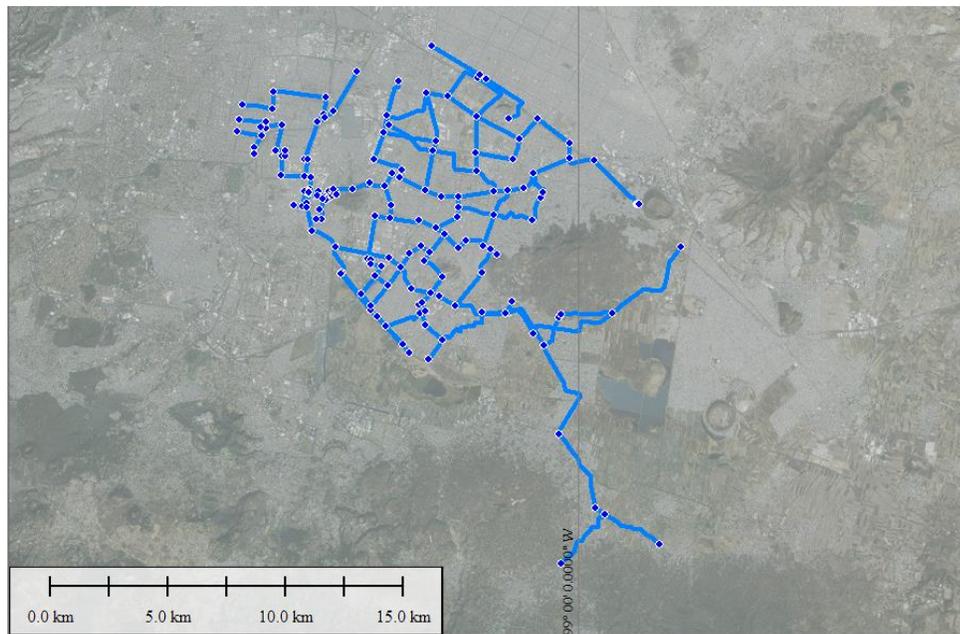


Figura 5-2.-Esquemización del Megasector 5, sobre foto satelital.

En la figura 5-2 se puede ver las tuberías y nodos a representar en la modelación hidráulica del Megasector 5 y en la figura 5-3 se presenta la distribución espacial de gastos, para estimar las demandas en los nodos: La información de volúmenes en los tanques se obtuvo del estudio realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 2012 sobre la factibilidad de mejorar la distribución de agua en la Ciudad de México

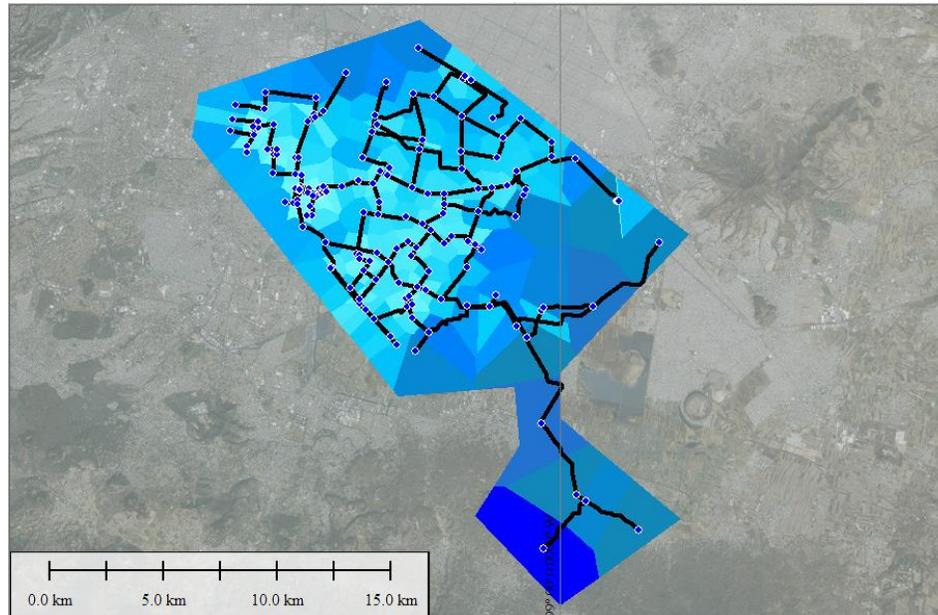


Figura 5-3.- Distribución espacial de Q_{med} . en el Megasector 5

Siguiendo la metodología, se sobrepone la topología de la red en la zonificación sísmica de la Ciudad de México y en los mapas de la velocidad resultantes para el sismo en análisis, para obtener un valor de velocidad horizontal de suelo (VMHS) y de periodo de vibración natural del suelo (T), en cada tubería. El Megasector 5 se analizará bajo los efectos de dos sismos de distintas magnitudes y periodos de recurrencia, ya que es importante identificar distintas condiciones de daño para la distribución de agua potable, como son: las fallas acumuladas por sismos frecuentes y la falla por un sismo con poca probabilidad de ocurrir, pero con capacidad de generar un daño de gran magnitud.

En la tabla 5-2 se muestran las magnitudes y posibles periodos de ocurrencia o retorno de los sismos para los que se evaluara el daño en el Megasector 5, estos sismos son los 25 de abril de 1989 y el del 19 de septiembre de 1985; que a pesar de sus magnitudes en la escala de Richter cuentan con periodos de ocurrencia distintos, estos sismos son comparables ya que tienen sus epicentros y profundidad de origen se encuentran cercanos, para el cálculo del periodo de recurrencia se utilizó la Ley Gutenberg-Richter (Avith, 2012).

<i>Sismo</i>	<i>Magnitud</i>	Periodo de Recurrencia (años)		
		<i>Inferior</i>	<i>Medio</i>	<i>Superior</i>
25/04/1989	6.9	3.0	3.9	7.4
19/09/1985	8.1	18.8	27.0	57.0

Tabla 5-2.-Periodos de recurrencia de los sismos en análisis.

La siguiente imagen muestra la red tuberías y nodos que conforman el Megasector 5 sobre la zonificación sísmica de la Normas Técnicas Complementarias de Diseño Sísmico

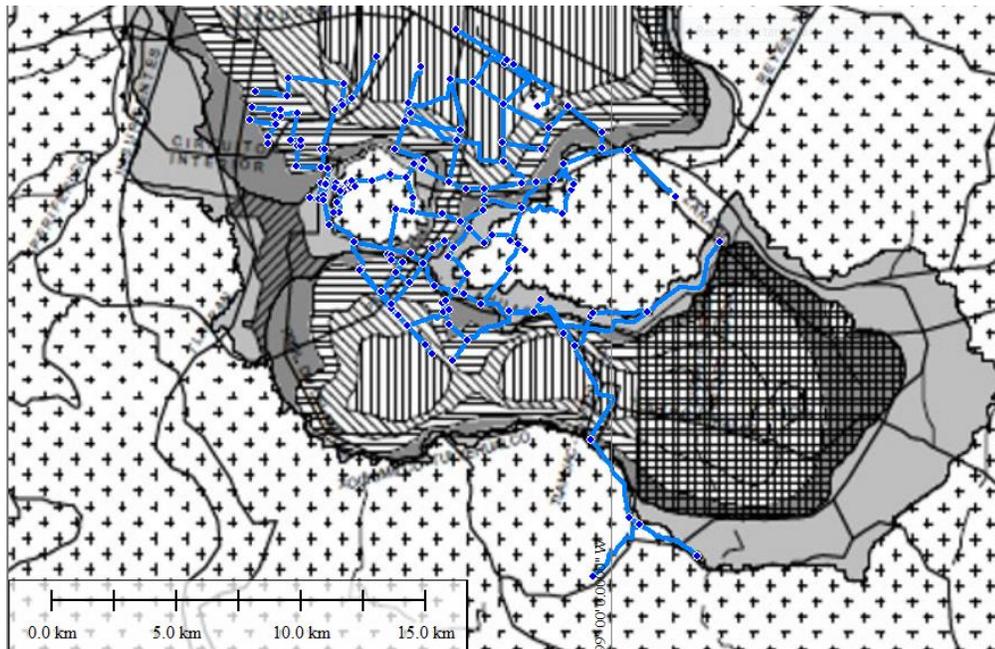


Figura 5-4.- Zonificación sísmica del Megasector 5.

En las imágenes 5-5 a 5-7 se muestra la red del Megasector 5 y la velocidad máxima horizontal del suelo originada por el sismo de 1985 en sus componente Norte-Sur, Oeste-Este y la Resultante de ambas.

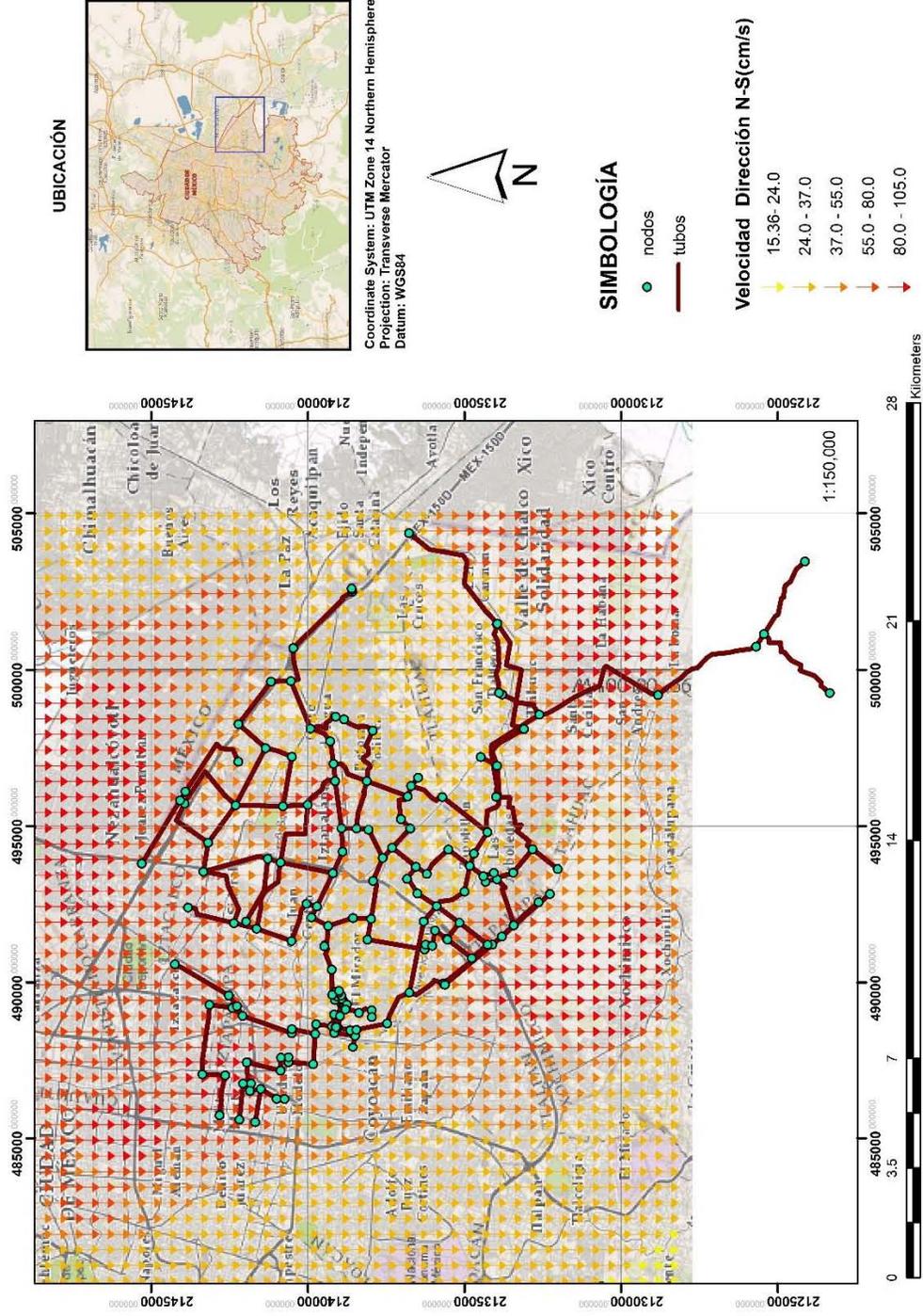


Figura 5-5.- Mapa de Velocidad Máxima Horizontal N-S del Suelo para el Megasector 5.

