

**EVALUACIÓN DE POLÍTICAS DE MANTENIMIENTO DE REDES DE  
ACUEDUCTO**

**WILLIAM WILCHES RODRÍGUEZ**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Bogotá, Julio de 2002**





## **Capítulo 1 Introducción**

---

El problema de las fugas en una tubería es un problema que comúnmente se maneja ex post facto, es decir, después de haber ocurrido la falla en el tubo, efectuando la reparación de la misma, sin la implementación clara de una política de mantenimiento de los tubos que lo requieran, de una manera planificada y con criterios técnicos y financieros adecuados.

El mantenimiento de los tubos en la red se tiene en cuenta desde sus dos aspectos básicos, la reparación del tubo en el momento que falla y el reemplazo del tubo por uno nuevo. El reemplazo por un tubo nuevo, se puede llevar a cabo en el momento en que falle el tubo o como medida preventiva, cuando las circunstancias no son las apropiadas.

Una adecuada política de mantenimiento de las redes de distribución de agua tiene consecuencias palpables, tanto en la calidad del servicio, como en el retorno de la inversión de la entidad encargada de su manejo.

Resulta imposible determinar si un tubo fallará o no en el futuro, y por lo tanto se pueden realizar distribuciones de probabilidad, que tengan como parámetros las condiciones que se presentan en cada tubo. Estas condiciones se refieren a características intrínsecas del tubo, del entorno que lo rodea, y de la interacción entre este entorno con el tubo. Sumado a lo anterior, estas condiciones no son estáticas sino que van cambiando con el tiempo.

Con la determinación de la distribución de probabilidad de cada tubo, se procede a evaluar las políticas para el manejo de las redes de acueducto. La distribución empleada es basada en la tasa de falla, la cual en última expresa la probabilidad promedio de que un elemento falle en su vida útil.

La deferencia básica entre la metodología que se implementa en este escrito, con respecto a otras que pretenden el mismo fin, consiste básicamente en las variables que se toman en cuenta, tanto para determinar la probabilidad de falla de un tubo, como de la política en sí.

Estas variables pueden tener un efecto apreciable bajo ciertos escenarios, pero de la misma manera se pueden presentar casos en los que las mismas variables no tengan el mismo efecto.



Comúnmente las metodologías utilizadas para determinar la probabilidad de falla de un tubo, la hacen depender como única variable de la cantidad de fallas anteriores que halla tenido este mismo tubo, pero en muchos de los casos esta información no se posee o puede no ser lo suficientemente confiable, como para sacar conclusiones a partir de las mismas.

El objetivo al evaluar las diferentes políticas, es el de minimizar para una cantidad de escenarios hacia el futuro el valor presente de la cantidad de dinero que se invierta en hacer reparaciones y/o reemplazos de tubería, sin dejar de tener presente el costo del agua, trayendo esos costos a la tasa de descuento.

Los escenarios se refieren aquí, a la cantidad de años que serán evaluados en el flujo de caja.

La distribución de agua en un área determinada presenta características de monopolio natural, es decir, que presenta una actividad de costos marginales decrecientes.

El calculo de las fugas, que son consideradas en conjunto con el costo del agua para el flujo de caja, es llevado a cabo a través de una demanda en el nodo que resulta igual a un coeficiente de descarga multiplicado por la presión en el nodo elevado a un exponente que tiene una media de 0.5.

A la hora de tomar una decisión sobre la política a llevar a cabo en la red, se toma en cuenta el costo que representa una acción dada sobre la red y el monto de los potenciales problemas y costos que esto puede evitar.



## **Capítulo 2 Objetivos Generales**

---

1. Definir una metodología básica para la evaluación de diferentes políticas en el manejo de redes de tuberías a través de un algoritmo de software.
2. Hacer el diseño, desarrollo, e igualmente llevar a cabo la implementación del algoritmo atendiendo a requerimientos en los procedimientos, para garantizar la calidad de software que permitan refrendar un producto que cuente con las características de adaptabilidad, mantenibilidad y evolucionabilidad.
3. Valorar el software desarrollado con una red real, que permita la evaluación de diferentes políticas utilizando parámetros estándares.
4. Llevar a cabo un análisis de sensibilidad sobre ciertas variables, que permitan llevar a cabo la distribución de probabilidad de falla de un tubo.
5. Verificar la utilidad de la evaluación de políticas en las redes de tubería actuales, para mejorar el manejo que se le da a las mismas a través de criterios especialmente hidráulicos, que permitan determinar las fugas que se presentan en un tubo.
6. Implementar en el análisis los criterios para la evaluación financiera de proyectos de inversión, y particularmente los que implican la valoración de flujos de capital en un solo sentido.
7. Llevar a cabo análisis estadísticos y probabilísticas, que sirvan como criterios en la determinación de probabilidades de falla de un tubo de una red de acueducto, bajo diferentes condiciones.
8. Comprobar, desde un marco de referencia práctico y conceptual, la utilidad de efectuar este tipo de análisis, realizando un estudio en una red real.



## ***Capítulo 3 Objetivos Específicos***

---

1. Explicación detallada de las características de los tipos de políticas, que serán evaluadas.
2. Explicación detallada de la metodología llevada a cabo para el desarrollo del software, empleado en la evaluación de las distintas políticas.
3. Explicación detallada del algoritmo de determinación de la probabilidad de falla de un tubo.
4. Programación y documentación de clases y reutilización de software de métodos utilitarios y de generación de números aleatorios.
5. Diseño y programación del software para llevar a cabo la evaluación de las distintas políticas a través de la implementación de métodos de ingeniería de software.
6. Pruebas con la red de acueducto del sector 8 de Bogotá.



## **Capítulo 4 Estado del Arte**

---

Cuando se aborda el tema de las políticas de mantenimiento en redes de distribución de agua, los estudios realizados se centran en encontrar la edad óptima de reemplazar los tubos al momento de ocurrir las fallas. Es decir, al momento de que ocurra la falla decidir si se reemplaza o se repara. En esta no son tenidas en cuenta las políticas de mantenimiento preventivo.

La manera de encontrar esta edad óptima de reemplazo de una tubería varía de un estudio a otro.

Algunos de los estudios más importantes que han sido llevados a cabo en el tema, se centran en que un tubo debe ser reemplazado cuando el costo esperado de instalar nuevos tubos, sea menor al costo de las reparaciones que se realicen [Stacha, 1978; Shamir and Howard, 1979; Walski and Pellicia, 1982, 1982].

Otro acercamiento al tema consiste en tomar como base el número de reparaciones que se han llevado a cabo en cada tubo de la red y el tiempo desde el último mantenimiento en cada tubo, considerando la edad de reemplazo de un tubo por medio de un proceso de semi-Markov [Li and Haines, 1992]; [Luong and Nagarur, 2001].

Ya desde antes se habían tenido en cuenta las fallas que había tenido antes el tubo, reemplazando el tubo cuando se ha cumplido un número determinado de fallas el cual minimice el costo total del valor presente del mantenimiento [Male *et al.* 1990].

Otra manera de realizar estos análisis es a partir de herramientas de mediciones de riesgo para el manejo de tuberías en redes de distribución, identificando los factores que pueden ser más importantes en las fallas de los tubos y la contribución de cada uno. Este estudio de riesgo se basa en datos históricos, experiencia y sentido común a través de un manejo flexible del riesgo. Esta metodología de medición del riesgo, se basa en que en la elaboración de fórmulas complejas para evaluar el riesgo, se emplean suposiciones que hacen que haya un alto margen de incertidumbre que no justifica el costo de llevar a cabo los análisis en esa dirección [Muhlbauer, 1992].



Análisis estadísticos de diferentes redes de distribución han mostrado en promedio, como los distintos factores que influyen en la probabilidad de falla de un tubo, tienen incidencia en el resultado de esta probabilidad. Aquí las variables que son tomadas en cuenta son las variables relacionadas con la edad, el diámetro y la longitud del tubo, la corrosión y las características del suelo en que este asentado cada tubo, tanto desde el punto de vista sísmico como de la permeabilidad del mismo [Sullivan, 2002].

Y son básicamente estas dos últimas referencias las que sirvieron como base para la elaboración de la distribución de probabilidad obtenida.



## **Capítulo 5 Variables**

---

A continuación se glosan las categorías de variables, que influyen en el desarrollo de la evaluación de políticas de mantenimiento.

### **5.1 Variables Topológicas**

---

Están constituidas por las variables que están relacionadas con las características de tipo físico, posición y forma en las tuberías.

Las variables topológicas son el diámetro, la longitud, el coeficiente de descarga de fugas, el exponente de fugas, la posición, la edad desde el momento en que esta fue instalada, el distrito al que pertenece cada tubo y los nodos iniciales y finales de los tubos.

Estas variables presentan significancia, estando o no la red en funcionamiento.

### **5.2 Variables de Probabilidad**

---

Son las variables que se toman en cuenta para calcular la probabilidad de falla de un tubo, junto con variables topológicas. Estas variables se refieren a la tasa de fallas de un tubo por efectos de la interacción edad-diámetro-longitud, suelo y corrosión.

### **5.3 Variables de Políticas**

---

Son las variables que sirven para evaluar financieramente la política que este analizando. Estas variables están constituidas básicamente por el No. de escenarios, la tasa de interés de oportunidad, el porcentaje de reemplazo, la fuga límite, el costo unitario del agua y el costo unitario de reemplazar la tubería para cada material.



## **5.4 Variables Financieras**

---

Son las variables que dan como resultado el análisis financiero del flujo de caja en las diferentes inversiones que implican llevar a cabo una u otra política. Estas variables son el Valor Presente Neto, el Valor Futuro Neto y el Costo Anual Equivalente.



## **Capítulo 6 Metodología Empleada**

---

A continuación se describe la metodología utilizada para la elaboración del algoritmo del software para evaluar políticas de mantenimiento en redes de acueducto con su topología actual

### **6.1 Resumen general**

---

El desarrollo de la metodología implica el uso de las siguientes etapas:

- La recolección de información existente en la empresa distribuidora de agua sobre fallas en tuberías categorizadas por tipo de material y diámetro
- El procesamiento de la información para su migración al análisis estadístico de los mismos y la determinación de las distribuciones de probabilidad.
- El análisis técnico económico de los resultados.
- Diagramas de Clases
- Diagramas de Utilidades desarrolladas
- Descripción del Algoritmo empleado en la realización de pruebas de software

### **6.2 Recolección de la información**

---

La información básica requerida para el desarrollo de las distribuciones de probabilidad, se obtiene de las empresas distribuidoras de agua en la división encargada de realizar el mantenimiento.

Para su realización fue empleada la información de los informes más recientes de la División de Mantenimiento de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).

Esta información se refiere en primer lugar a la cantidad de fallas en la red disgregadas por diámetro de la tubería. (Ver Figura 6-1, Figura 6-2, Figura 6-3)

La Tabla 6-1 muestra la cantidad de fallas por diametro de tuberia y el porcentaje en que estas se presentaron para las divisiones de mantenimiento de la EAAB. Centro y Norte.



La Tabla 6-2 muestra el promedio obtenido de la evaluación de los informes. Y la Figura 6-1 muestra como se distribuyen estos porcentajes. En estas dos graficas es posible observar que la mayor parte de las fallas se presentan en tuberías de 3in de diámetro en alrededor del 43.9% de los casos, mientras que para el resto de los diámetros este porcentaje no alcanza a ser de mas de 20%.

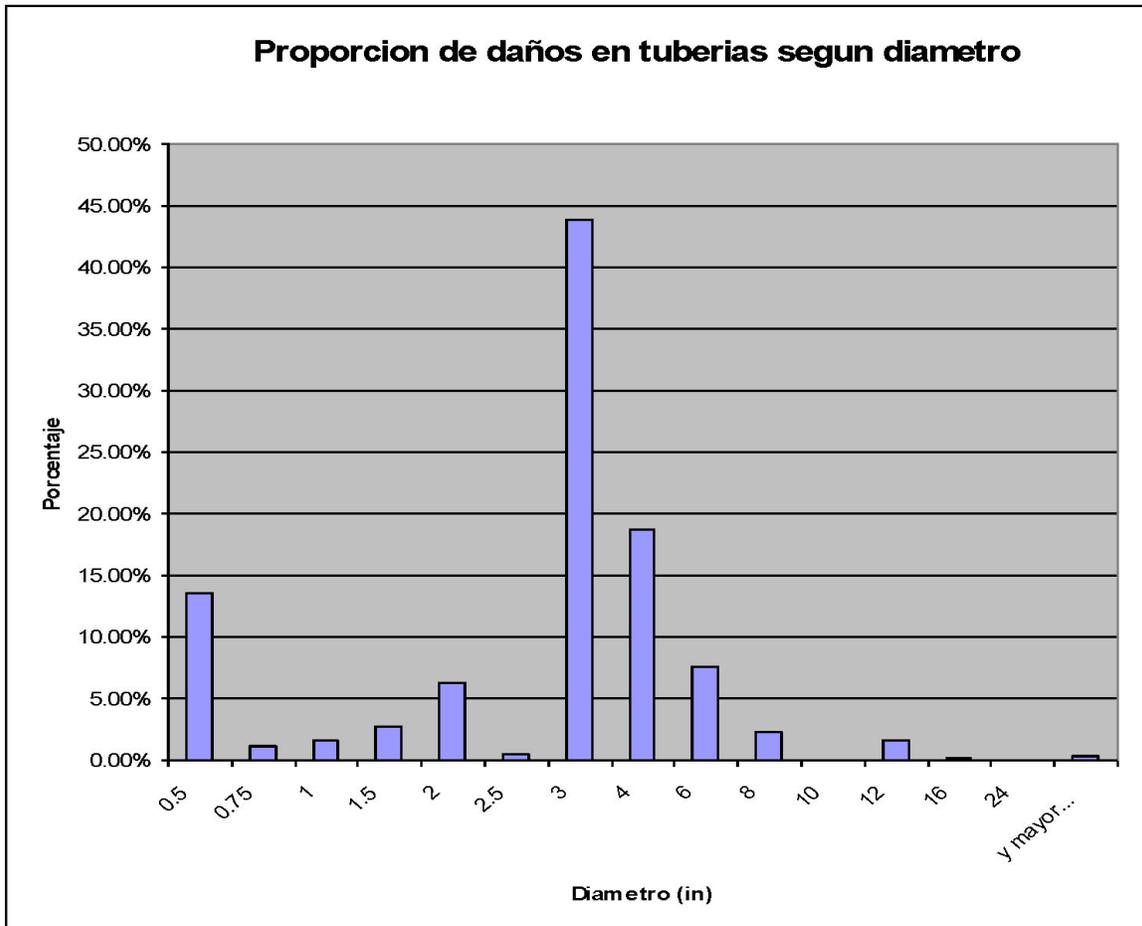
Diámetro (in)	Norte-2000		Centro Enero-Junio 1997		Centro Enero-Junio 1995	
	Cantidad	Pocentaje	Cantidad	Pocentaje	Cantidad	Pocentaje
0.5	1210	39.74%	8	0.67%	1	0.06%
0.75	285	9.36%	0	0.00%	1	0.06%
1			13	1.09%	13	0.82%
1.5			27	2.25%	47	2.96%
2			97	8.10%	122	7.68%
2.5	0	0.00%	6	0.50%	12	0.76%
3	657	21.58%	625	52.17%	921	57.96%
4	339	11.13%	287	23.96%	331	20.83%
6	272	8.93%	95	7.93%	90	5.66%
8	97	3.19%	19	1.59%	29	1.83%
10	2	0.07%	0	0.00%	0	0.00%
12	95	3.12%	16	1.34%	8	0.50%
16	1	0.03%	5	0.42%	2	0.13%
24			0	0.00%	0	0.00%
y mayor...	0	0.00%	0	0.00%	12	0.76%
Total	3045	100.00%	1198	100.00%	1589	100.00%

Tabla 6-1 Datos diámetro - cantidad de fallas de informes de mantenimiento E.A.A.B.