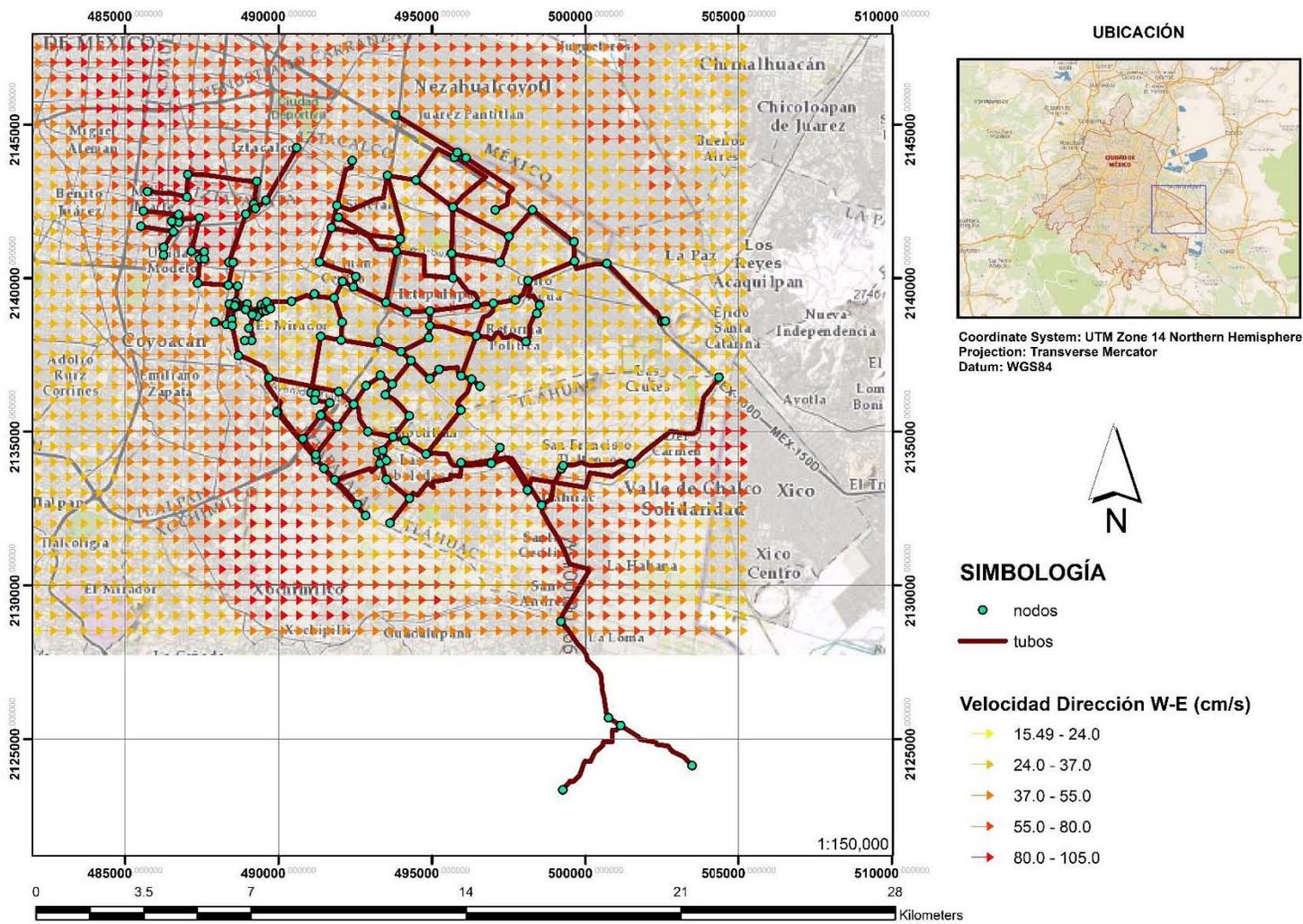


Figura 5-6.-Mapa de Velocidad Máxima Horizontal W-E del Suelo para el Megasector 5.

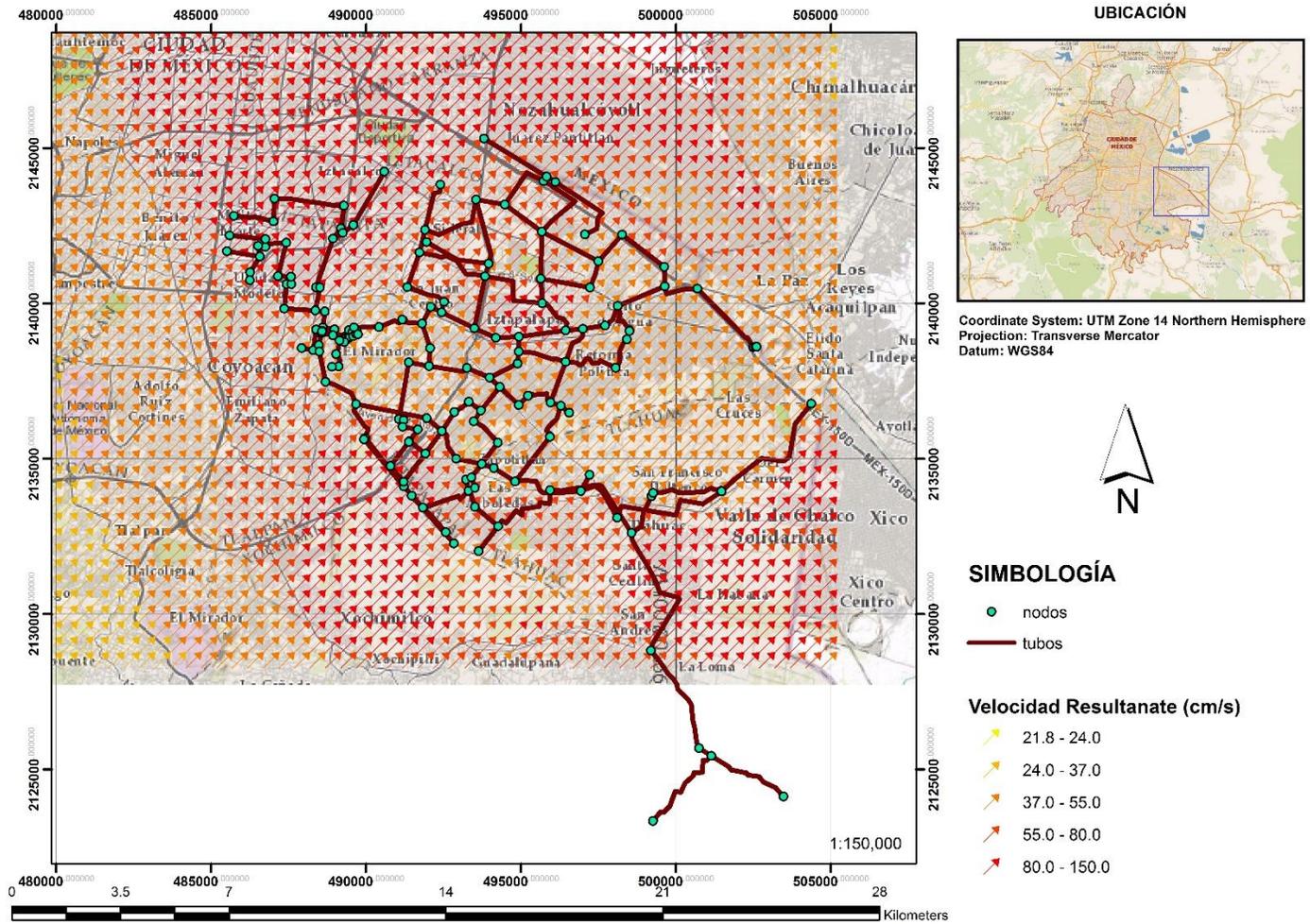


Figura 5-7.-Mapa de Velocidad Máxima Horizontal Resultante del Suelo para el Megasector 5.

A continuación se presenta una tabla resumen de los resultados del método en el Megasector 5, esta solo contiene unos cuantos datos de los 179 obtenidos para cada tubería.

Tub	L [m]	D [in]	V _{mhs} [cm/s]	a _{suelo} [cm/s]	T _{ef} [s]	DPS [m]	D _i [rep/Km]	P _{os}	DPS/ D [%]	Zonificación
1	754.6	48	60.27	4.76	1.219	0.001	0.729	0.423	0.05	II
2	72.0	48	60.00	34.85	1.219	0.076	0.729	0.051	6.20	I
3	2640.0	48	60.00	39.26	1.219	0.245	0.729	0.854	20.13	II
4	1269.0	48	60.01	39.26	1.219	0.245	0.729	0.603	20.13	II
5	629.9	48	63.66	39.26	1.219	0.245	0.729	0.368	20.13	IIIa
⋮										
129	1114.0	20	60.00	21.95	0.508	0.048	0.729	0.556	9.37	I
130	708.0	20	60.00	16.00	0.508	0.007	0.729	0.403	1.36	I
131	251.4	20	60.10	16.00	0.508	0.007	0.729	0.167	1.36	I
132	233.0	20	62.20	31.32	0.508	0.102	0.729	0.156	20.05	II
133	346.7	20	60.93	31.32	0.508	0.102	0.729	0.223	20.05	II
134	1076.0	20	63.84	38.75	0.508	0.044	0.729	0.544	8.57	II
135	1158.0	30	83.34	41.48	0.762	0.135	0.728	0.570	17.70	IIIa
⋮										
177	34.9	48	60.00	34.85	1.219	0.076	0.729	0.025	6.20	I
178	65.9	48	67.16	50.08	1.219	0.163	0.729	0.047	13.36	I
179	359.1	48	0.12	4.76	1.219	0.001	0.000	0.000	0.05	II

Tabla 5-3.- Tabla resumen de análisis de daño por tubería para el sismo del 19/09/85.

En la tabla 5-4 se presentan las frecuencias de clase obtenidas para las probabilidades de daño de cada tubería, bajo las velocidades y deformaciones del suelo provocadas por el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Clases	Frecuencias
0.00	17
0.10	21
0.20	22
0.29	18
0.39	22
0.49	24
0.59	13
0.69	17
0.78	13
0.88	11
0.98	1
Total	179

Tabla 5-4.-Frecuencias de clase para las probabilidades de daño.

A continuación se presenta el número de las tuberías dentro de cada frecuencia de clase.

Clases	0.00	0.10	0.20	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.78	0.88	0.98
Frecuencia	17	21	22	18	22	24	13	17	13	11	1
No de Tubería	2	48	12	5	1	7	4	6	3	14	152
	68	52	34	20	8	11	18	9	13	30	
	91	70	36	25	26	22	23	10	15	145	
	94	71	40	32	42	27	29	19	16	147	
	95	90	50	41	44	37	31	24	17	148	
	98	93	51	46	47	38	33	28	21	150	
	100	96	55	49	73	39	58	35	54	151	
	107	97	61	65	75	43	74	57	72	153	
	108	99	79	67	77	45	87	60	84	154	
	109	102	80	69	78	53	110	62	85	156	
	122	105	104	101	82	56	111	63	138	157	
	174	114	106	116	88	59	136	83	144		
	175	115	112	120	89	64	159	92	167		
	176	118	113	139	103	66		123			
	177	126	117	142	121	76		149			
	178	127	119	155	125	81		158			
	179	131	128	169	130	86		171			
			132	133	170	137	124				
			140	141	0	143	129				
			165	162	0	146	134				
		168	164	0	160	135					
			172	0	173	161					
						163					
						166					

Tabla 5-5.-Tuberías clasificadas por frecuencias de clase.

Clases	0.00	0.10	0.20	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.78	0.88	0.98
Frecuencia	17	21	22	18	22	24	13	17	13	11	1
Probabilidad	0.051	0.126	0.251	0.368	0.423	0.569	0.603	0.712	0.854	0.912	0.981
	0.000	0.152	0.246	0.311	0.476	0.554	0.667	0.777	0.856	0.919	
	0.085	0.143	0.274	0.334	0.410	0.496	0.676	0.714	0.870	0.914	
	0.097	0.108	0.260	0.296	0.412	0.504	0.634	0.691	0.841	0.888	
	0.093	0.110	0.226	0.348	0.467	0.520	0.607	0.729	0.862	0.899	
	0.042	0.102	0.239	0.373	0.483	0.494	0.682	0.771	0.875	0.974	
	0.047	0.149	0.259	0.329	0.443	0.510	0.618	0.737	0.869	0.889	
	0.017	0.130	0.283	0.382	0.396	0.533	0.660	0.711	0.796	0.968	
	0.077	0.099	0.290	0.378	0.472	0.534	0.611	0.775	0.824	0.972	
	0.042	0.131	0.254	0.305	0.398	0.508	0.612	0.765	0.794	0.919	
	0.092	0.110	0.240	0.350	0.424	0.526	0.608	0.766	0.856	0.945	
	0.000	0.146	0.243	0.386	0.464	0.493	0.612	0.711	0.824		
	0.000	0.134	0.281	0.313	0.445	0.505	0.658	0.694	0.816		
	0.000	0.157	0.274	0.311	0.488	0.566		0.702			
	0.025	0.106	0.243	0.312	0.424	0.514		0.732			
	0.047	0.159	0.203	0.348	0.439	0.575		0.716			
	0.000	0.167	0.263	0.354	0.403	0.577		0.773			
		0.156	0.223	0.334	0.459	0.518					
		0.107	0.264		0.475	0.556					
		0.140	0.265		0.425	0.544					
	0.168	0.251		0.484	0.570						
		0.268		0.410	0.533						
					0.523						
					0.517						

Tabla 5-6.-Probabilidades para cada tubería según frecuencias de clase.

En las siguientes imágenes se presenta la secuencia de caracterización de fallas en las tuberías del Megasector 5, bajo los efectos del sismo del 19 de septiembre de 1989 y las afectaciones correspondientes al suministro de agua potable. La carga mínima de presión para poder cumplir con el suministro, considerando que es la red de distribución primaria y tiene que cubrir las pérdidas de energía propias y de la distribución secundaria, se fija en 20 m.c.a.

No se presentan todas las modelaciones como en el caso de comprobación, puesto que se caracterizan 35 casos, uno para cada falla, se presenta un número limitado de modelaciones con el propósito de que se visualicé la evolución del desabasto de agua.

La primera imagen muestra el estado del Megasector 5 funcionando sin ninguna falla, se analiza con el gasto medio diario (Qmed.), equivalente al CVH=1 en la Ciudad de México. El déficit en el suministro de agua que presenta bajo estas condiciones es del 10%, que es igual a 784.68 l/s, suministrando 6,741.54 l/s., de los 7,526.22 l/s demandados.

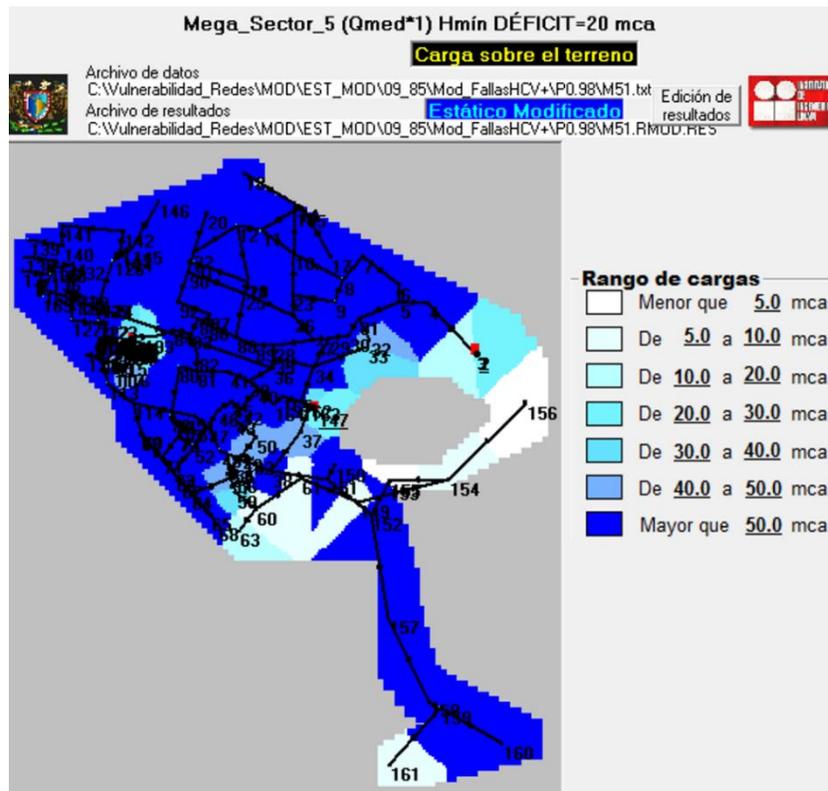


Figura 5-8.- Representación de la carga de presión en el Megasector 5 sin ninguna falla.

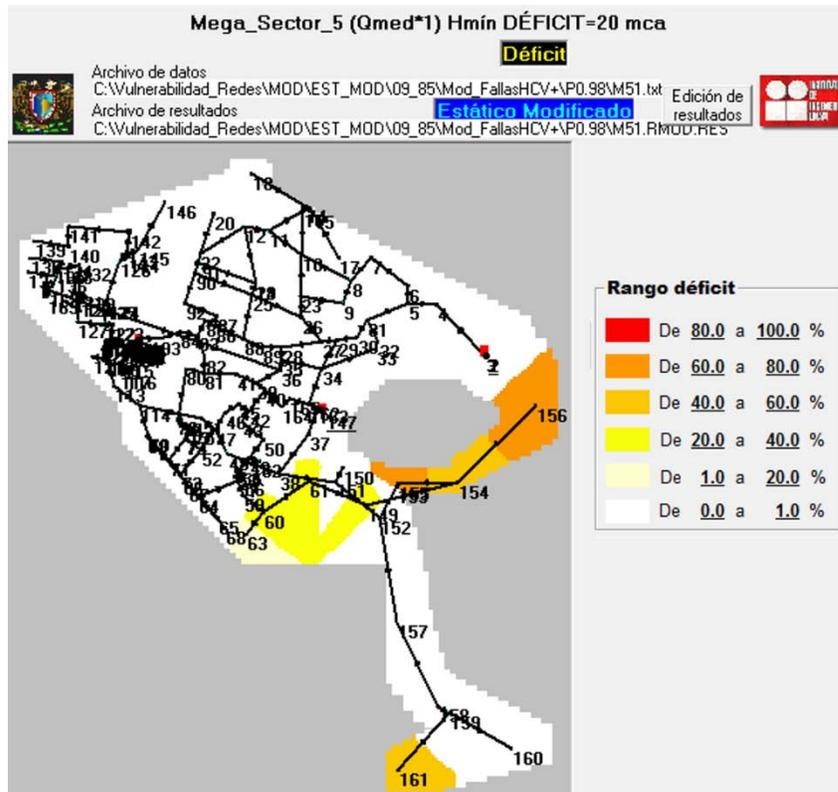


Figura 5-9.- Representación del Déficit en el Megasector 5, sin ninguna falla.

Ante las primeras fallas se pueden visualizar cambios en la distribución de cargas de presión y de déficit, esto debido a la a la complejidad de la red y del gran número de tuberías y conexiones entre ellas, el sistema cuenta con la capacidad de cambiar las distribución de cargas de presión y transporte de flujo en función de la condiciones de frontera con las que se cuenta la red.

En las siguientes figuras se muestran la distribución de cargas de presión para la representación de una falla parcial en el sistema, la falla se encuentra en la tubería no 152 que tiene un diámetro nominal de 1.372 m. y deformación permanente del suelo DPS=0.001m. El déficit en este caso es del 11%, igual a 805.07 l/s.

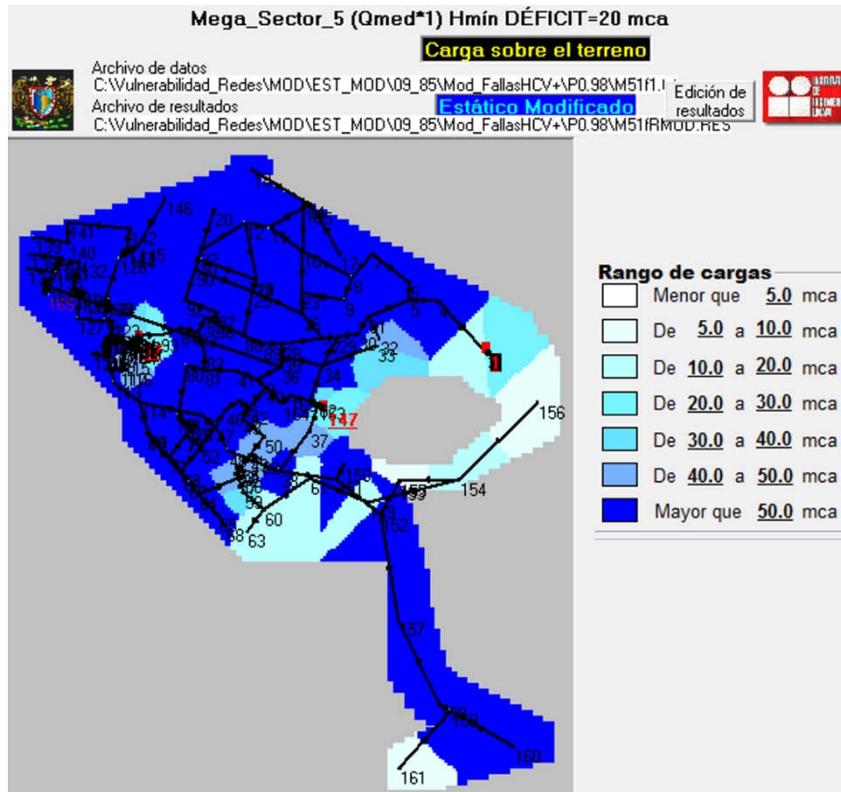


Figura 5-10.- Representación de cargas de presión en el Megasector 5, con una fuga.

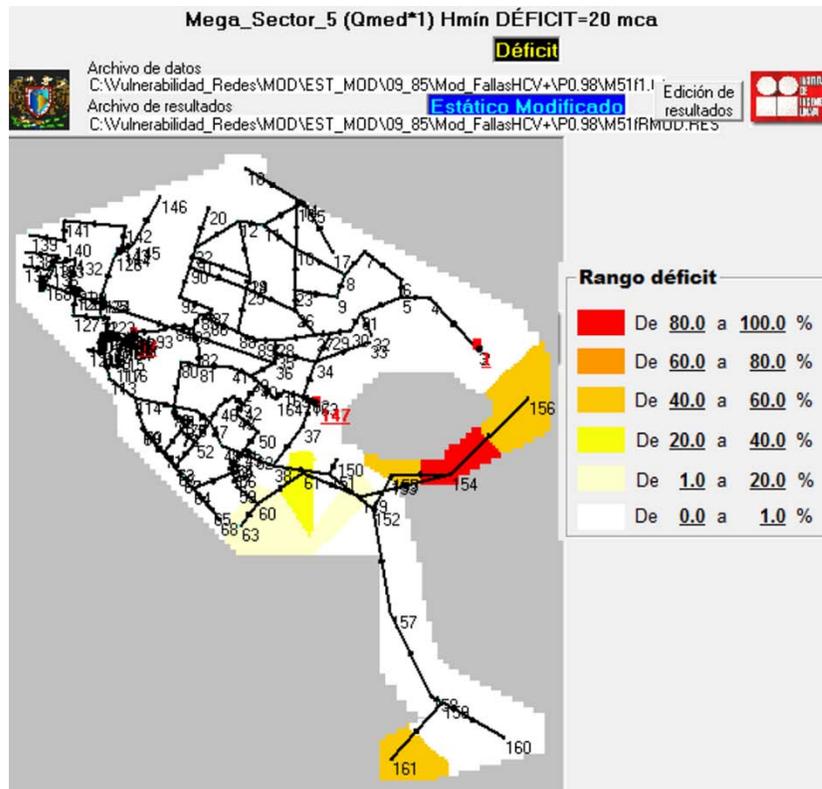


Figura 5-11.- Representación de déficit en el Megasector 5, con una fuga.

En las figuras 5-12 y 5-13 se muestra el resultado de la representación de 10 fallas parciales como fugas, en la red de distribución del Megasector 5, en los cuales se visualiza un aumento promedio de carga de presión en el sistema de 2 m. con respecto a la red sin ningún tipo de falla, el cual cuenta con una carga de presión promedio de 63.27 m.c.a. Por lo que el déficit se encuentra en el volumen que pierde en las fugas y no a una disminución de presión en el sistema, el déficit para este número de fallas es de 24% igual 1,828.33 l/s.