Porcentaje promedio	Diámetro (m)
13.49%	0.5
1.06%	0.75
1.67%	1
2.78%	1.5
6.21%	2
0.42%	2.5
43.90%	3
18.64%	4
7.51%	6
2.20%	8
0.02%	10
1.65%	12
0.19%	16
0.01%	24
0.25%	y mayor...
100%	



Tabla 6-2 Porcentaje de daño en tuberías según diámetro de informes de mantenimiento



E.A.A.B.

Figura 6-1 Grafica de porcentaje de daño en tuberías según diámetro de informes de mantenimiento E.A.A.B.

Además de la información anterior resulta importante la información referente a la cantidad de daños que ocurren por el tipo de material de los tubos y el tipo de falla que se presenta. Los materiales que en este estudio fueron motivo de análisis fueron:

- AC: Asbesto Cemento
- PVC: Policloruro de Vinilo
- HG: Hierro Galvanizado
- HF: Hierro Fundido
- HA: Hierro Acerado
- AP: American Pipe



En la Tabla 6-3 se puede observar la cantidad de fallas que se produjeron y el porcentaje en que estas ocurrieron para los diferentes materiales y tipos de falla

Material y Tipo de Falla	Norte-2000		Centro Enero-Junio 1997		Centro Enero-Junio 1995	
	Cantidad	Pocentaje	Cantidad	Pocentaje	Cantidad	Pocentaje
Tubo Partido AC	160	11.37%	132	11.21%	89	5.70%
Tubo Perforado AC	56	3.98%	26	2.21%	20	1.28%
Tubo Estallado AC	970	68.94%	841	71.39%	1199	76.76%
Tubo Desalojado AC	0	0.00%	2	0.17%	0	0.00%
Tubo Rajado AC	0	0.00%	1	0.08%	5	0.32%
Tubo Rajado PVC	136	9.67%	13	1.10%	25	1.60%
Tubo Desalojado PVC	50	3.55%	0	0.00%	2	0.13%
Tubo Perforado PVC	0	0.00%	17	1.44%	13	0.83%
Tubo Perforado en HG	20	1.42%	35	2.97%	162	10.37%
Tubo Desalojado en HG	0	0.00%	0	0.00%	3	0.19%
Tubo Desalojado en HA	0	0.00%	1	0.08%	0	0.00%
Tubo Perforado en HA	14	1.00%	20	1.70%	12	0.77%
Tubo Perforado en AP	1	0.07%		0.00%	0	0.00%
Tubo Partido HF	0	0.00%	2	0.17%	10	0.64%
Tubo Perforado HF	0	0.00%	86	7.30%	22	1.41%
Tubo Desalojado HF	0	0.00%	2	0.17%	0	0.00%

Tabla 6-3 Datos de tipo de material y tipo de falla – cantidad de fallas de informes de mantenimiento E.A.A.B.

En la Tabla 6-4 se aprecia la proporción en que ocurren estas fallas por tipo de material.

Porcentaje Promedio de falla	material
84.47%	AC
6.11%	PVC
4.99%	AC
1.18%	HA
0.02%	AP
3.23%	HF

Tabla 6-4 Porcentaje de daño en tuberías según material de informes de mantenimiento E.A.A.B.

En la Figura 6.2 se muestra la grafica de la Tabla 6-4 donde es posible apreciar que la mayor parte de las fallas en tuberías se presentan en las constituidas como material por Asbesto Cemento, siendo las de material American Pipe las que menos presentan fallas.



Figura 6-2 Grafica de porcentaje de daño en tuberías según tipo de material de informes de mantenimiento E.A.A.B.

### 6.3 ***Determinación de las distribuciones de Probabilidad***

El proceso de llevar a cabo la distribución de probabilidad de falla parte del estudio realizado por Sullivan [Sullivan, 1992]. En este estudio se obtienen las incidencias de las distintas variables a la probabilidad de falla a través de análisis de regresión estadística.



Estas variables y su incidencia son como se muestran en la Tabla 6.5 y gráficamente en la Figura 6.3

Edad – Diámetro - Longitud	69%
Suelo - Riesgo sísmico	18%
Corrosión	13%

Tabla 6.5 Variables que influyen en la probabilidad de falla y su incidencia en el cálculo

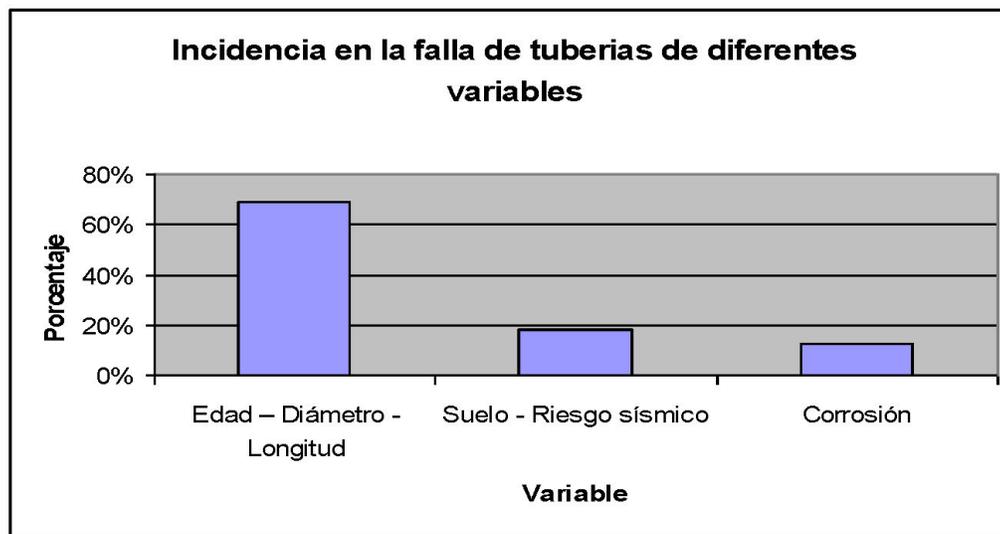


Figura 6.3 Variables que influyen en la probabilidad de falla y su incidencia en el cálculo

Aquí es posible observar que en mayor medida las fallas en tuberías se deben a causas relacionadas con la relación entre la edad, el diámetro y la longitud de la misma. Mientras que los otros factores que influyen en la probabilidad de falla presentan valores menores y muy cercanos. De un 18% para la relación Suelo - Riesgo Sísmico y de un 13% para la Corrosión.

La probabilidad de falla por el Suelo - Riesgo Sísmico se calcula a través de la fórmula:

$$Pr_{obSuelo}(t)_i = (100 - RS_i) \cdot 0.027 \cdot e^{A(t+g_i)}$$

$Pr_{obSuelo}(t)_i$  = Probabilidad de falla de un tubo 'i' de una red de acueducto en el tiempo 't'.



$RS_i$  =Riesgo Suelo - Riesgo Sísmico

$g_i$ = Edad del tubo

$A$  = Tasas de Crecimiento de las Roturas: 0.0142 (año<sup>-1</sup>)

La probabilidad de falla por la Corrosión se calcula a través de la formula:

$$Pr obCorrosion(t)_i = (100 - RC_i) \cdot 0.00298 \cdot e^{A(t+g_i)}$$

$Pr obCorrosion(t)_i$  = Probabilidad de falla de un tubo ‘i’ de una red de acueducto en el tiempo ‘t’.

$RC_i$  =Riesgo por corrosión de un tubo ‘i’.

$g_i$ = Edad del tubo

$A$  = Tasas de Crecimiento de las Roturas: 0.07908 (año<sup>-1</sup>)

La probabilidad de falla por la relación Edad – Diámetro – Longitud se calcula a través de la formula:

$$Pr obEae(t)_i = N(t_0)_i \cdot l \cdot e^{A_i(t+g_i)}$$

$Pr obEae(t)_i$  = Probabilidad de falla de un tubo ‘i’ de una red de acueducto en el tiempo ‘t’.

$N(t_0)_i$  = Tasas de Roturas (rotura/año/km)

$l$  =Longitud en Km. del tubo

$A_i$  = Tasas de Crecimiento de las Roturas (año<sup>-1</sup>)

Los factores de la Ecuación anterior se obtuvieron a partir de los datos del documento de Umbarilla [Umbarilla, 2002], los cuales se encuentran listados en la Tabla 6.6.

Parámetros de la ecuación para el calculo de la proabilidad Edad - Diametro - Longitud							
Material		AC	HA	HF	HG	PVC	AP
Tasas de Roturas (rotura/año/km)	$N(t_0)_i$	0.47401	0.445703	0.26901	0.445703	0.28258	0.004258
Tasas de Crecimiento de las Roturas (año <sup>-1</sup> )	$A_i$	0.01087	0.022173	0.01581	0.022173	0.01089	0.003089

Tabla 6.6 Parámetros de la ecuación para el calculo de la probabilidad Edad-Diámetro-Longitud.



La estimación de  $RS_i$  y  $RC_i$  fue llevada a cabo a través del procedimiento de Muhlbauer [Muhlbauer, 1992] y que es descrito a continuación:

### Calculo de $RS$

$B$ = Tipo de suelo	Permeabilidad	Riesgo
Barrera impermeable	0	5
Arcilla, roca no fracturada	$<10^{-7}$	4
Limo, arcilla limosa, arcilla plástica, piedra arenisca	$10^{-5} - 10^{-7}$	3
Arena fina, arena limosa, roca moderadamente fracturada	$10^{-3} - 10^{-5}$	2
Grava, arena, roca altamente fracturada	$>10^{-3}$	1

$A$  = Potencial de movimientos peligrosos del suelo

Alta	0
Media	2
Baja	6
Ninguna	10
Desconocido	0

A este valor se le suman las medidas de mitigación, sin que sobrepasen los 10 puntos  
Alta: Áreas donde el movimiento del suelo puede ser común o muy severo. Movimientos de falla regulares, deslizamientos de tierra, subsidencia, creep. Una tubería rígida en un área de movimientos de tierra menos frecuentes también debería ser clasificada aquí debido a la susceptibilidad incremental de daños en la tubería por movimientos de tierra. Fallas activas de terremotos en la vecindad de la tubería también debe incluirse en esta categoría.

Media: Movimientos de suelo dañinos son posibles pero raros o improbablemente afecten la tubería debido a su profundidad o posición. La topografía y el tipo de suelo son compatibles con movimientos de suelo, aunque ningún daño en esta área ha sido registrado.

Baja: Evidencia de movimientos de tierra es raramente vista. Movimientos y daños no son probables. No hay episodios de daños estructurales debido a movimientos de tierra. Todas las tuberías rígidas deben caer en esta categoría como mínimo, aun cuando los movimientos de tierra sean inusuales.

Ninguna: No hay evidencia de ninguna clase que indique un riesgo potencial de movimiento de suelo



C = Medidas de mitigación  
Monitoreo anual +1  
Monitoreo continuo +2  
Aliviamiento de cargas +3

$$\text{Total (\%)} = (A+B) * 100 / 15$$

Se saca el total de esta forma para dejarlo en porcentaje y así poder utilizar la fórmula de distribución de probabilidad para el suelo

### Calculo de RC

En el libro Pipeline Risk Management, el riesgo por la corrosión se encuentra medida de la siguiente manera. Se toman en cuenta 3 factores principalmente:

Corrosión Atmosférica	20%
Corrosión Interna	20%
Corrosión Metálica	60%
Total: 100%	

#### Corrosión Atmosférica

Facilidades (Se escoge la menor)	
Interfase Aire Agua	0
Cubierta	1
Material aislante	2
Soportes	2
Interfase Aire Tierra	3
Otros tipos de exposición	4
Ninguno	5
Detractor de múltiples ocurrencias	-1
Tipo Atmosférico	
Químico y marino	0
Químico y con alta humedad	2
Marino, pantano, costero	4
Alta humedad, alta temperatura	6
Químico y baja humedad	8
Baja humedad	10

Medidas preventivas (cada ítem se califica como bueno(3), regular(2), malo(1), ausente(0), Se suma la contribución de cada uno, se multiplica por 5 y se divide entre 12)

Revestimiento  
Aplicación  
Inspección  
Corrección de defectos



### Corrosión Interna

Corrosividad del producto transportado	
Altamente corrosivo	0
Medianamente corrosivo	3
Corrosivo solamente bajo condiciones especiales	7
No corrosivo	10
Protección interna	
Ninguna	0
Monitoreo interno	2
Inyección inhibitoria	4
Recubrimiento interno	5
Mediciones operacionales	3
Pigging	3

### Corrosión Metálica

Protección catódica 8

Condición del recubrimiento(cada ítem se califica como bueno(3), regular(2), malo(1), ausente(0). Se suma la contribución de cada uno, se multiplica por 10 y se divide entre 12

Revestimiento  
Aplicación  
Inspección  
Corrección de defectos

### Corrosividad del suelo

Baja resistividad(Alto potencial de corrosión)	
<500 ohm-cm de suelo	0
Media 500-10.000 ohm-cm	2
Alta >10.000 ohm-cm	4
No conocida	0
Situación especial	-1 a 4

### Edad del sistema

0-5 años de servicio	3
5-10	2
10-20	1
mas de 20	0

### Flujo de corriente a otros metales enterrados

Ninguno	4
10-10	2
11-25	1
>25	0

### Interferencia de AC

Ninguno a 150m del tubo	4
-------------------------	---



AC en las cercanías y se toman medidas preventivas 2  
 AC en las cercanías, ninguna medida preventiva 0  
 Efectos de la corrosión mecánica  
 %MAOP= Porcentaje de presión operacional máxima admisible  
 Entorno= Corrosividad del suelo + Corrosividad del producto transportado

%MAOP	0-20%	20%-50%	50%-75%	>75%
Entorno	Puntaje			
0	3	2	1	1
4	4	3	2	1
9	4	4	3	2
14	5	5	4	3

Tabla 6.7 Riesgo asociado a la corrosión por el MAOP

Tests dirigidos 6  
 Close interval survey 8-años desde la última inspección  
 Inspección interna 8-años desde la última inspección

## 6.4 *Análisis Técnico Económico*

El análisis técnico económico se realiza a través de los procedimientos de valoración de flujos de caja que son aplicables al caso que en este momento es materia de estudio:

### Valor Presente Neto

El método del valor presente neto es un enfoque de flujo de efectivo descontado a la tasa de la presupuestación de capital.

Con el método de valor presente neto se descuentan todos los flujos de efectivo al valor presente, utilizando la tasa de rendimiento requerida.

El valor presente neto de una propuesta de inversión es

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{A_t}{(1+r)^t}$$

donde  $r$  es la tasa de rendimiento requerida.