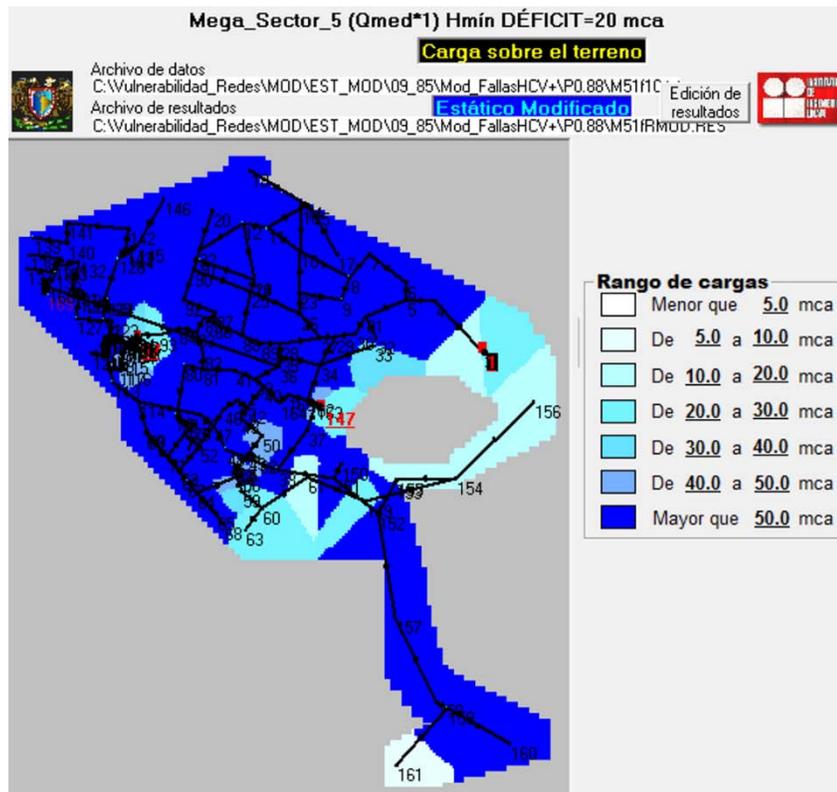


Figura 5-12.-Representación de cargas de presión en el Megasector 5, con 10 fugas.

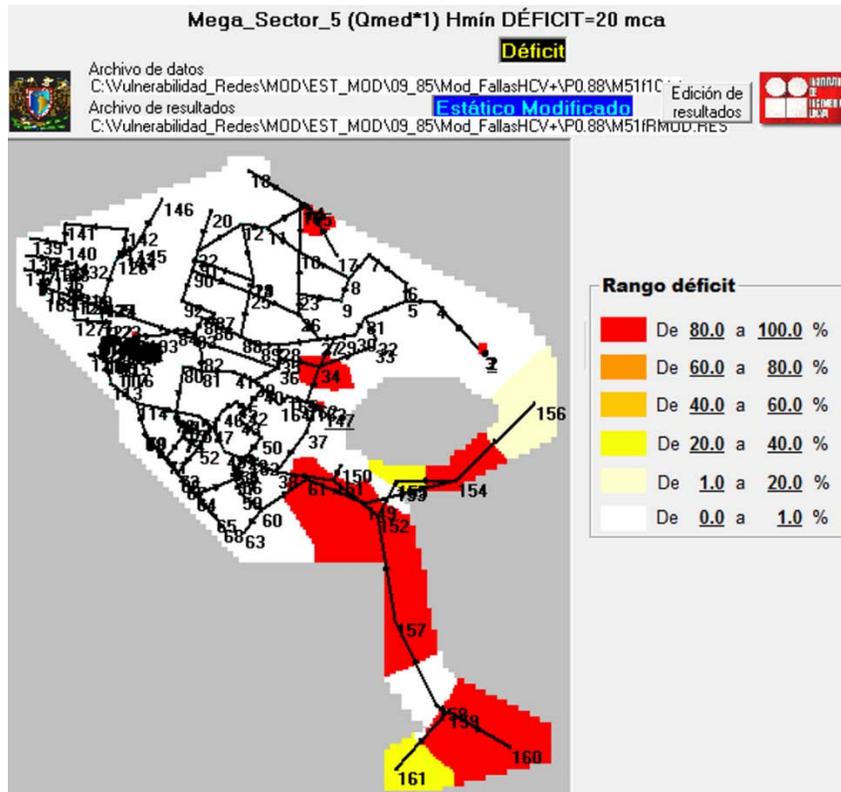


Figura 5-13.- Representación de déficit en el Megasector 5, con 10 fugas.

Las imágenes 5-14 y 5-15 muestran el efecto de 20 fallas en el Mega sector 5, se consideran 2 fallas totales y 18 fugas, en el proceso de evaluación de fallas no se nota el efecto de eliminar una o dos tuberías, ya que por el número de conductos, es posible entregar el volumen demandado por otra vía, estas modificaciones provocan disminuciones de carga de presión imperceptibles en comparación con el aumento inducido por los volúmenes que demandan las fugas en el sistema. El déficit bajo estas condiciones es de 29%, equivalente a 2,208.65 l/s.

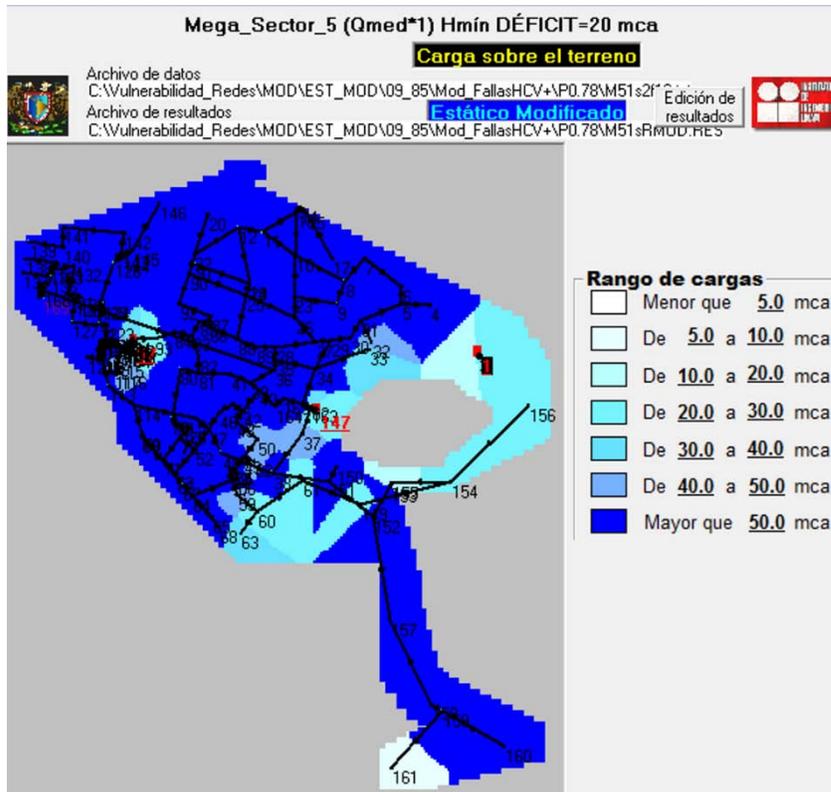


Figura 5-14.- Representación de la representación de carga en el Megasector 5, sin 2 tuberías y 18 fugas.

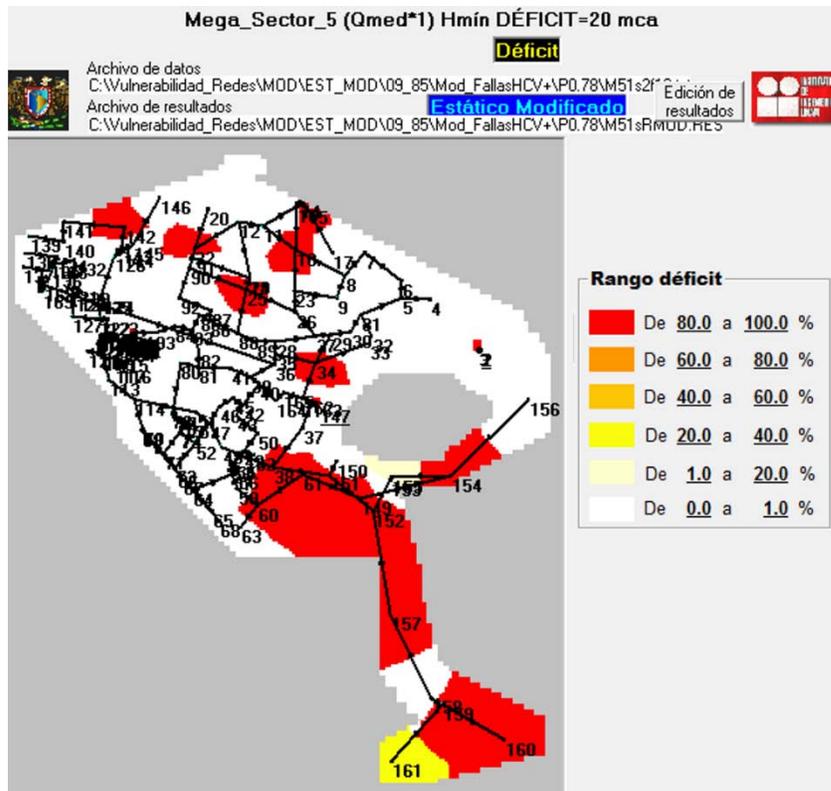


Figura 5-15.- Representación de déficit en el Megasector 5, sin 2 tuberías y 18 fugas.

El déficit producido por un total de 30 fallas, divididas en 3 colapsos de conductos y 27 fugas, es del 32 %, equivalente a 2,582.46 l/s. No produce grandes cambios en la distribución de gastos y de cargas de presión.

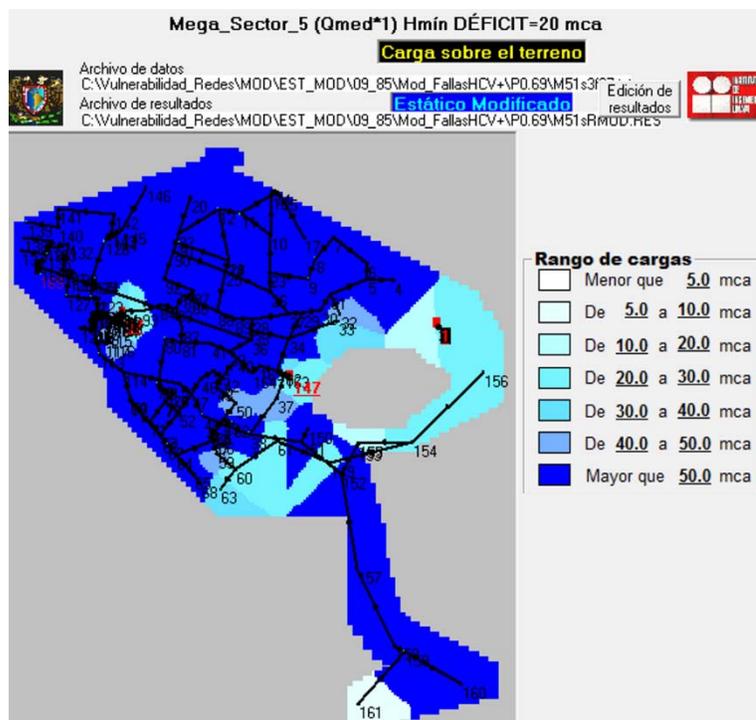


Figura 5-16.- Representación de carga de presión en el Megasector 5, sin 3 tuberías y 27 fugas.