El valor presente neto también es conocido como calor actual neto.

El criterio de aceptación de una alternativa o flujo de caja sobre otra depende de cual obtenga un mayor valor presente neto.

### Costo Anual Equivalente

El Costo Anual Equivalente resulta útil para realizar la comparación proyectos que poseen diferente duración en forma equitativa, porque sino el proyecto de menor duración quedaría en desventaja relativa, puesto que no consideraría que la reinversión de los recursos generados pueden generar más fondos entre el período de su finalización y el término de la alternativa con la que esta siendo comparado.

El CAE es un criterio basado en el VPN, que consiste en establecer el valor de la renta que durante la vida útil del proyecto tiene un valor presente igual al VPN del proyecto, con la tasa de descuento de la empresa.

Se lo utiliza básicamente para llevar a cabo el análisis y la comparación de flujos que sólo tienen egresos, pero también se puede usar en flujos con solo ingresos, y en este caso, nos referiríamos a el como "Valor Anual Equivalente"(VAE):

$$CAE = VAE = VPN \cdot \left( \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^n}} \right)$$

### Valor Futuro Neto

El valor futuro neto implica en su concepto todos los supuestos del valor presente neto. Las decisiones de consumo e inversión son independientes entre sí manteniendo las decisiones a lo largo del tiempo de los flujos de caja y las tasas de interés futuras.

$$VFN = VPN \cdot (1+r)^n$$

### WACC

Para descontar los flujos de caja y llevar a cabo los análisis a través del VPN, CAE y VFN se hace necesario calcular el costo de capital.

El costo de capital o WACC (Weighted Average Cost of Capital) es la tasa de descuento que debe utilizarse para actualizar los flujos de fondos de un proyecto. Representa la rentabilidad mínima que el accionista le demandara al proyecto por



renunciar a un uso alternativo de esos recursos en proyectos con niveles de riesgos similares.

El término de costo ponderado del capital se refiere al promedio de los costos relativos de cada una de las fuentes de financiación del proyecto de inversión, y se calcula como:

$$WACC = K_d \cdot \frac{D}{D + P} + K_e \cdot \frac{P}{D + P}$$

$K_e$  = Costo de Capital propio

$K_d$  = Costo de la deuda

$D$  = Monto de la deuda

$P$  = Monto del Patrimonio

El WACC empleado fue calculado utilizando los datos de un mercado libre de riesgo para el sector de las empresas distribuidoras de agua, utilizando la estructura óptima de capital y llevando este resultado para su aplicación en Colombia a través del Riesgo País.<sup>1</sup>

#### DATOS PARA EL CALCULO DEL WACC

CAPM		
Rf	6.14%	Tasa libre de riesgo
Rm - Rf	7%	Prima de riesgo del mercado
B	1.44	Beta
Rc	1.55%	Riesgo país

Deuda		
Kd	8%	Costo de la deuda en dólares
Tx	35%	Tasa impositiva

Ks	16.22%
Ks+Riesgo país	17.77%
D	6.89%
E	12.92%
D/(D+E)	34.77%
WACC	12.39%

<sup>1</sup> Fuente: [www.bloomberg.com](http://www.bloomberg.com) Julio 2 de 2002



Tabla 6.8 Datos para el Calculo del WACC y resultado del mismo

En la Tabla 6.8 se muestran los datos empleados para determinar el WACC y el resultado obtenido del mismo, que fue de 12.39%.



## 6.5 Diagramas de Clases

### 6.5.1 Clase TTube

Unit	TTubeClass	
<b>Nombre de la Clase:</b> TTube	:	:
<b>Descripción de la Clase:</b>		
Ítem básico de una TRed		
La clase más simple de los objetos que pueden almacenarse en una Tred		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
Id	Almacena el valor del Id	
Longitud	Almacena el valor de Longitud	
Diametro	Almacena el valor de Diámetro	
DiametroNum	Almacena el valor del numero del diámetro de acuerdo a diámetros comerciales	
Edad	Almacena el valor de Edad	
Material	Almacena el valor de Material	
Suelo	Almacena el valor de Suelo	
Corrosion	Almacena el valor de la Corrosión	
Distrito	Almacena el valor de Distrito	
K	Almacena el valor de K	
A	Almacena el valor de A	



<b>CostoRp</b>	Almacena el valor del Costo de Reemplazo
<b>CostoRe</b>	Almacena el valor del Costo de Reparación
<b>ValorFuga</b>	Almacena el valor de la Fuga en Litros
<b>Fuga</b>	Almacena el valor de la Fuga en \$
<b>Falla</b>	Almacena un arreglo con los valores boolean de falla
<b>Probabilidades</b>	Almacena un arreglo con los valores de probabilidad
<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>Init</b>	Crea un ítem
<b>SetId(EId: String)</b>	Fija el valor de Id
<b>SetLongitud(ELongitud: String)</b>	Fija el valor de Longitud
<b>SetDiametroNum(EDiametro: String)</b>	Fija el valor de DiametroNum
<b>SetEdad(EEdad: String)</b>	Fija el valor de Edad
<b>SetMaterial(EMaterial: String)</b>	Fija el valor de Material
<b>SetSuelo(ESuelo: String)</b>	Fija el valor de Suelo
<b>SetCorrosion(ESuelo: String)</b>	Fija el valor de Corrosion
<b>SetK(EK: String)</b>	Fija el valor de K
<b>Seta(Ea: String)</b>	Fija el valor de A
<b>SetDistrito(EDistrito: String)</b>	Fija el valor de Distrito
<b>SetCostoRp(ECostoRp: String)</b>	Fija el valor de CostoRp
<b>SetCostoRe(ECostoRe: String)</b>	Fija el valor de CostoRe
<b>SetProbabilidades(EProbabilidades: array of Double; Escenarios: Integer)</b>	Fija el valor de Probabilidades
<b>SetFalla(EFalla: array of Boolean; Escenarios: Integer)</b>	Fija el valor de Falla
<b>SetDiametro(EDiametro: String)</b>	Fija el valor de Diametro
<b>SetValorFuga(EValorFuga: Double)</b>	Fija el valor de ValorFuga
<b>SetFuga(EFuga: Double)</b>	Fija el valor de Fuga
<b>SetUnaFallita(Escenarios1: Integer)</b>	Fija un false en



	Falla[Escenarios1]
<b>Destroy</b>	Libera Memoria
<b>GetMaterial(GMaterial:String): Boolean</b>	Retorna un Boolean si se encuentra o no un material
<b>GetLongitud(): String</b>	Obtener Longitud
<b>GetMaterial1(): String</b>	Obtener Material
<b>GetEdad(): String</b>	Obtener Edad
<b>GetDiametroNum(): String</b>	Obtener DiametroNum
<b>GetCorrosion(): String</b>	Obtener Corrosion
<b>GetSuelo(): String</b>	Obtener Suelo
<b>GetId(): String</b>	Obtener Id
<b>GetK(): String</b>	Obtener K
<b>Geta(): String</b>	Obtener A
<b>GetValorFuga(): Double</b>	Obtener ValorFuga
<b>GetFuga(): Double</b>	Obtener Fuga
<b>GetDiametro(): String</b>	Obtener Diametro
<b>GetDistrito(): String</b>	Obtener Distrito
<b>GetTuboFallo(Escenarios: Integer): Boolean</b>	Retorna valor de Falla[Escenarios]
<b>GetCostoRe(): String</b>	Obtener CostoRe
<b>GetCostoRp(): String</b>	Obtener CostoRp

## 6.5.2 Clase TRed

Unit	TRedClass	
<b>Nombre de la Clase:</b> Tred	:	:
<b>Descripción de la Clase:</b>		
Mantiene un Listado de Objetos cuya clase hereda de Ttubo		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
Tuboss	Lista de Ttubo	
Contador1	Cantidad de Ttubo de la lista	
<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>	



<b>InsertarTubo(IdTubo: String; Edad: String; Material: String; Distrito: String; Diam: String; Long: String; i: Integer; K: String; A: String; Suelo: String; Corrosion: String)</b>	Inserta propiedades de un objeto de Tuboss (Id, Edad, Material, Distrito, Diam, Long, K, a, Suelo, Corrosion)
<b>Ponera (A: String; Contador: Integer);</b>	Inserta propiedades de un objeto de Tuboss(a)
<b>PonerCostos (Material: String; CostoReemplazo: String; CostoReparacion: String; Contador: Integer);</b>	Inserta propiedades de un objeto de Tuboss(Material, CostoRe, CostoRp)
<b>SetProbabilidades (Contador: Integer; Escenarios: Integer)</b>	Calcula las probabilidad de falla de los objetos de Tuboss y las inserta
<b>SetFuga(Nodo: String; Id: String; Contador: Integer; Fuga: Double)</b>	Inserta el valor de ValorFuga de un objeto de Tuboss
<b>SetFuga2(Nodo: String; Id: String; Contador: Integer; Fuga: Double)</b>	Inserta el valor de Fuga de un objeto de Tuboss
<b>SetUnaFallita(Num: Integer; Escenarios: Integer)</b>	Inserta una falla en un escenario de un objeto de Tuboss
<b>CambiarEdad(EEdad: Integer; Num: Integer)</b>	Cambia el valor de la edad de un objeto de Tuboss
<b>SetContador(EContador: Integer)</b>	Inserta el valor de Contador1
<b>SacarK(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de K de un objeto de la lista
<b>Sacara(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de a de un objeto de la lista
<b>SacarValorFuga(Num: Integer): Double</b>	Obtiene el valor de ValorFuga de un objeto de la lista
<b>SacarDiametro(Num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de Diametro de un objeto de la lista
<b>SacarDistrito(Num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de Distrito de un objeto de la lista
<b>SacarTuboFallo(Num: Integer; escenarios: Integer): Boolean</b>	Obtiene el valor boolean de fallo de un objeto de la lista para un escenario determinado
<b>SacarCostoRe(Num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de CostoRe de un objeto de la lista



<b>SacarCostoRp(Num:Integer): String</b>	Obtiene el valor de CostoRp de un objeto de la lista
<b>SacarFuga(Num: Integer): Double</b>	Obtiene el valor de Fuga de un objeto de Tuboss
<b>SacarEdad(Num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de Edad de un objeto de la lista
<b>SacarSuelo(Num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de Suelo de un objeto de la lista
<b>SacarCorrosion(Num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de Corrosion de un objeto de la lista
<b>Compararid(Cid: String; Contador: Integer): Integer</b>	Retorna la posición en la lista de un valor de Id
<b>Sacarcontador(): Integer</b>	Obtiene el valor de Contador1
<b>Ini</b>	Crea Tuboss como una lista de 10000 Ttubo
<b>Destroy</b>	Libera memoria de objetos internos de la lista

### 6.5.3 Clase TPoli1

<b>Unit</b>	<b>TPoli</b>	
<b>Nombre de la Clase:</b> TPoli1	:	:
<b>Descripción de la Clase:</b>		
Ítem básico de una TPoli		
La clase más simple de los objetos que pueden almacenarse en una TPolíticas		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
<b>NoEscenarios</b>	Almacena el No. De escenarios a ser evaluados	
<b>Tio</b>	Almacena el valor de la tasa de interés de oportunidad	
<b>PorcentajeReem</b>	Almacena el valor del Porcentaje de reemplazo de tubos por distrito	



<b>CostoAgua</b>	Almacena el valor de el costo del agua expresado en \$/L
<b>FugaLimite</b>	Almacena el valor de la fuga limite admisible
<b>VPN</b>	Almacena el valor presente neto
<b>VFN</b>	Almacena el valor futuro neto
<b>CAE</b>	Almacena el valor del costo anual equivalente
<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>SetNoEscenarios(ENoEscenarios: String)</b>	Fija el valor de NoEscenarios
<b>SetTio(ETio: String)</b>	Fija el valor de Tio
<b>SetPorcentajeReem(EPorcentajeReem: String)</b>	Fija el valor del PorcentajeReem
<b>SetCostoAgua(ECostoAgua: String)</b>	Fija el valor de CostoAgua
<b>SetFugaLimite(EFugaLimite: String)</b>	Fija el valor de la FugaLimite
<b>SetVPN(EVPN: String)</b>	Fija el valor de VPN
<b>SetVFN(EVFN: String)</b>	Fija el valor de VFN
<b>SetCAE(ECAE: String)</b>	Fija el valor de CAE
<b>GetEscenarios(): String</b>	Obtener NoEscenarios
<b>GetCostoAgua(): String</b>	Obtener CostoAgua
<b>GetTio(): String</b>	Obtener Tio
<b>GetPorcentajeReem()</b>	Obtener PorcentajeReem
<b>GetFugaLimite()</b>	Obtener FugaLimite

## 6.5.4 Clase TPolíticas1

<b>Unit</b>	<b>TPolíticas</b>	
<b>Nombre de la Clase:</b>	:	:
<b>TPolíticas1</b>		
<b>Descripción de la Clase:</b>		
Mantiene un Listado de Objetos cuya clase hereda de TPoli		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
<b>Listica</b>	TLista de TPoli1	



<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>InsertarPolitica(NoEscenarios: String; Politica: String; Tio: String; PorcentajeReem: String; CostoAgua: String; FugaLimite: String)</b>	Inserta propiedades de un objeto de Listica (NoEscenarios, Tio, PorcentajeReem, CostoAgua, FugaLimite)
<b>InsertarPolitica2(VPN, VFN, CAE: String; PoliticaEmplear: Integer)</b>	Inserta propiedades de un objeto de Listica (VPN, VFN, CAE)
<b>SacarEscenarios(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de NoEscenarios de un objeto de Listica
<b>SacarCostoAgua(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de CostoAgua de un objeto de Listica
<b>SacarTio(num: Integer)</b>	Obtiene el valor de Tio de un objeto de Listica
<b>SacarPorcentajeReem(num: Integer)</b>	Obtiene el valor de PorcentajeReem de un objeto de Listica
<b>SacarFugaLimite(num: Integer)</b>	Obtiene el valor de FugaLimite de un objeto de Listica
<b>SacarVPN(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de VPN de un objeto de Listica
<b>SacarVFN(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de VFN de un objeto de Listica
<b>SacarCAE(num: Integer): String</b>	Obtiene el valor de CAE de un objeto de Listica
<b>Ini</b>	Crea Listica con una lista de 5 Tpoli
<b>Destroy</b>	Libera Memoria de objetos internos

## **6.6 Diagramas de Utilidades Desarrolladas**



## 6.6.1 Unit Utilidades

Unit	Utilidades	
<b>Nombre de la Clase:</b>	:	:
<b>Descripción de la Clase:</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>	
<b>CalcularSuelo(Suelo1: Double; i:Integer; Age1: Integer): Double</b>	Retorna la probabilidad de falla por efecto del suelo y el riesgo sísmico de un objeto de Tuboss	
<b>CalcularCorrosion(Corro1: Double; i: Integer; Age1: Integer): Double</b>	Retorna la probabilidad de falla por efecto de la corrosión de un objeto de Tuboss	
<b>CalcularEae(N: Double; A: Double; Dist: Double; Long1: Double;i:Integer ;Age1: Integer): Double</b>	Retorna la probabilidad de falla por efecto de la edad-diametro-longitud de un objeto de Tuboss	
<b>CalcularTotal(N: Double; A: Double; Dist: Double; Long1: Double;Suelo1: Double; Corro1: Double; i,Age1: Integer): Double</b>	Retorna la probabilidad total de falla de un objeto de Tuboss	
<b>AsignarDistToDiam(h: Integer): Double</b>	Retorna el valor de distribución de falla de acuerdo a DiametroNum	
<b>FallaTubo(Probability: Double): Boolean</b>	Retorna boolean si falla o no un tubo de acuerdo a su probabilidad de falla y un numero aleatorio de distribución uniforme	