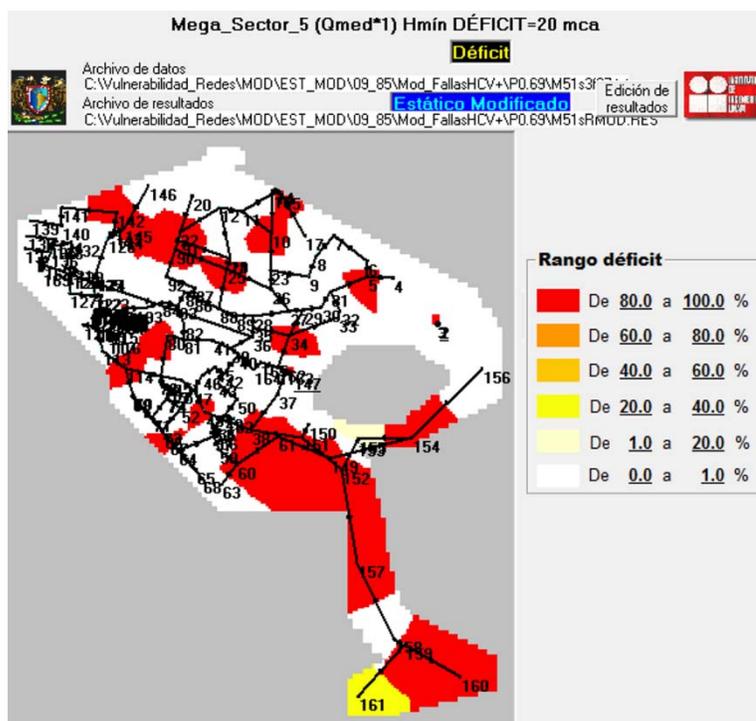


Figura 5-17.- Representación de déficit en el Megasector 5, sin 3 tuberías y 27 fugas

Por último se presentan las imágenes de carga de presión y déficit de un total de 35 fallas, de las cuales 32 son fugas y 3 tuberías colapsadas, esto representa una disminución del 39% al suministro de distribución de agua potable, equivalente a 2,936.33 l/s. En ellas se puede observar el cambio de presión en distintas zonas y consecuentemente el déficit producido por fugas o por la falta de conductos para el transporte del caudal demandado.

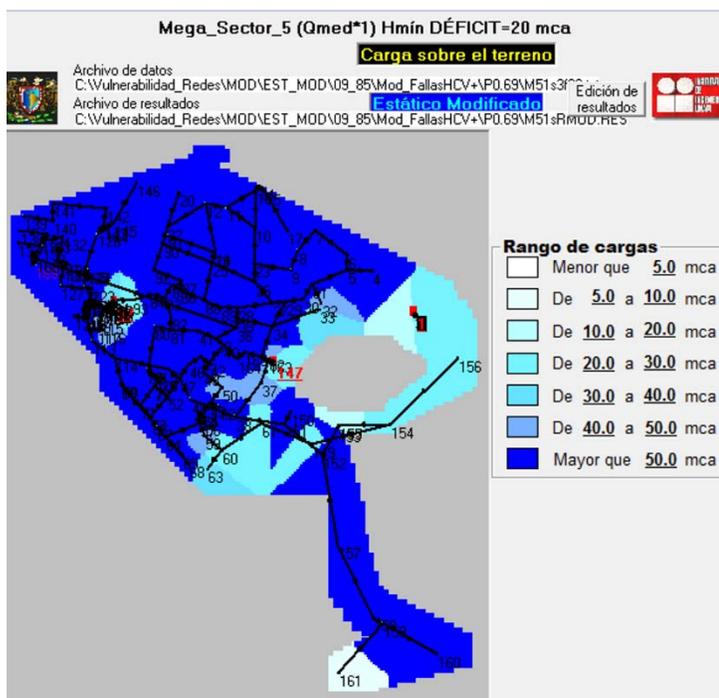
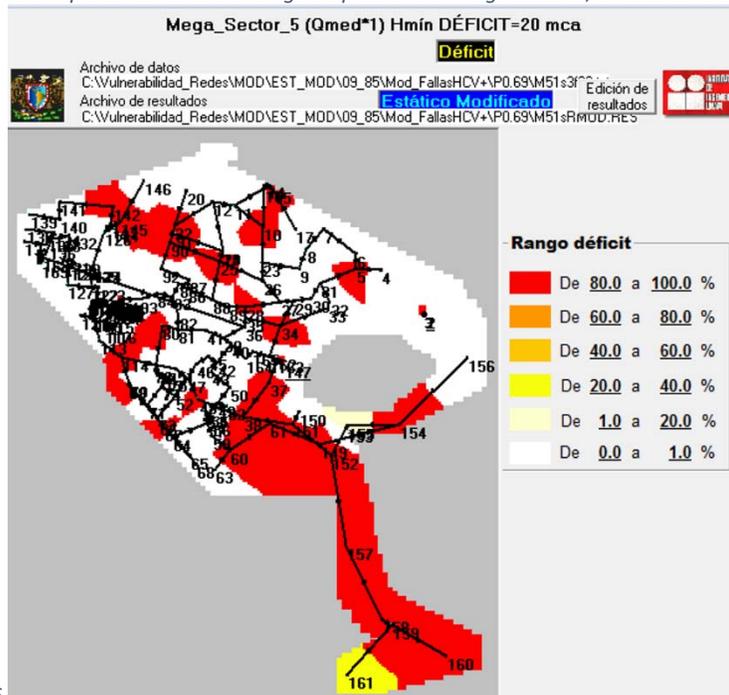


Figura 5-18.- Representación de la carga de presión del Megasector 5, sin 5 tuberías y 35



fugas.

Figura 5-19.- Representación de déficit del Megasector 5, sin 5 tuberías y 35 fugas.

En la figura 5-20 se muestra una gráfica donde se representala evolución del déficit en el suministro de agua para el Megasector 5, respecto al número de fallas.

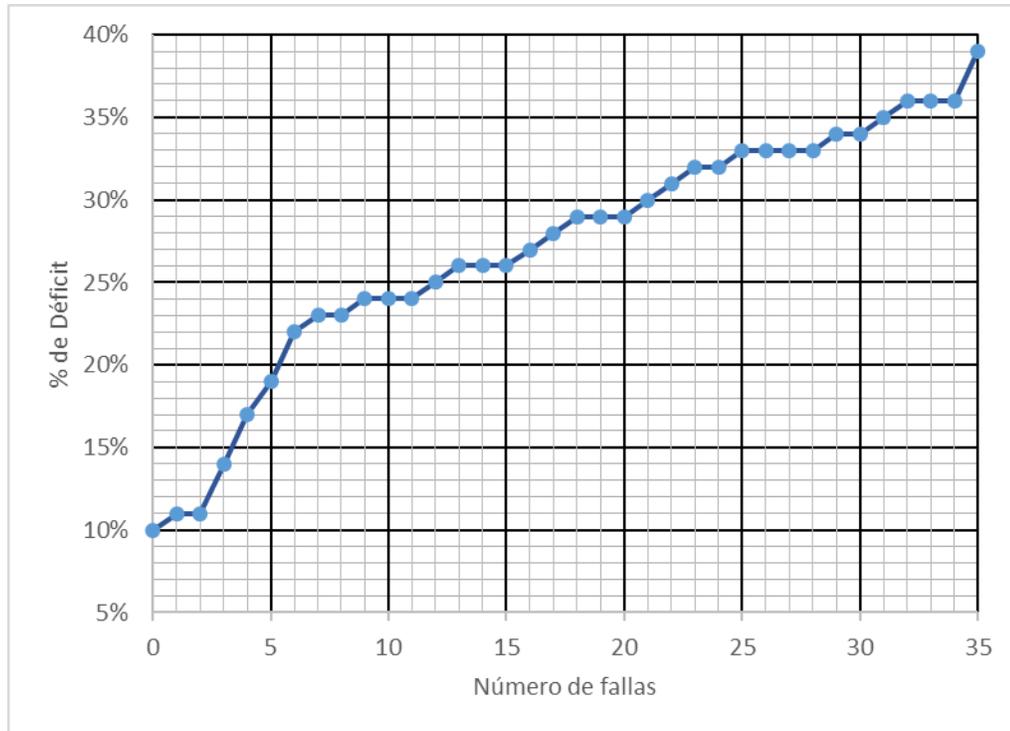


Figura 5-20.- Grafica de evolución del Déficit para el sismo del 19 sep. 1985

Con fines de comparación y de análisis se aplica el método propuesto al sismo del 25 de Abril de 1989, que cuenta con mayor probabilidad de ocurrencia puesto que los sismos de menor magnitud, pero que ocurran con cierta periodicidad afectan en mayor grado al suministro de agua potable y puedan ser importante la localización de puntos vulnerables en la red, para poder efectuar planes de prevención y contingencia.

Para llevar al colapso del sistema bajo los efectos del sismo de 1989 se representaron 34 fallas, por lo que se presentan un resumen de la evolución del déficit.

La red del Megasector 5 de inicio cuenta con las mismas condiciones de demanda, coeficiente de variación y de número de tuberías y nodos, por lo que el déficit de inicio es del 10%, de la demanda de 7,526.22 l/s.

En la tabla 5-7 se presenta el resumen de los resultados del método en el Megasector 5 para el sismo de 1989, ésta solo contiene unos cuantos datos de los 179 obtenidos para cada tubería.

Tub	L [m]	D [m]	Vmhs [cm/s]	asuelo [cm/s]	Tef [s]	DPS [m]	Di [rep/Km]	Pos	DPS/ D [%]	Zonificación
1	754.6	48	60.27	4.76	1.219	0.001	0.729	0.423	0.05	I
2	72.0	48	2.00	18.23	1.219	0.020	0.000	0.000	1.68	II
3	2640.0	48	2.00	16.00	1.219	0.007	0.000	0.000	0.57	II
4	1269.0	48	2.00	16.00	1.219	0.007	0.000	0.000	0.57	IIIa
5	629.9	48	2.00	16.00	1.219	0.007	0.000	0.000	0.57	IIIb
...										
129	1114.0	20	2.00	16.00	0.508	0.007	0.000	0.000	1.36	II
130	708.0	20	2.00	31.32	0.508	0.102	0.000	0.000	20.05	II
131	251.4	20	2.00	31.32	0.508	0.102	0.000	0.000	20.05	IIIa
132	233.0	20	2.00	1.46	0.508	0.000	0.000	0.000	0.04	II
133	346.7	20	2.00	22.19	0.508	0.139	0.000	0.000	27.30	IIIb
134	1076.0	20	2.00	16.00	0.508	0.007	0.000	0.000	1.36	IIIb
135	1158.0	30	5.57	28.29	0.762	0.177	0.728	0.570	23.20	IIIb
...										
177	34.9	48	2.00	50.08	1.219	0.163	0.000	0.000	13.36	I
178	65.9	48	2.22	50.08	1.219	0.163	0.000	0.000	13.36	I
179	359.1	48	0.12	4.76	1.219	0.001	0.000	0.000	0.05	I

Tabla 5-7.- Resumen de los resultados de análisis de vulnerabilidad sísmica para el Megasector 5, durante el sismo de 1989

En las tablas 5-8 a 5-10 se presentan los resultados de la clasificación de los datos en frecuencias de clase y la identificación de tuberías.

Clases	Frecuencias
0.00	101
0.10	10
0.19	10
0.29	5
0.39	13
0.48	8
0.58	7
0.67	7
0.77	11
0.87	6
0.96	1
Total	179

Tabla 5-8.- Frecuencias de clase para la probabilidad de falla ante el sismo 1989

Clases	0.00	0.10	0.19	0.29	0.39	0.48	0.58	0.67	0.77	0.87	0.96
Frecuencia	101	10	10	5	13	8	7	7	11	6	1
No. De Tubería	2	48	12	65	1	11	10	28	9	14	152
	3	70	20	75	22	29	23	62	15	30	
	4	71	61	78	27	58	24	63	16	150	
	5	93	79	101	38	59	74	72	17	154	
	6	97	80	146	73	66	149	83	21	156	
	7	99	139		76	81	158	92	138	157	
	8	102	141		77	135	159	144	145		
	13	118	142		82	166			147		
	18	140	155		137				148		
	19	168	172		143				151		
	25				160				167		
	26				161						
31				173							

Tabla 5-9.- Identificación de tuberías por frecuencias de clase, para el sismo de 1989.