## 6.6.2 Unit Utilidades2

Unit		Utilidades2	
<b>Nombre de la Clase:</b> Utilidades2	:	:	
<b>Descripción de la Clase:</b>			
<b>Propiedad</b>		<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
<b>Servicio o responsabilidad</b>		<b>Descripción</b>	
<b>CalcularFlujoCaja(PoliticaEmplear: Integer; MyRed1: TRed; MyPolitica1: TPolitic1; Contador: Integer)</b>		Calcula el flujo de caja	
<b>TotalFugas(MyRed1: TRed; MyPolitica1: TPolitic1; PoliticaEmplear: Integer; TioEfectivoDiario: Double; TioEfectivoHorario: Double; Escenarios1: Integer; i: Integer; j: Integer; EdadNueva: Integer): Extended</b>		Calcula la contribución de un objeto de Tuboss al flujo de caja de un escenario	
<b>DeterminarTubosDistritos(MyRed1: TRed; MyPolitica: TPolitic1; PoliticaEmplear: Integer; Contador: Integer)</b>		Determina ala cantidad de tubos fallados en cada distrito	
<b>PorcentajeTubosFallados(MyRed1: TRed; MyPolitica: TPolitic1; PoliticaEmplear: Integer; Escenarios1: Integer; Contador: Integer)</b>		Calcula el porcentaje de tubos fallados en cada distrito	



<b>CalcularFinancieras(PoliticaEmplear: Integer; MyPolitica1: TPolíticas1; FlujoCajaFugas: Array of Extended; escenarios1: Integer; TIO: Double): Extended</b>	Calcula el valor de VPN y llama a los procedimientos que calculan el VFN y CAE
<b>CalcularVFN(Escenarios1: Integer; VPN: Extended; TIO: Double): Extended</b>	Calcula el valor de VFN
<b>CalcularCAE(Escenarios1: Integer; VPN: Extended; TIO: Double): Extended</b>	Calcula el valor de CAE
<b>TenerenCuenta (DistritoPertenece: String; Y: Double): Boolean</b>	Determina si hay o no que tener en cuenta un tubo para reemplazo de acuerdo a los tubos que fallan en un distrito y el porcentaje de reemplazo
<b>ValorVPN (): Extended</b>	Retorna el valor de VPN
<b>ValorVFN (): Extended</b>	Retorna el valor de VFN
<b>ValorCAE (): Extended</b>	Retorna el valor de CAE

### 6.6.3 Unit TLeerClass

Unit	TLeerClass	
<b>Nombre de la Clase:</b>	:	:
<b>Descripción de la Clase:</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>	
<b>LeerYCalculoFuga</b>	Lee el archivo de extensión inp para determinar nodos iniciales y finales y calcula Fuga y ValorFuga para un objeto de Tuboss	



## 6.6.4 Unit LeerArchivoDatos

<b>Unit</b>	<b>LeerArchivoDatos</b>	
<b>Nombre de la Clase:</b>	:	:
<b>Descripción de la Clase:</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Descripción del modelaje, restricciones, información para diseño, suposiciones</b>	
<b>Servicio o responsabilidad</b>	<b>Descripción</b>	
<b>LeerDatos(MyRed:Tred; ArchivoDatos:string; NomArch1:String): Integer</b>	Lee del Archivo de Datos la información de Id, Material, Edad, Distrito, K, A, Suelo, Corrosión para un objeto de Tuboss. El archivo de datos debe ser un archivo de texto delimitado por tabulaciones	



## 6.7 Descripción del Algoritmo

### 6.7.1 Descripción General de Introducción de Datos

El usuario provee en primera instancia el archivo de la Red (Archivo de Epanet de extensión \*.inp), (Ver Figura 6.4). El usuario estima el Riesgo asociado al suelo y a la corrosión con la metodología explicada anteriormente. Luego de realizado esto provee la información de Id Material Edad Distrito K a Suelo Corrosión, de cada tubo, todo esto a través de un archivo de texto delimitado por tabulaciones. (Ver Figura 6.5)

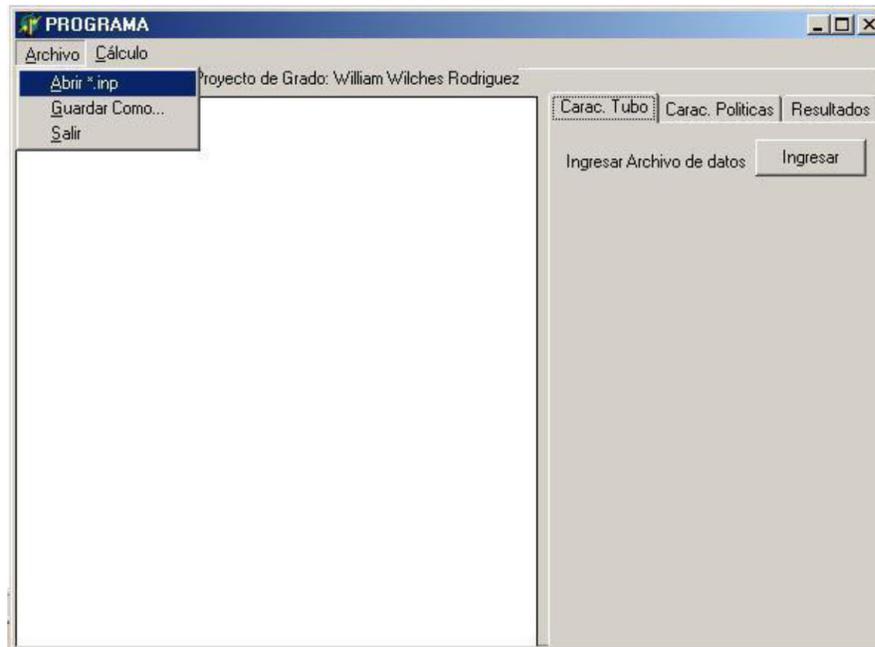


Figura 6.4 Pantalla de inicio

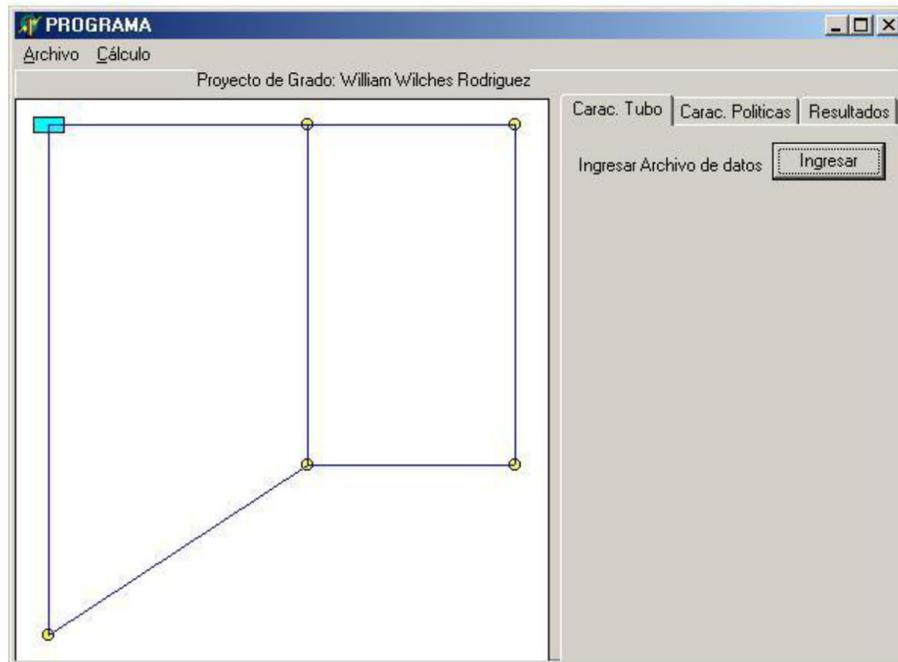


Figura 6.5 Pestaña de Carac. Tubo

Después de haber realizado esto se procede a introducir los datos sobre la política o políticas que vayan a ser evaluadas (Ver Figura 6.6) de acuerdo a las siguientes características:

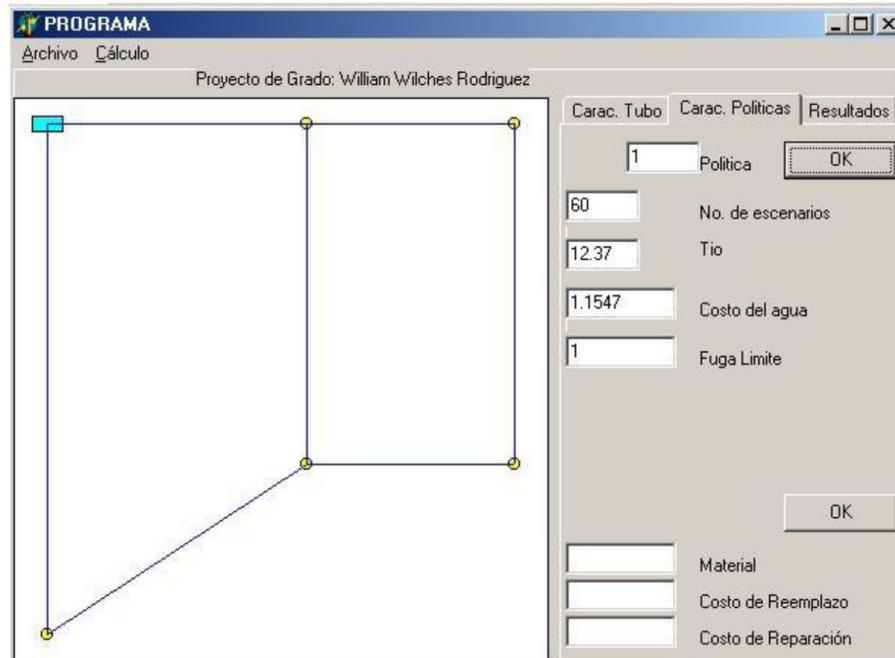


Figura 6.6 Pestaña de Carc. Políticas 1



Numero de escenarios: Este valor expresa el número de escenarios que serán evaluados para el futuro expresado en años.

Tio: Tasa de interés de oportunidad

Política:

Las políticas que se evaluarán serán las siguientes:

Política 1: Esta política consistirá en básicamente no llevar a cabo ninguna reparación ni reemplazo de los tubos. En cuyo caso las fugas que ocurran se dejarán tal como están.

Política 2: En esta política se implementará la reparación de todo tubo que falle, en el momento en que suceda la fuga. Por lo tanto en esta política se considera el costo del agua a partir del tiempo de reacción promedio.

Política 3: Para esta política se llevará a cabo el reemplazo de los tubos según el distrito al que pertenecen y según el porcentaje de tubos que fallen en tal distrito.

Política 4: En esta política se repararán los tubos que fallen siempre y cuando superen una cantidad de fuga, el cual se encuentra especificado como 'Fuga Limite'. Los tubos restantes que fallen pasarán a tenerse en cuenta para los reemplazos según el distrito al que pertenecen y según el porcentaje de tubos que fallen en tal distrito.

Política 5: Para esta política se implementará la reparación de todo tubo que falle, en el momento en que suceda la fuga. Si algún tubo alcanza o supera los 50 años de vida, ese tubo se toma en cuenta para llevar a cabo reemplazo, teniendo presente que el porcentaje de tubos que fallen en cada distrito sea mayor que el valor introducido por el osario como Porcentaje de Reemplazo.

% de Reemplazo: Expresa el porcentaje de los tubos que necesitan fallar en un distrito para que estos sean reemplazados según se empleen las políticas 3, 4 o 5

Costo del agua: Expresa el costo del agua por L.

Fuga Limite: Cantidad de fugas admisibles para un tubo, la cual es utilizada en la política 4.

Luego de ingresadas la política o políticas se realiza la introducción de los datos de Costos de Reemplazo y de Reparación según el tipo de material, tal como se aprecia en la parte inferior derecha de la Figura 6.7. (Ver Figura 6.7)

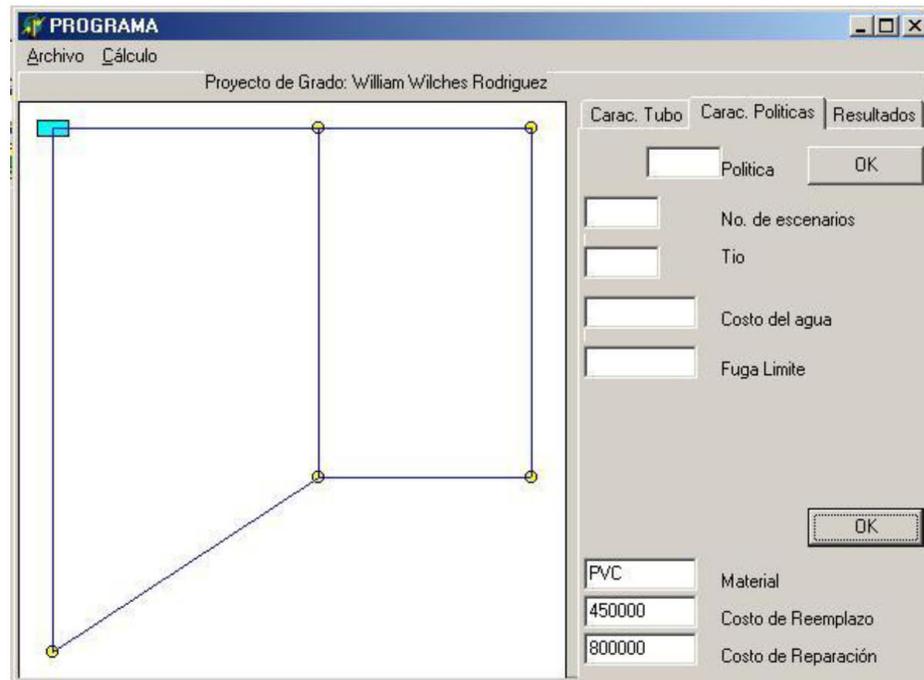


Figura 6.7 Pestaña de Carc. Políticas 2

Material: Tipo de material del que esta hecho la tubería que se tendrá en cuenta para especificar su costo de reparación y reemplazo. Los materiales son dados según los siguientes datos de entrada, los cuales deben ser provistos usando su abreviatura y escribiéndoles con caracteres en mayúscula.

- AC: Asbesto Cemento
- PVC: Policloruro de Vinilo
- HG: Hierro Galvanizado
- HF: Hierro Fundido
- HA: Hierro Acerado
- AP: American Pipe

Costo de Reparación: este es el costo de reparación es un costo por metro lineal de tubería según el material de la misma.

Costo de Reemplazo: este es el costo de reemplazo por metro lineal de tubería según el material de la misma.