Clases	0.00	0.10	0.19	0.29	0.39	0.48	0.58	0.67	0.77	0.87	0.96
Frecuencia	101	10	10	5	13	8	7	7	11	6	1
Probabilidad	0.000	0.126	0.214	0.382	0.423	0.496	0.661	0.698	0.777	0.871	0.963
	0.000	0.143	0.267	0.344	0.438	0.563	0.617	0.765	0.821	0.883	
	0.000	0.108	0.251	0.354	0.434	0.542	0.670	0.766	0.789	0.951	
	0.000	0.102	0.248	0.310	0.443	0.493	0.605	0.741	0.820	0.929	
	0.000	0.114	0.224	0.351	0.387	0.566	0.656	0.710	0.836	0.869	
	0.000	0.099	0.262		0.456	0.575	0.637	0.694	0.807	0.904	
	0.000	0.131	0.231		0.417	0.570	0.583	0.765	0.864		
	0.000	0.133	0.269		0.424	0.516			0.819		
	0.000	0.107	0.288		0.414				0.839		
	0.000	0.168	0.223		0.417				0.825		
	0.000				0.418				0.816		
	0.000				0.461						
	0.000				0.410						

Tabla 5-10.- Probabilidad de falla de por frecuencias de clase para el sismo de 1989

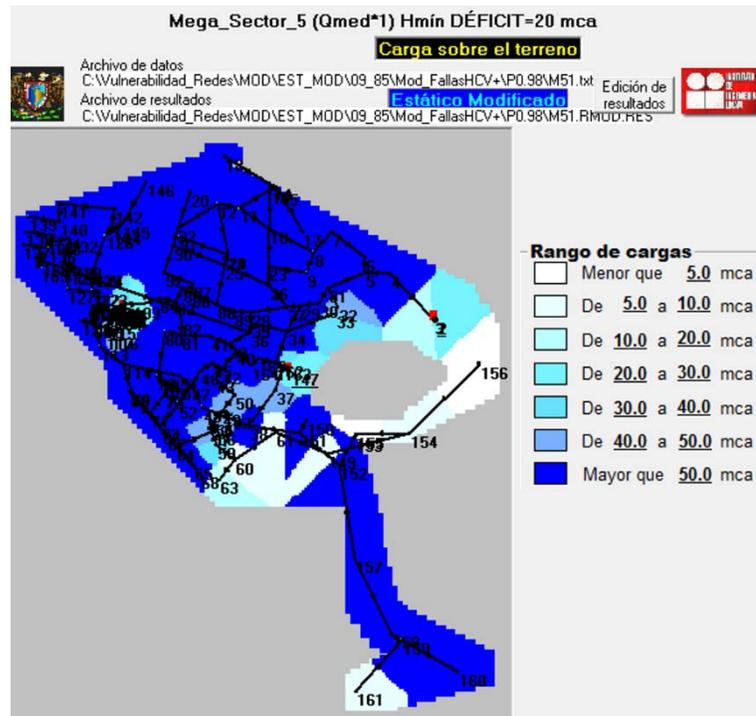


Figura 5-21.- Representación de carga de presión del Megasector 5, sin ninguna falla.

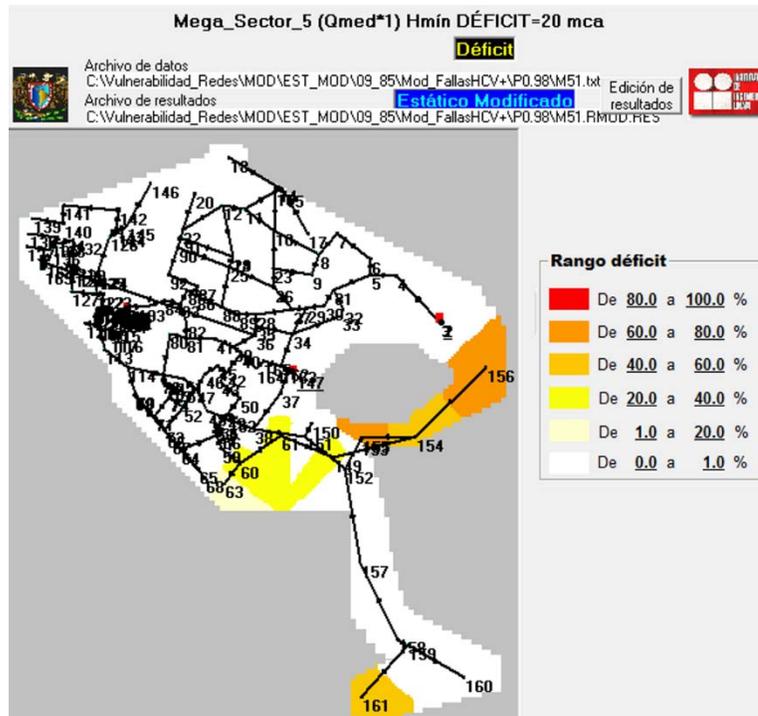


Figura 5-22.- Representación del déficit del Megasector 5, sin ninguna falla.

Con la caracterización de la primera falla como fuga en el Megasector 5 el déficit aumenta al 11%, equivalente a 800.17 l/s. El sistema presenta un aumento leve de la carga de presión promedio de 0.23 m, en las figuras 5-23 y 5-24 se muestra las representaciones de carga de presión y déficit para la primera falla.

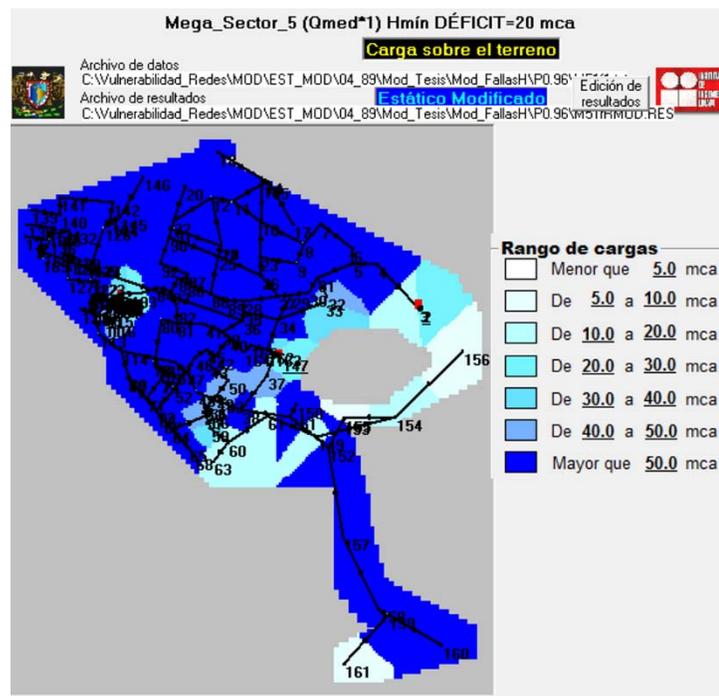


Figura 5-23.- Representaciones de carga de presión del Megasector 5, con una falla por el sismo de 1985

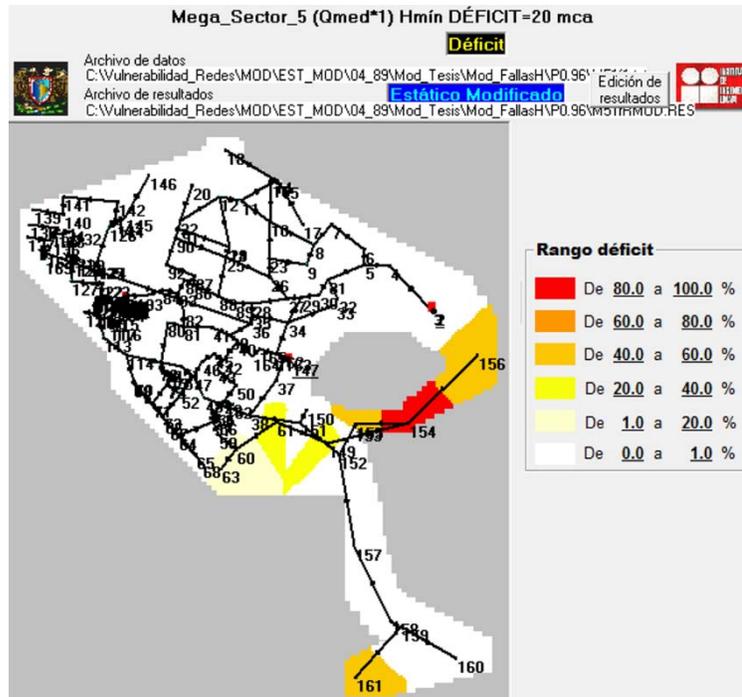


Figura 5-24.- Representación del déficit del Megasector 5, con una falla por el sismo de 1985.

El suministro del Megasector 5 con unas tubería colapsada y nueve fugas es del 71%, lo que equivale a 6,288.70 l/s. de los 7,526.22 l/s., contemplando el volumen derramado en las fugas y se puede observar un incremento de presión promedio de 1.47 m en el sistema.

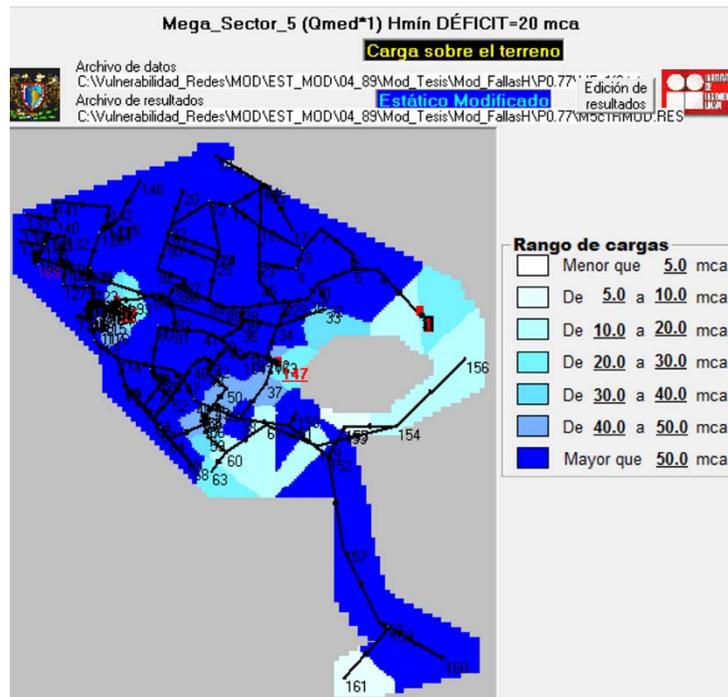


Figura 5-25.- Representación de carga de presión del Megasector 5, con 10 fallas para el sismo de 1989

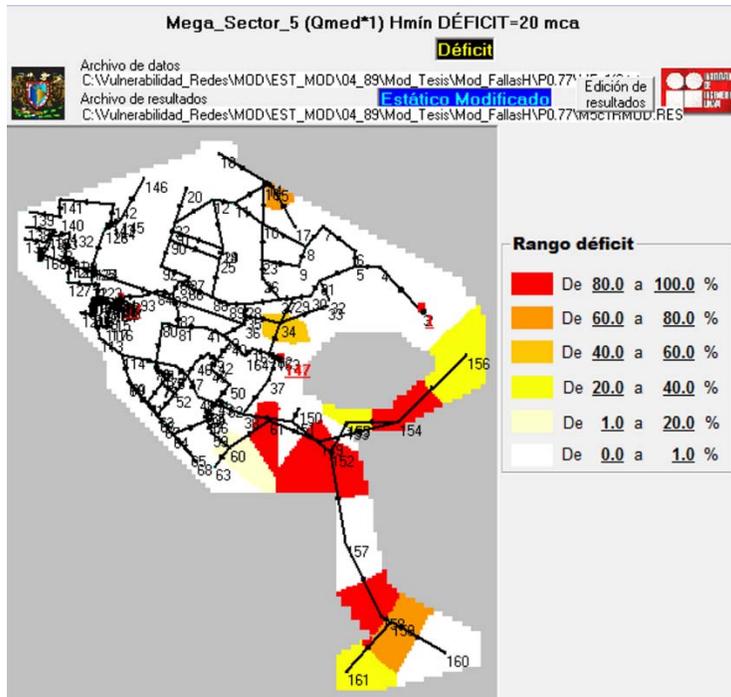


Figura 5-26.- Representación de déficit del Megasector 5, con 10 fallas para el sismo de 1989.

Para 20 fallas el déficit en el Megasector 5 es del 24%, equivalente a 1,825.44 l/s el sistema presenta un incremento promedio de presión con respecto a la red sin fallas de 2.34 m.