Finalmente, como se observa en la Figura 6.8 se introduce la política que va a ser evaluada y de hace clic sobre ejecutar para que se realice el proceso de calculo del VPN, VFN y CAE que luego serán mostrados en pantalla.

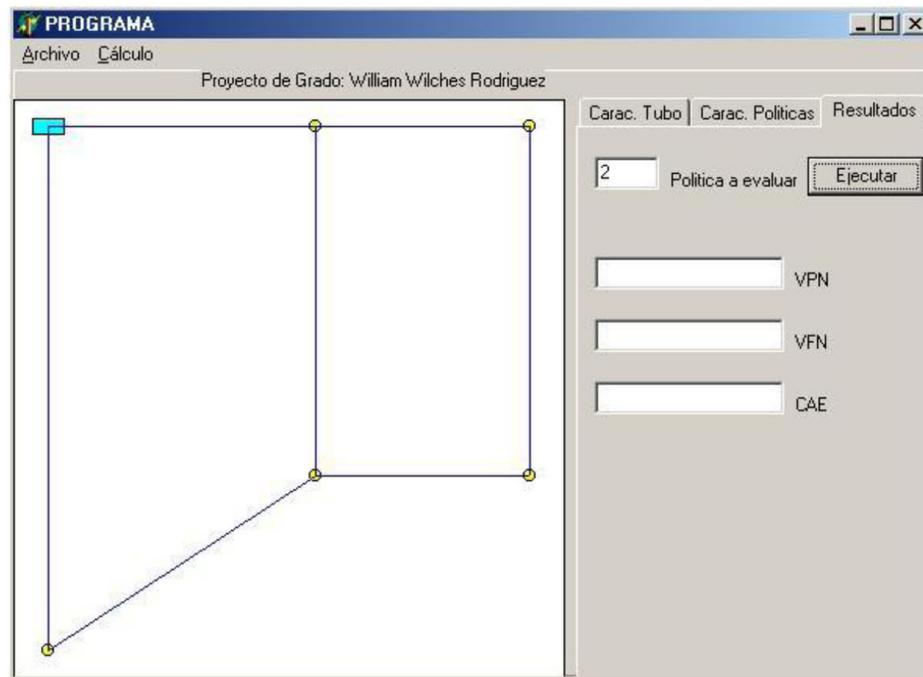


Figura 6.7 Pestaña de Resultados

## 6.7.2 Descripción general del proceso

Luego de introducidos los datos anteriores y de inicializarse variables y crear clases se realiza el proceso del programa.

Se obtiene la cantidad de escenarios asociados con la Política que se va a evaluar con el procedimiento SacarEscenarios de la Clase TPolíticas1.

Se obtiene la cantidad de objetos de la Lista Tuboss en la clase TRed.

Se calcula la cantidad de la fuga tanto en unidades monetarias como volumétricas en el procedimiento LeerYCalculoFuga en la unidad TLeerClass.

Se calcula la probabilidad de falla y si este falla o no para cada escenario de cada tubo con el procedimiento SetProbabilidades de la clase TRed. El procedimiento llama a funciones de la clase Utilidades para calcular la probabilidad de falla de acuerdo a las variables implicadas en el proceso, como lo son; diámetro, longitud, edad, material suelo, corrosión y si el tubo falla o no en cada escenario.



Se calcula el flujo de caja de acuerdo a las características particulares de cada Política con el procedimiento CalcularFlujoCaja, el cual pertenece a la unidad Utilidades2. Teniendo el flujo de caja se procede a calcular el Valor Presente Neto, el Valor Futuro Neto y el Costo Anual Equivalente utilizando funciones de la misma unidad Utilidades2.

Luego de calculados estos datos son mostrados en pantalla en el Edit correspondiente a VPN, VFN y CAE respectivamente.



## Capítulo 7 Pruebas de Software

Se realizaron pruebas de software de la Red del sector 8 del acueducto de Bogotá. Sobre esta Red se realizó un análisis de sensibilidad de las variables RiesgoSuelo, RiesgoCorrosion, K y A. Para su realización se llevaron a cabo 5000 simulaciones para cada Política.

### Características Generales de la Red Sector 8 Acueducto de Bogotá

Numero de tubos	4008
Numero de nodos	3450
Numero de tanques	0
Numero de bombas	0
Numero de válvulas	0
Unidades de caudal	LPS
Formula perdida de cabeza	D-W
Numero de reservorios	1

### VPN

A continuación se muestra el resumen estadístico del Valor Presente Neto que dieron como resultado para cada una de las Políticas

	VPN(1)	VPN(2)	VPN(3)	VPN(4)	VPN(5)
	Politica 1	Politica 2	Politica 3	Politica 4	Politica 5
Media	-40095897563	-38305212098	-39592560379	-37706017994	-36360170068
Mediana	-36358819335	-35924619256	-37931546136	-34789160787	-33334516414
Desviación estándar	82651218.15	16481602556	8358439929	14362270593	24078529005
Curtosis	-0.423980949	0.106560134	0.100685776	-0.491863228	-0.751684173
Coefficiente de asimetría	-0.02175866	-0.827701573	-0.824423188	-0.434456255	-0.655683724

Tabla 7.1 Resumen estadístico del VPN para cada política

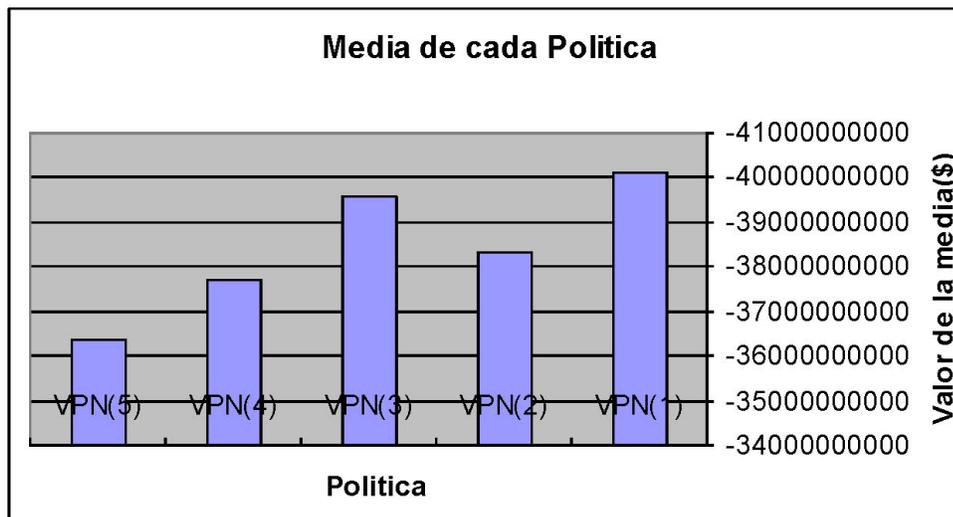


Figura 7.1 Media del VPN de cada política

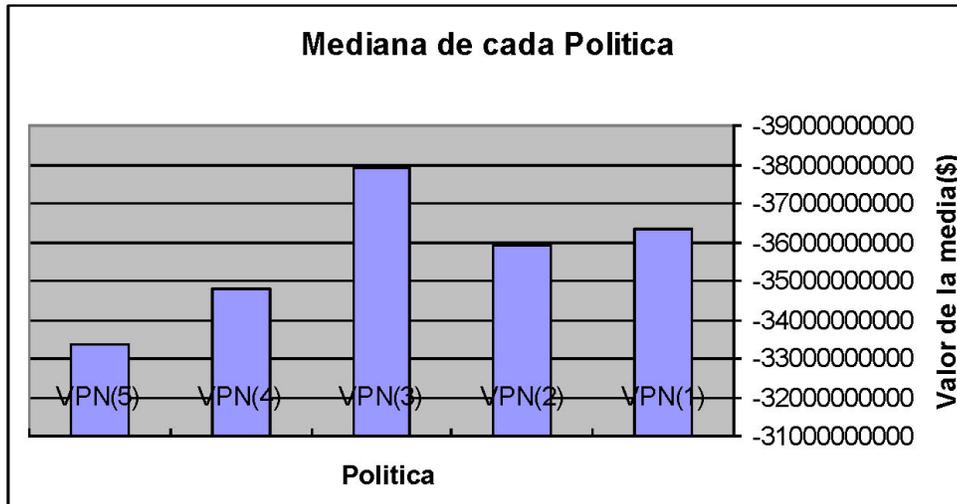


Figura 7.2 Mediana del VPN de cada política

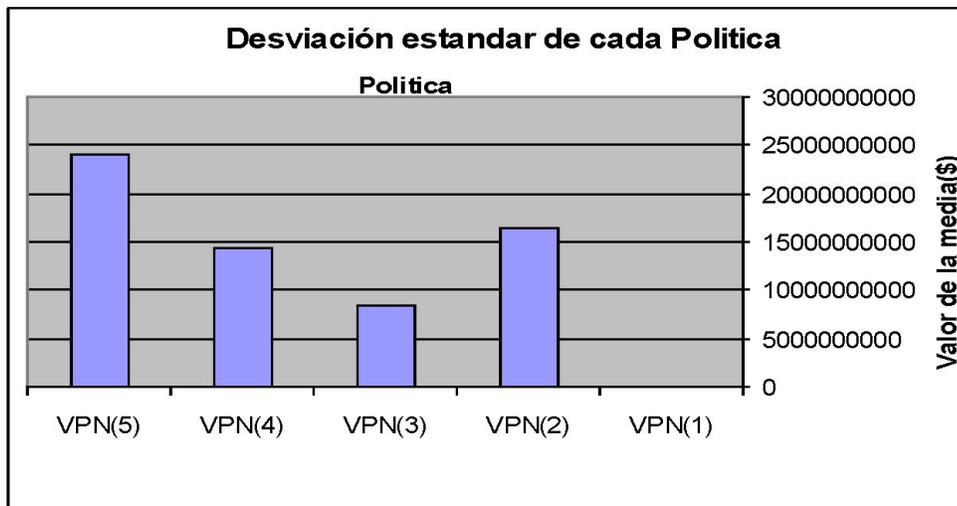


Figura 7.3 Desviación estándar del VPN de cada política

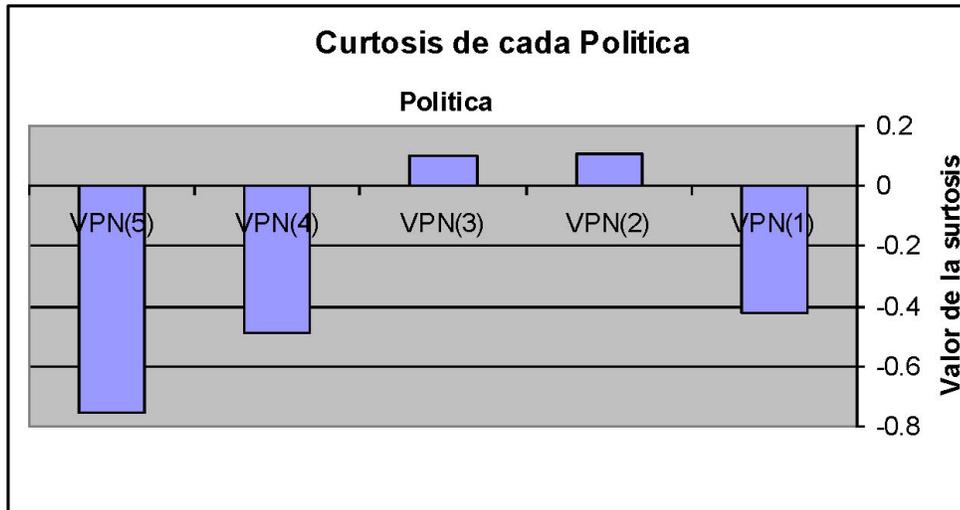


Figura 7.4 Curtosis del VPN de cada política

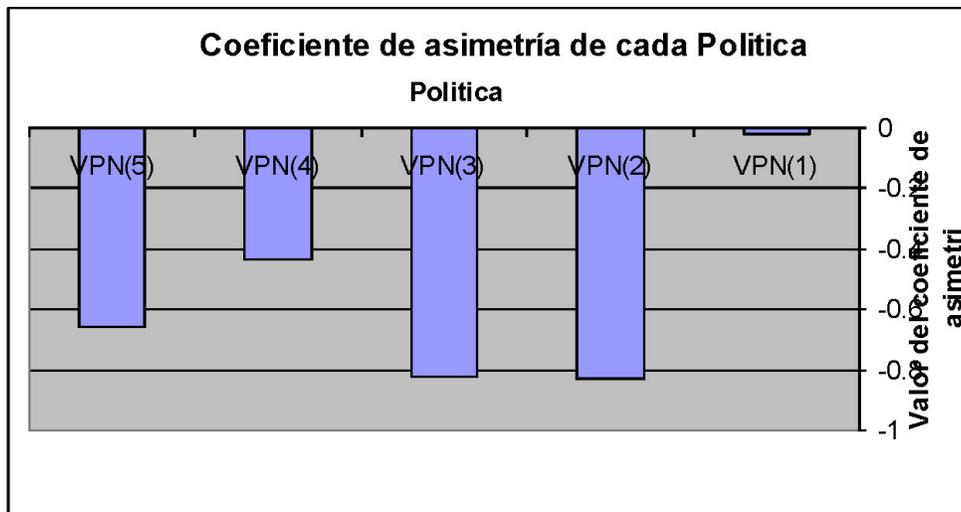


Figura 7.5 Coeficiente de asimetría del VPN de cada política



La política 5 es la que presenta un valor medio más adecuado, seguida de la política 4, después por la Política2, y por ultimo las Políticas 3 y 1. (Ver Figura 7.1)

Las medianas en cada una de las Políticas muestran una correspondencia con sus valores medios. Las Políticas que presentan mayores medianas son a su vez las que muestran valores medios mayores. (Ver Figura 7.1 y Figura 7.2)

La desviación estándar de las Políticas es mayor en la política 1, seguida luego por la política 2, después por la Política3 y por ultimo por la Política1. (Ver Figura 7.3)

La Política 5 aunque es la que presenta una media más adecuada, lo que supondría su mayor conveniencia, no lo es tanto cuando se analiza junto con su desviación estándar que es la más alta de todas y que se equipara en orden de magnitud a la media. Las Políticas 2 y 4 también presentan una desviación estándar del mismo orden de magnitud que su respectiva media. Y por otro lado las Políticas 3 y 1 presentan una desviación estándar de uno y dos ordenes de magnitud menores.

Los datos de Valor Presente Neto para las distintas Políticas muestran un valor de curtosis negativo para las Políticas 1, 4 y 5 lo que indica que estas políticas poseen con respecto a la distribución normal una distribución relativamente plana. Mientras que para las Políticas 2 y 3 la curtosis positiva indica una distribución relativamente elevada con respecto a la distribución de probabilidad normal. (Ver Figura 7.4)

Los coeficientes de asimetría de las políticas son todos negativos, lo cual indica una distribución unilateral con respecto a su media que se extiende hacia valores más negativos. (Ver Figura 7.5)

#### VARIABLES ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A Continuación se muestran los resultados arrojados por las variables implicadas en el análisis de sensibilidad. La realización de las graficas se realizó a través del programa Surfer utilizando una interpolación de datos suavizada empleando el método de Kriging.



Riesgo Corrosión – a - VPN

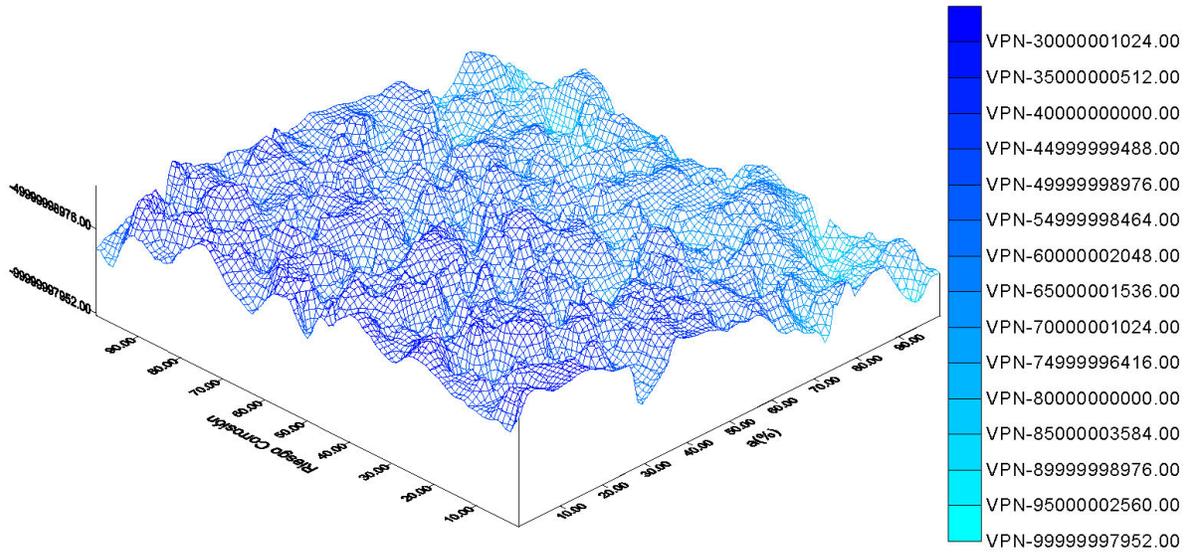


Figura 7.6 Riesgo Corrosión - a - VPN Política1

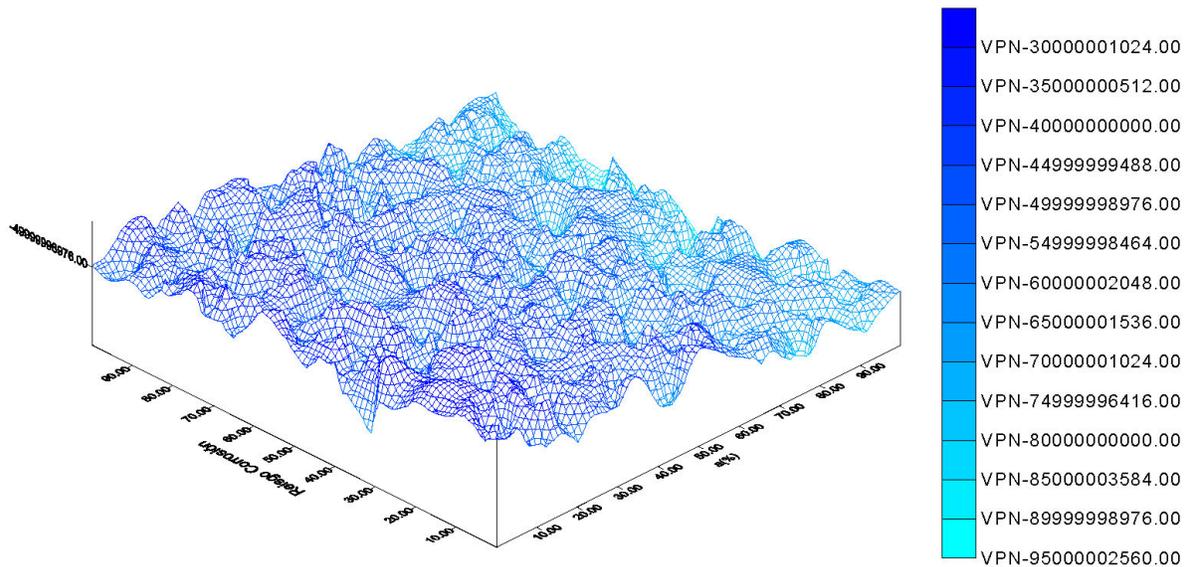


Figura 7.7 Riesgo Corrosión - a - VPN Política2

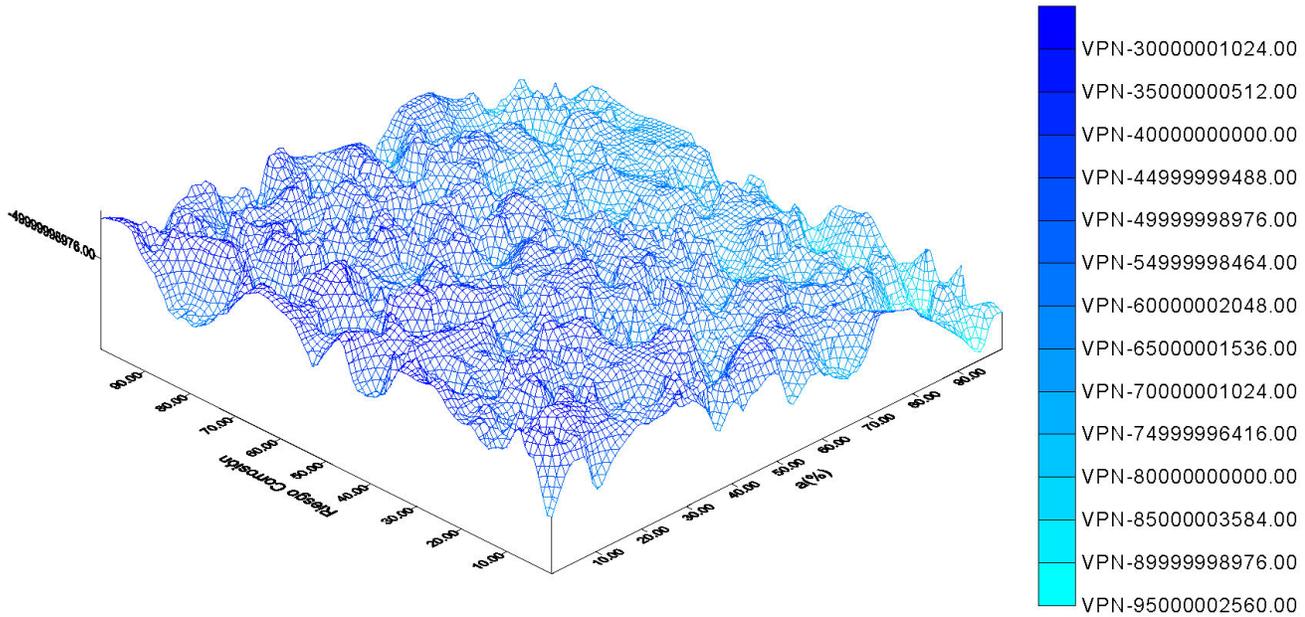


Figura 7.8 Riesgo Corrosión - a - VPN Política3

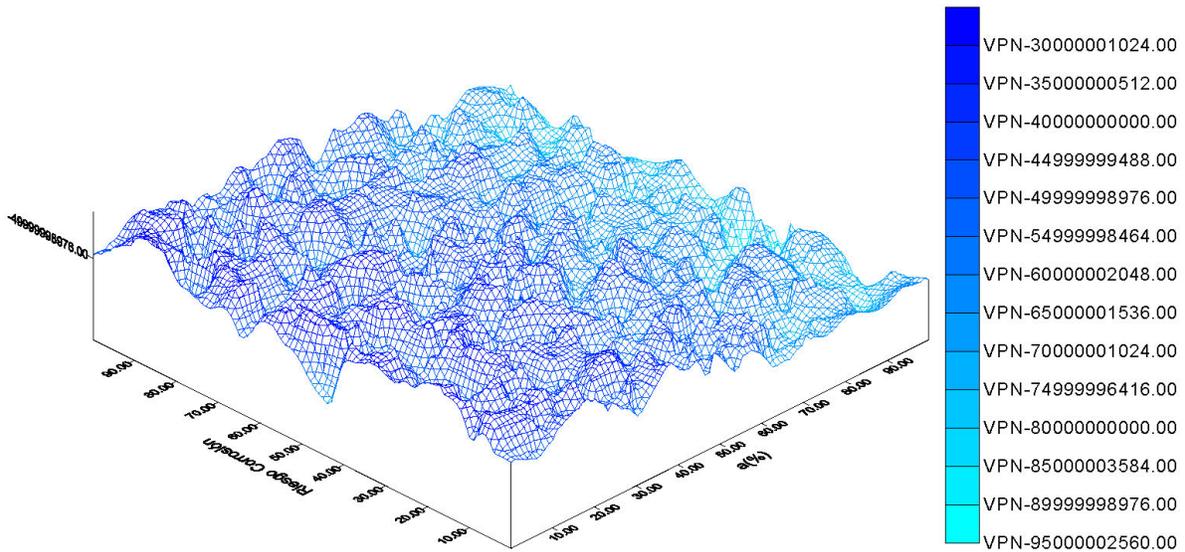


Figura 7.9 Riesgo Corrosión - a - VPN Política4

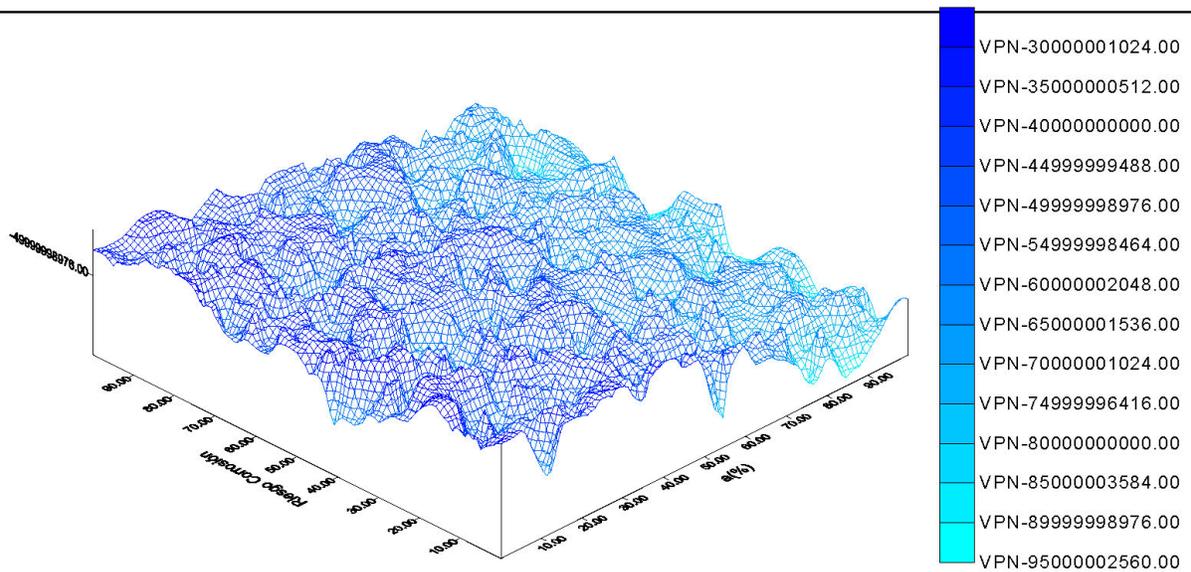


Figura 7.9 Riesgo Corrosión - a - VPN Política15

Riesgo Suelo – a - VPN

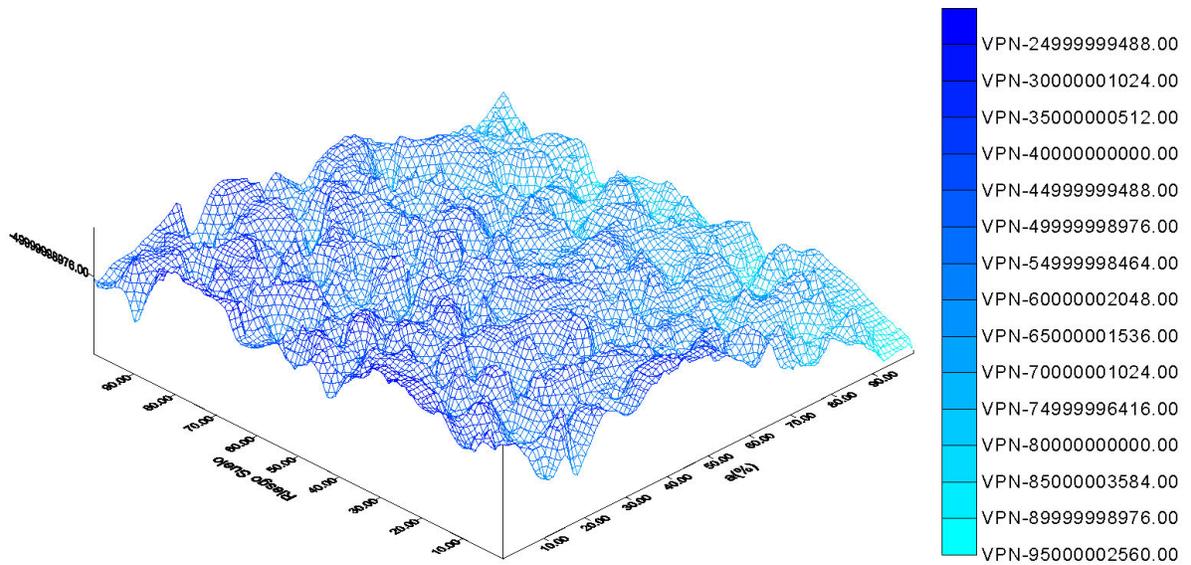


Figura 7.10 Riesgo Suelo - a - VPN Política1

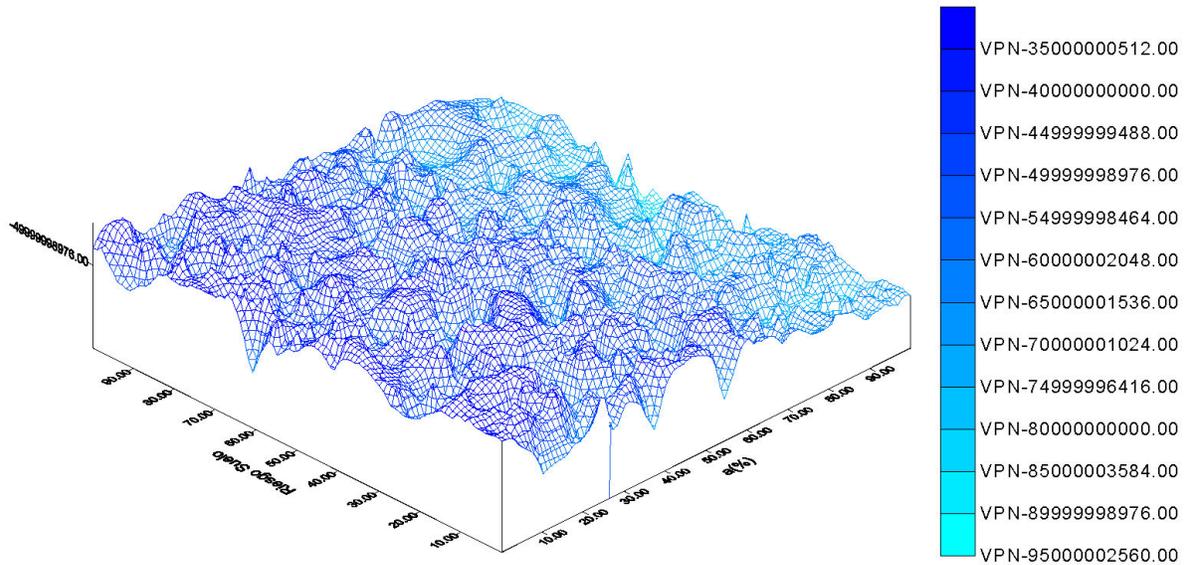