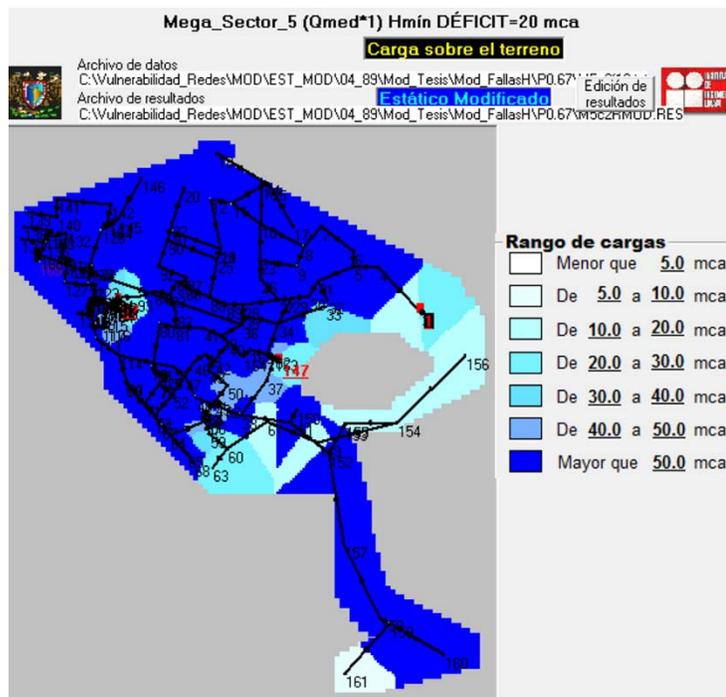


Figura 5-27.- Representación de carga de presión del Megasector 5, con 20 fallas par el sismo de 1989

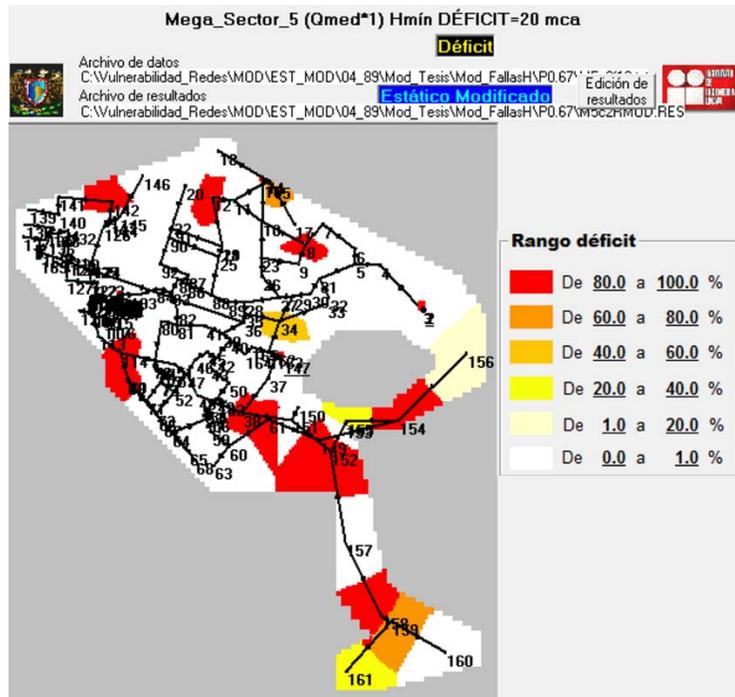


Figura 5-28.- Representación de déficit para el Megasector 5, con 20 fallas por sismo de 1989.

Para un total de 30 fallas de las cuales 4 son fallas totales y 26 fugas, producto del sismo de 1989 el Megasector 5 presenta un desabasto de agua del 28% equivalente a 2,119.78 l/s. y con una carga de presión media en el sistema de 69.19 m.

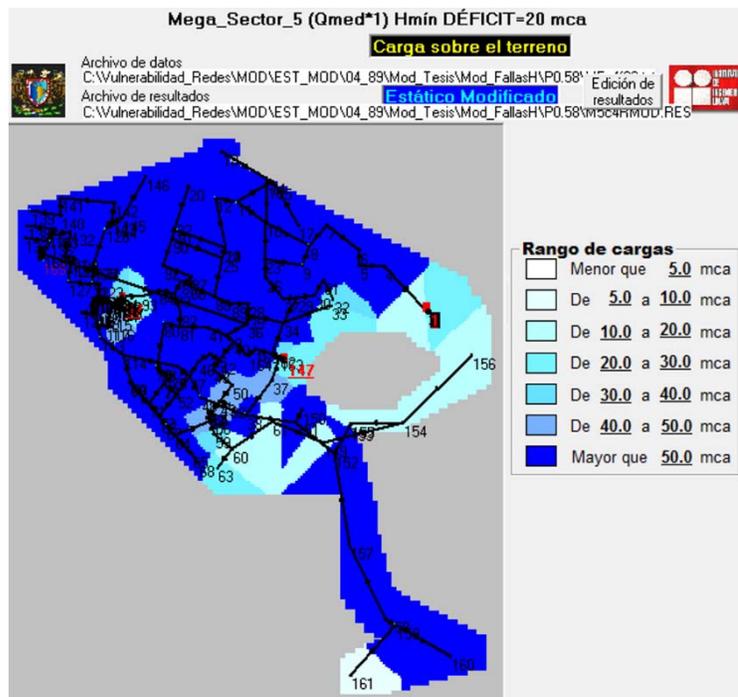


Figura 5-29.- Representación de carga de presión en el Megasector 5, con 30 fallas por el sismo de 1989.

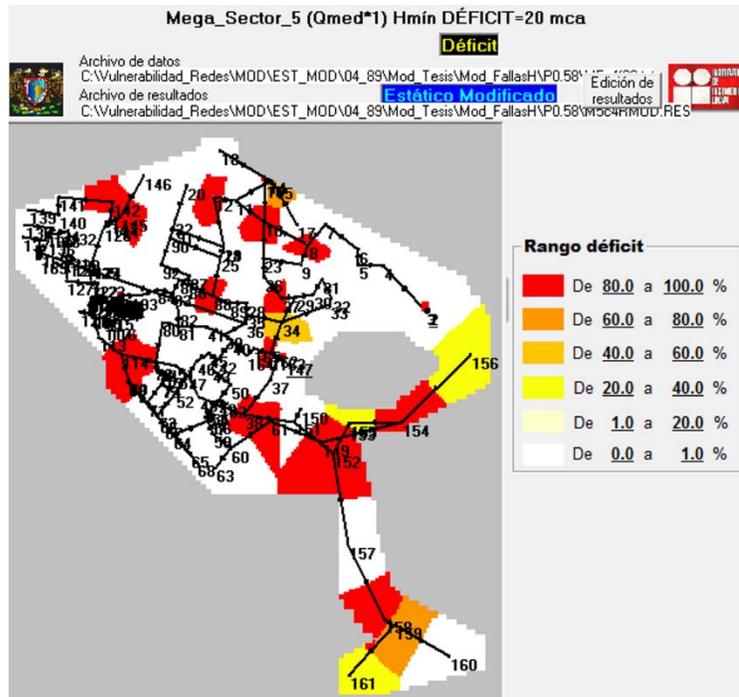


Figura 5-30.- Representación de déficit para el Megasector 5, con 30 fallas por el sismo de 1989.

Bajo los efectos del sismo del 29 de abril de 1989 en el Megasector 5 se pueden representar 34 fallas antes de que el sistema no se pueda resolver congruentemente, estas fallas son 5 colapsos de conductos y 29 fugas donde el desabasto llega a ser del 29%, 2,181.83 l/s. el comportamiento del suministro al principio es muy similar al presentado por el sismo de 1985, a pesar de contar con un número de fallas similar este no alcanzan la afectación lograda por el devastador terremoto, de igual manera observamos que el desabasto se debe a las fugas de caudal provocadas por los efectos del sismo en las tuberías y por lo mismo el aumento de carga de presión es debido a la variación de la capacidad de conducción en la red.

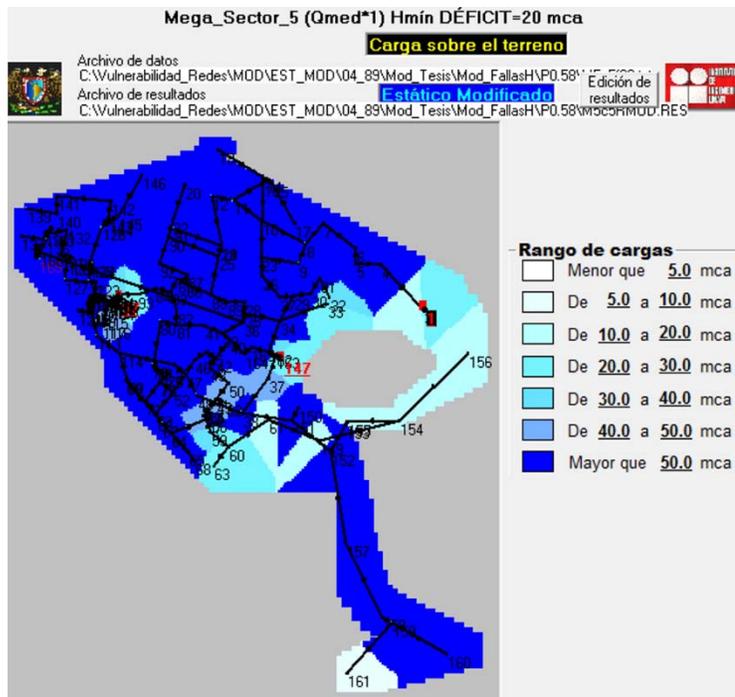


Figura 5-31.-Representación de déficit para el Megasector 5, con 34 fallas por el sismo de 1989.

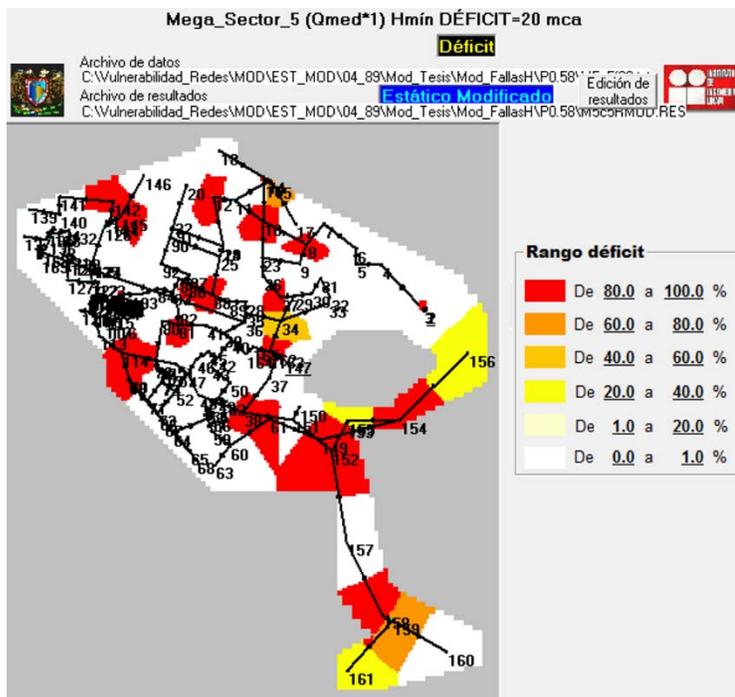


Figura 5-32.-Representación de déficit para el Megasector 5, con 34 fallas por el sismo de 1989.

En la imagen 5-33 se muestra la evolución del desabasto de agua respecto al número de fallas para los efectos del sismo de 1989.