Figura 7.11 Riesgo Suelo - a - VPN Política12

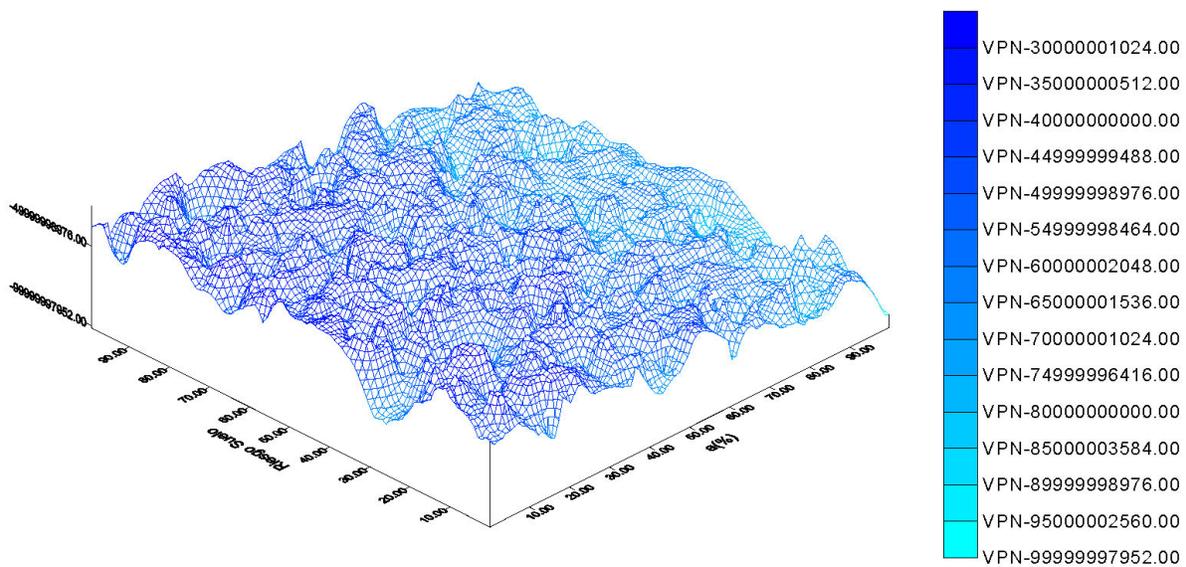


Figura 7.12 Riesgo Suelo - a - VPN Política13

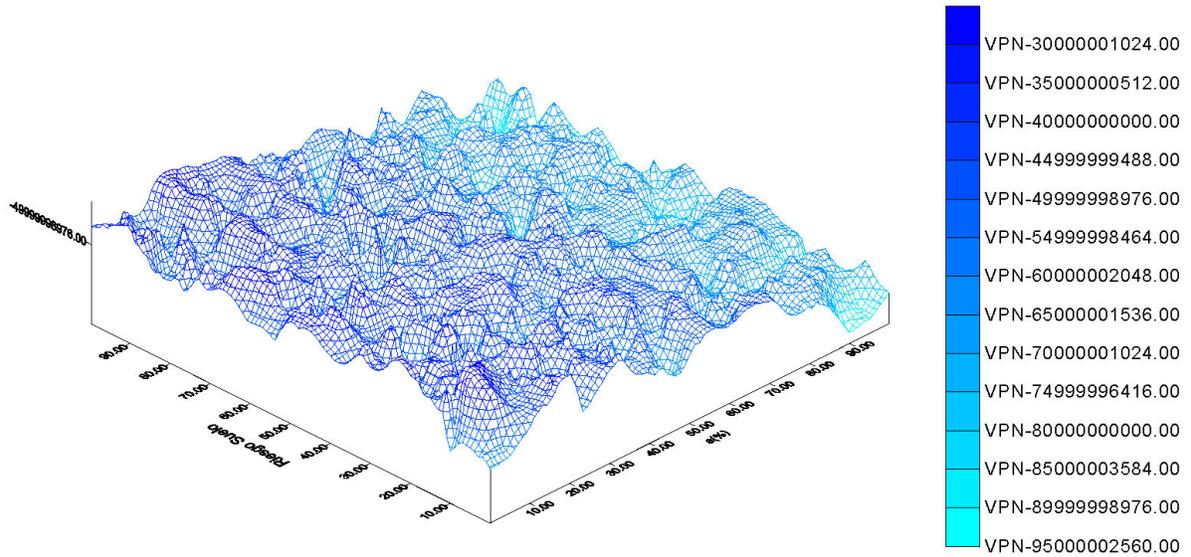


Figura 7.13 Riesgo Suelo - a - VPN Política4

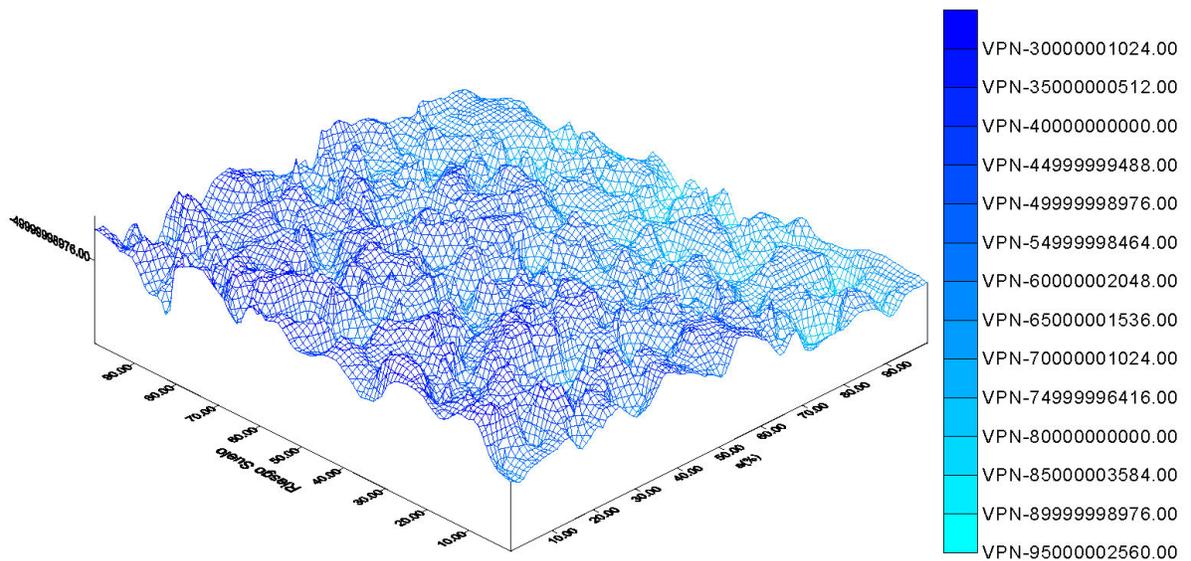


Figura 7.14 Riesgo Suelo - a - VPN Política5



Riesgo Corrosión – K - VPN

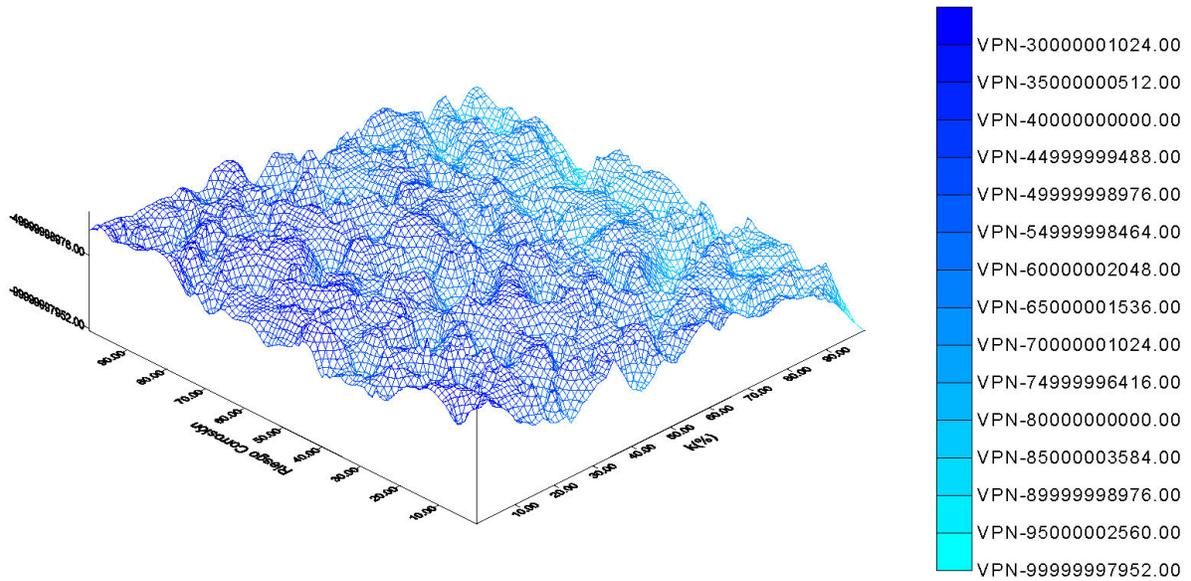


Figura 7.15 Riesgo Corrosión - K – VPN Política1

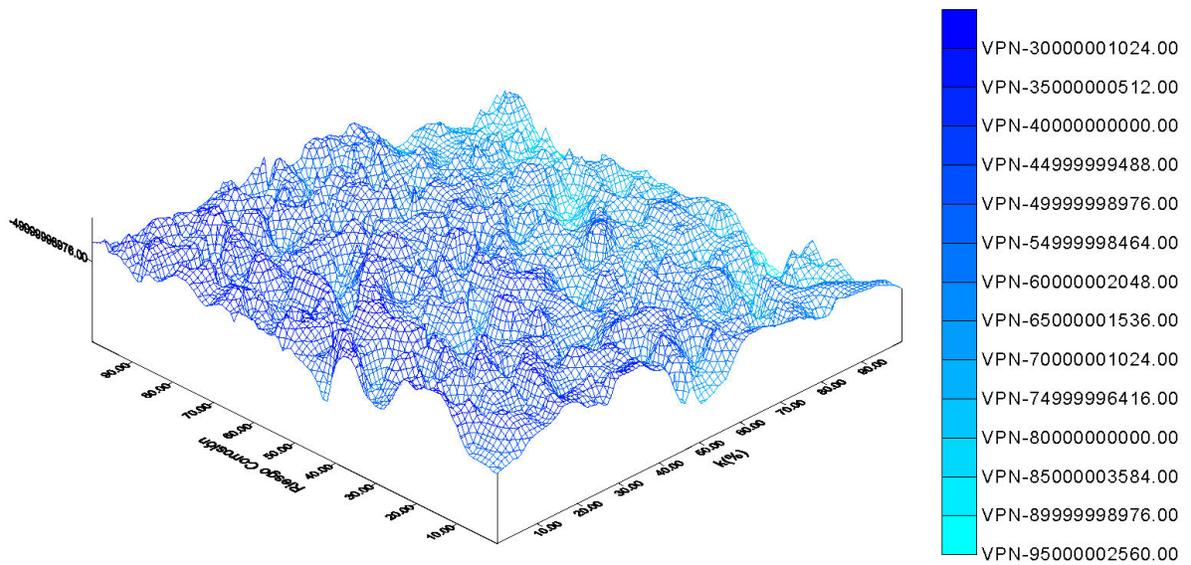


Figura 7.16 Riesgo Corrosión - K - VPN Política2

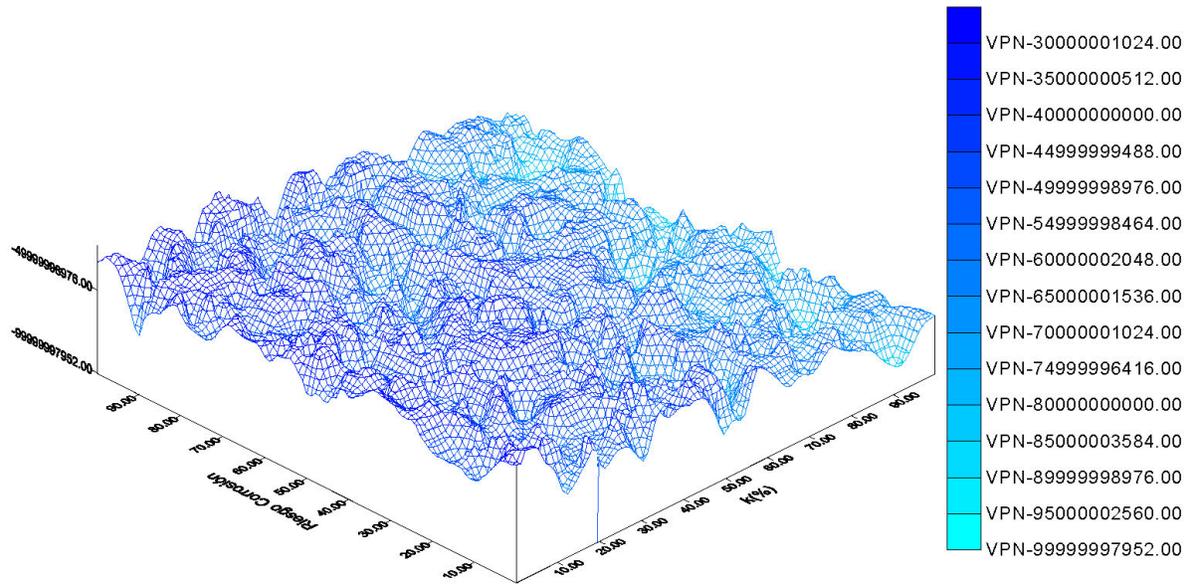


Figura 7.17 Riesgo Corrosión - K - VPN Política3

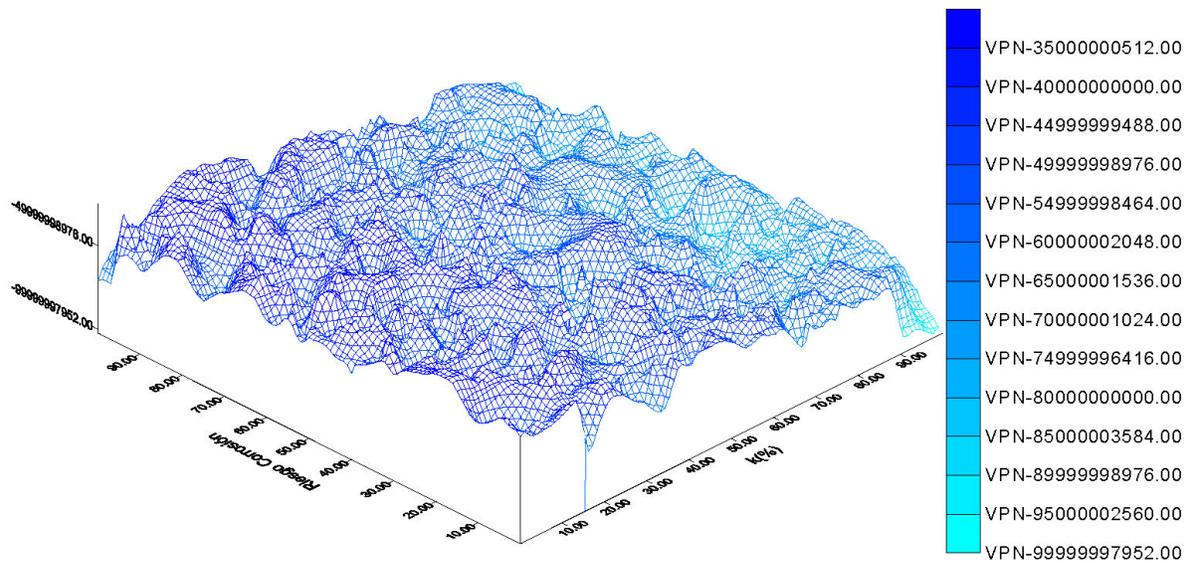


Figura 7.18 Riesgo Corrosión - K - VPN Política4

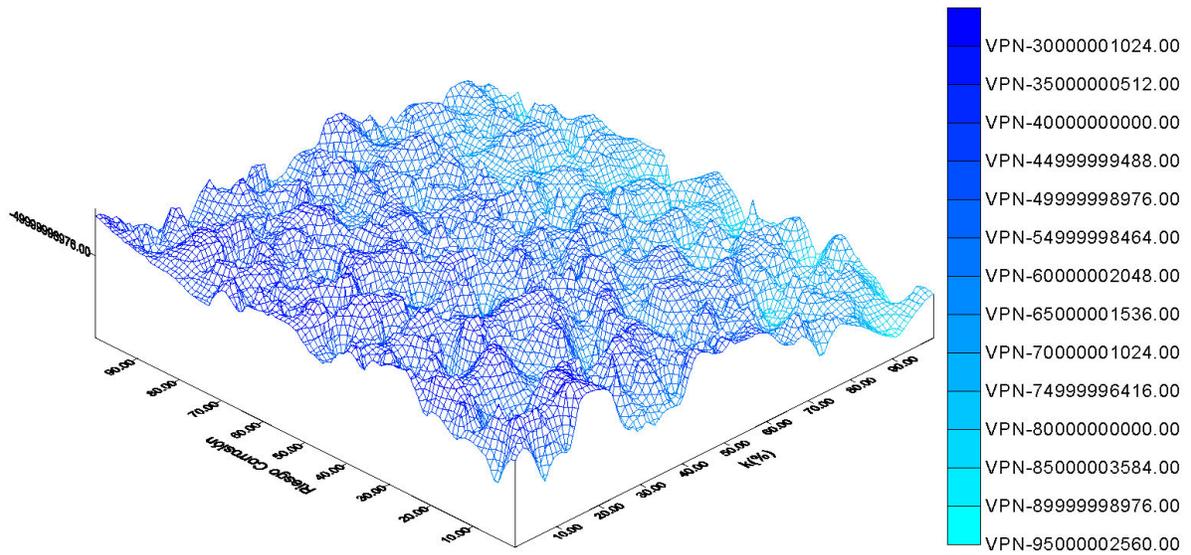


Figura 7.19 Riesgo Corrosión - K - VPN Política5

Riesgo Suelo – K – VPN

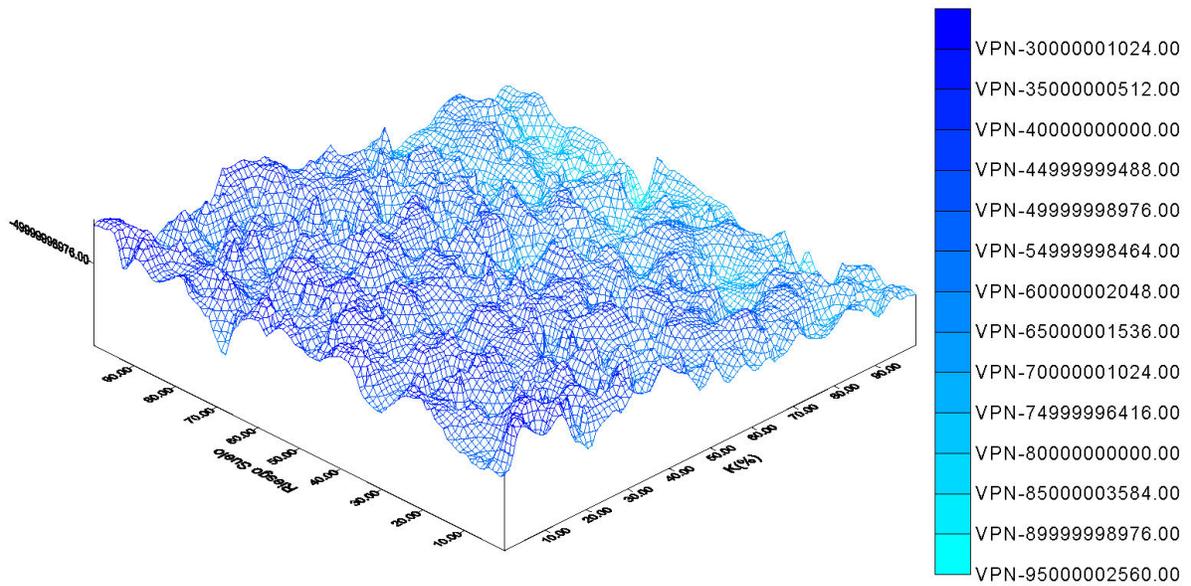


Figura 7.20 Riesgo Suelo - K - VPN Política1

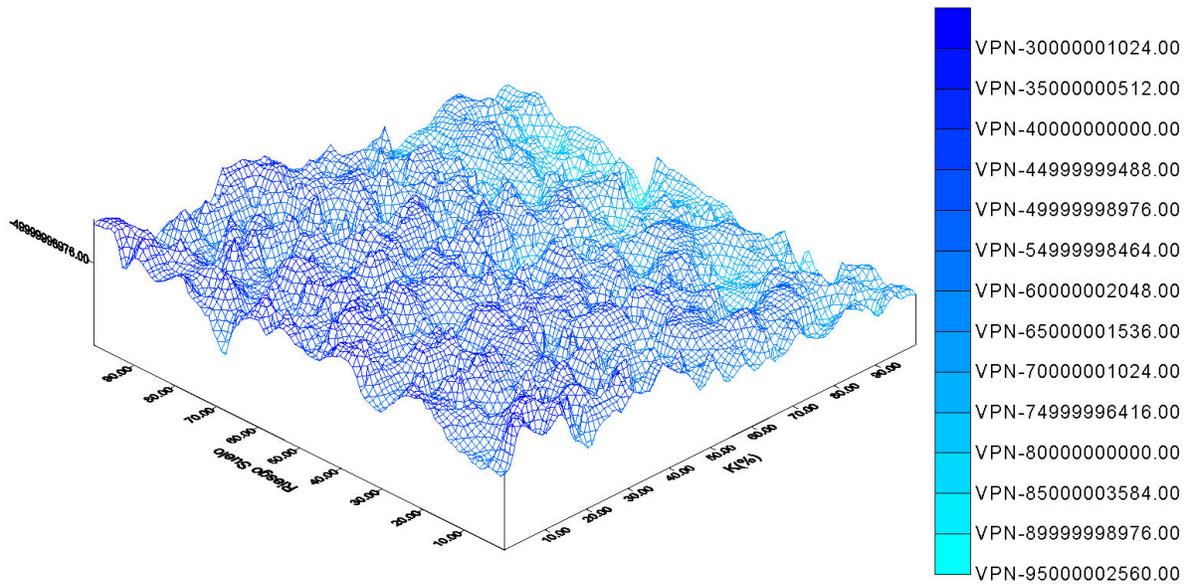


Figura 7.21 Riesgo Suelo - K - VPN Política2

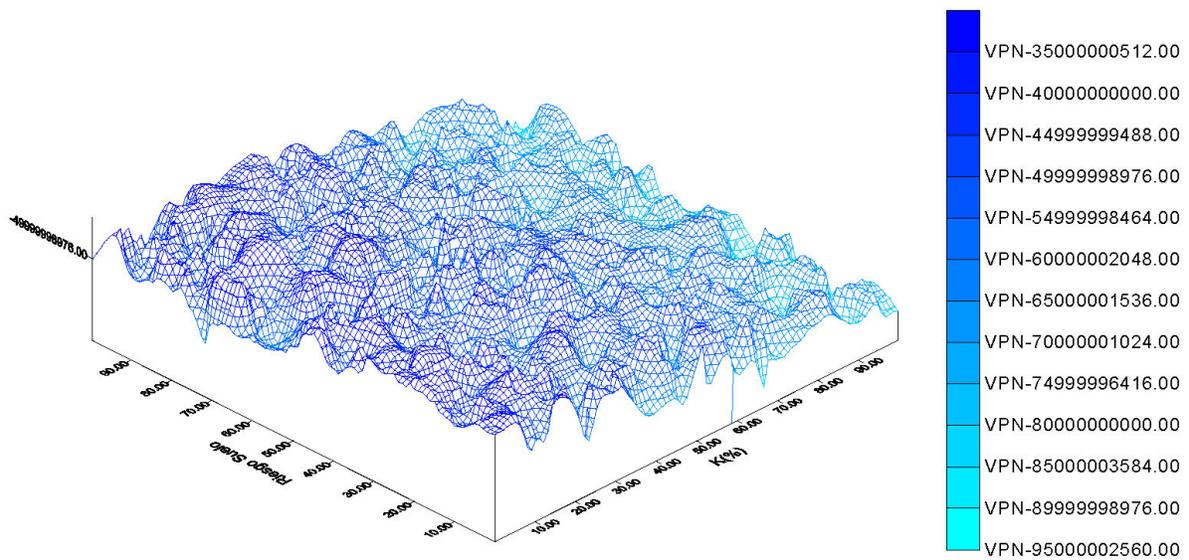


Figura 7.22 Riesgo Suelo – K – VPN Política3

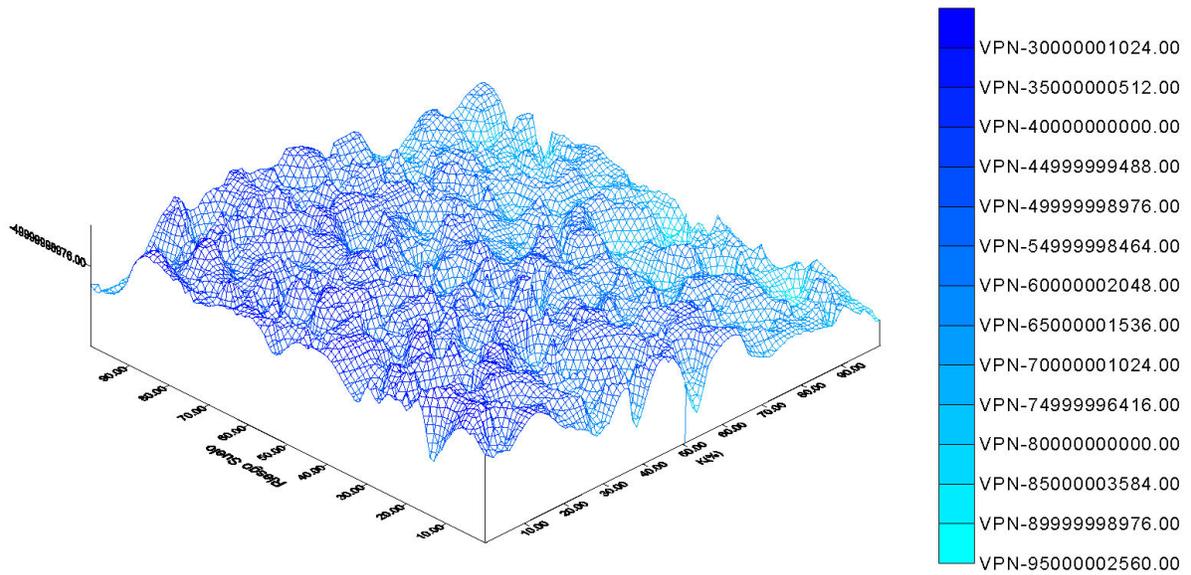


Figura 7.23 Riesgo Suelo – K – VPN Política4

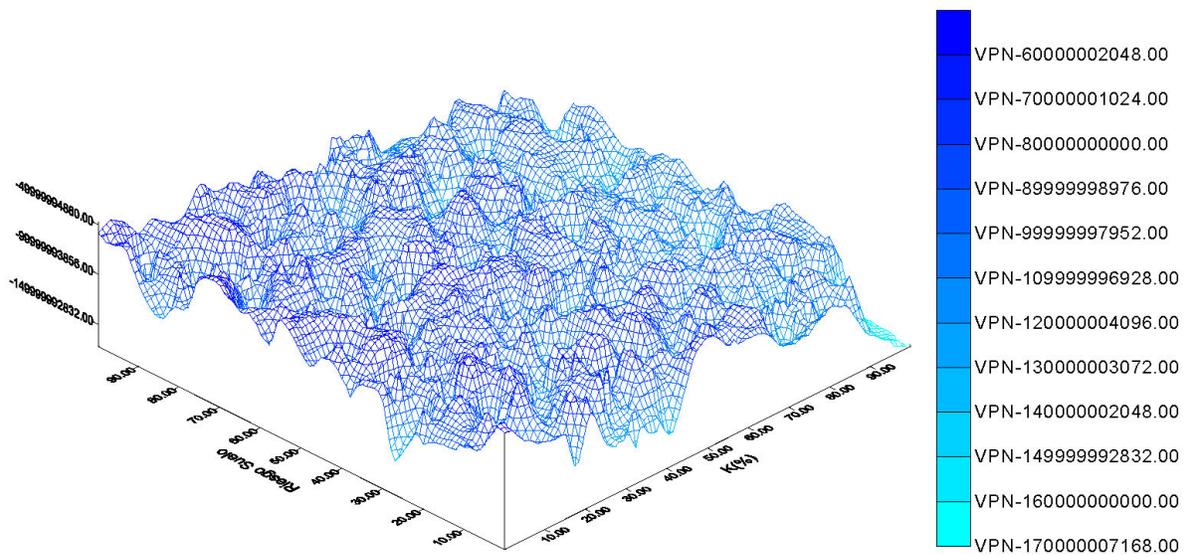


Figura 7.24 Riesgo Suelo – K – VPN Política5



a – K - VPN