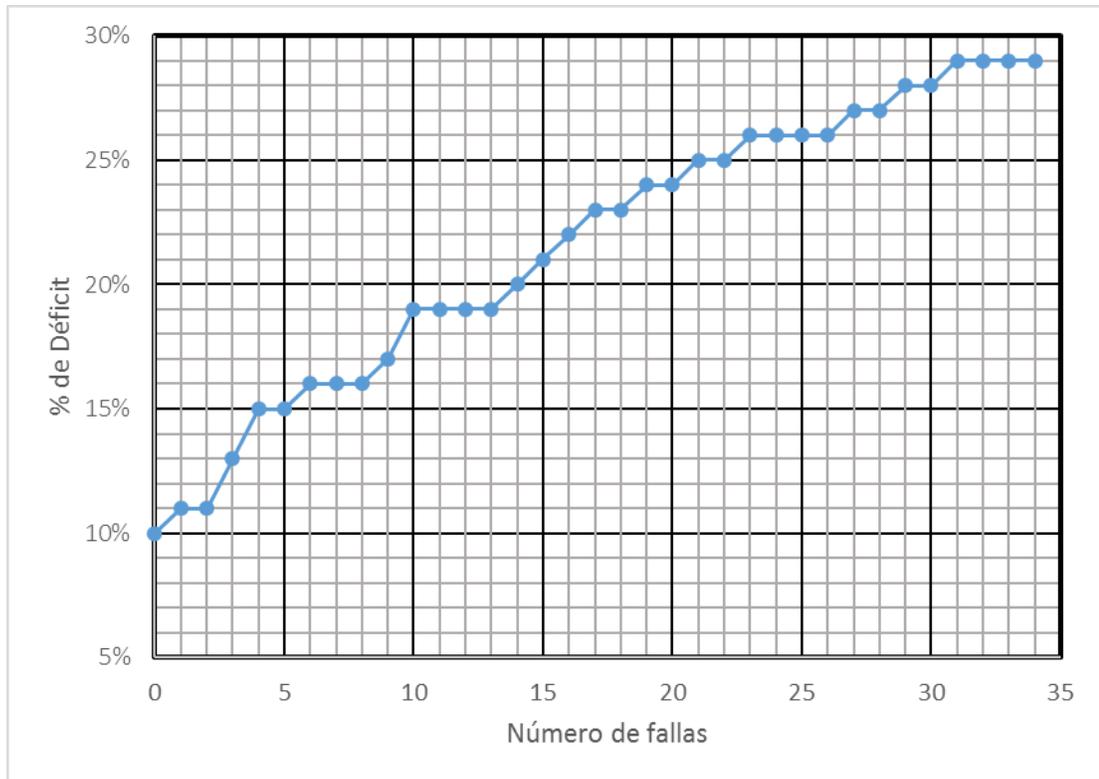


Figura 5-33.-Grafica de evolución del Déficit para el sismo del 29 de abril 1989.

Capítulo 6 - Conclusiones

El análisis del suministro de redes de distribución de agua potable después de los efectos de un sismo, tiene cierto grado de incertidumbre debido a las consideraciones del método propuesto.

Se comprobó con la red simplificada propuesta, que se puede calcular la vulnerabilidad sísmica de la distribución de agua potable para cualquier condición geológica, es decir, de acuerdo con el tipo suelo y las velocidades máximas horizontales que se presentan en el mismo; lo que fue congruente con el tipo de suelo en el que se encuentran las tuberías.

Se aplica el método a una red de distribución real (Megasector 5 de la red primaria de agua potable de la Ciudad de México). Para esta red se cuantifica el desabasto de agua potable en términos de porcentaje del volumen demandado por falla para dos sismos con distintos periodos de retorno.

Se estima que el porcentaje de desabasto obtenido en la red real está conforme a la magnitud de los sismos analizados, siendo mayor para el sismo del 19 de septiembre de 1985 que fue de una magnitud de 8.1 en la escala de Richter, comparado con el sismo de abril de 1989 de magnitud de 6.9.

Se debe resaltar que ocasiones los sistemas cuentan con déficits iniciales importantes, y cualquier modificación en la topología de las redes de distribución puede afectar en favor o en contra el funcionamiento, por eso es importante realizar este tipo de análisis con modelos que permitan cuantificar la proporción de los requerimientos demandados que es cumplida.

En la tabla 6-1 se presentan los balances de los caudales suministrados en la red analizada bajo las posibles fallas de los sismos analizados.

Sismo	Q demandado (l/s)	Q suministrado (l/s)	% déficit
19/09/1985	7526.22	5,530.06	29
29/04/1989	7,526.22	4,596.87	39

Tabla 0-1.-Déficit en el Megasector 5.

En la imagen 6-1 se presenta la comparación de la evolución del desabasto en el Megasector 5 para los eventos sísmicos analizados. Se observa el porcentaje de desabasto en función del número de fallas, siendo mayor el déficit para el mismo número de fallas bajo los efectos del sismo de 1985 con respecto al del sismo de 1989.

El comportamiento del desabasto en la red fue similar al comienzo de la representación de fallas, pero este se dispara a partir de 3 fallas representadas, el número de estas y sus efectos pueden variar en función de las condiciones del sistema, el número de tuberías y nodos y la forma en que tiendan a modificarse las cargas de presión y gastos en la red.

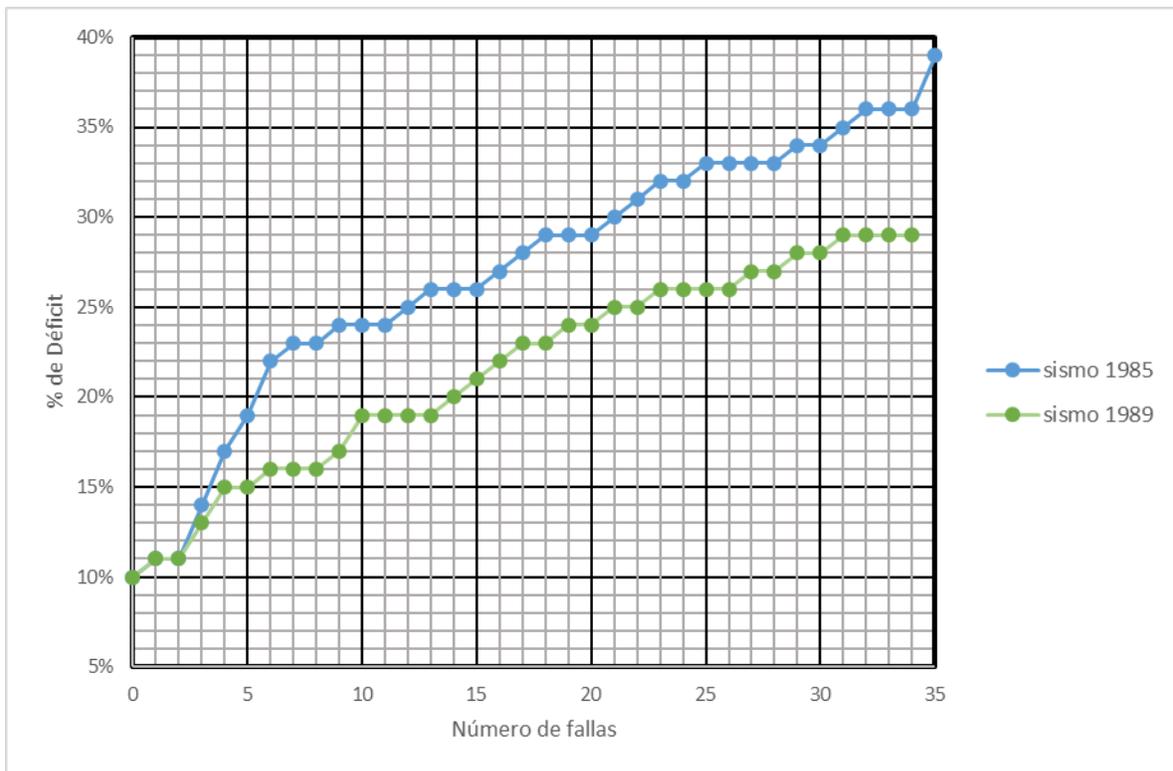


Figura 0-1.- Comparación de la evolución del déficit.

El análisis de vulnerabilidad sísmica por tubería favorece a la detección de las zonas más desfavorables para cierto tipo de evento sísmico, lo que podría implicar en obras de protección de las líneas de conducción o en la instalación de válvulas de seccionamiento aun dentro de sectores hídricos ya establecidos, con la intención de asegurar el abasto de agua potable a zonas importantes, como es el caso de los hospitales.

Se considera que falta realizar estudios referentes a la relación del comportamiento hidráulico de las líneas de conducción de agua, bajo los efectos de un sismo, ya que se requiere afinar la estimación de las probabilidades de ocurrencia de las fallas en la tuberías, experimentar con el comportamiento de las tuberías bajo diversas condiciones hidráulicas y acciones del suelo y automatizar la representación de fallas simultaneas en los modelos matemáticos, para de hacer más real y eficiente los análisis de vulnerabilidad sísmica.

También es importante considerar fallas previas existentes en las redes analizadas, puesto que en este caso se idealizo la red, y la manera de ocurrencia de las fallas, existen muchas consideraciones, como hidráulicas, sísmicas, geológicas y de materiales que se podrían integrar en estudios posteriores para mejorar este tipo de análisis.

Referencias Bibliográficas

A.Marston and A. O. Anderson (1913) *The Theory of Loads on Pipes in ditches and Tests of cement and claydrain tile and sewer pipe*, Iowa State College of Agriculture and Mechanic Arts, Engineering Experiment Station , Ames Iowa.

A.P. Moser “*Buried Pipe Design*” (2001), Mc GrawHill , Second Edition, Mechanical Engineering Utah State University, Logan, New York.

American Lifeline Alliance (ALA). (2001). *Seismic fragility formulations for water systems: Guidelines*. American Lifelines Alliance and Federal Emergency Management Agency (FEMA), ASCE, Reston, VA.

Arreguín F., Ochoa L., Fernández A. (1997), *Evaluación de pérdidas en redes de distribución de agua*, TLALOC-AMH, Órgano informativo de la Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH), No.10, septiembre-diciembre.

Avith Mendoza P. (2012) *Estudio de la estabilidad del valor “b” para regiones sismotectónicas en México*, Tesis de Maestría presentada a la División de Estudios de Ciencias de la Tierra, UNAM.

Ayala G., O'Rourke M. and Escobar A.,(1990) *Evaluation of the Effects of the 1985 Michoacan Earthquake on the Water Systems in Metropolitan Mexico City. Earthquake Spectra*: August 1990, Vol. 6, No. 3, pp. 473-496.

Cahudry H., (1987), *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold Company Inc, New Yor

Federal Emergency Management Agency (1994) *Multi-azard loss Estimation Methodology, Earthquake Model*, Hazus- MH 2.1, Washinton, D.C.

Fuentes O., De Luna F., Velez L., Rosales I (2015). *Vulnerabilidad del servicio de una red de agua potable dañada por un sismo*. Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructura, Ciudad de México, México.

Fuentes O., De Luna F., Velez L., Rosales I (2015). *Criterio para estimar la vulnerabilidad de la distribución de agua potable de redes de tuberías*. XIV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje, Guanajuto, México.

Fuentes O., Sánchez B., *Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente*, Revista Ingeniería, Vol LXI, No 4, págs. 49-58 México, octubre - diciembre 1991.

Fuentes O., Fuentes G., *Funcionamiento hidráulico a presión en régimen no permanente de una red de tuberías*, XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol II, págs 427-437, Cartagena de Indias, Colombia, septiembre 1992.

Fuentes O., Rosales I., Sánchez B., Carrillo J., *Desarrollo y comprobación experimental de un método para detectar fugas en redes de tuberías de agua potable*, Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina. 2000.

Gálvez D. (2011) *Calculo estructural de tuberías enterradas por el método de elementos finitos, con bas en el informe técnico CEN/TR 1295-3*, Tesis doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

Giustolisi, O., Laucelli, D. (2011). *Vulnerability Assessment of Water Distribution Networks under Seismic Actions*. ASCE, Reston, VA.

Newmark N., Rosenblueth E. (1971) *Fundamentals of earthquake engineering*, Englewood Cliffs

Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo (2010), México, D.F.

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, (2007), Comisión Nacional del Agua, Coyoacán, México, D.F.

P. Beer, R. Jhonston., (2010) *Mecánica Vectorial para Ingenieros*, McGrawHill, Novena Edición, México D.F.

Pineda O. y Ordaz M. (2002). *Análisis de vulnerabilidad sísmica en la red primaria de distribución de agua potable del Distrito Federal*, Sociedad Mexicana de Ingeniería estructural, A.C.

Pineda O. y Ordaz M. (2004) *Mapas de Velocidad Máxima del Suelo para la ciudad de México*, Revista Ingeniería Sísmica No 71, p 37-62, Méxicio D. F.

Rodriguez Katya, De Luna Faustino, Jimenez Martin y Fuentes Oscar, *Localización Óptima de Válvulas Reductoras de Presión en Redes de Distribución de Agua Potable utilizando un Algoritmo Genético Multiobjetivo*, 5° SEREA, Valencia España.

Rosales I. (2012), *Propuesta de métodos para revisión, rehabilitación y diseño de redes de tuberías de agua potable*, Tesis de Doctorado presentada a la División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM..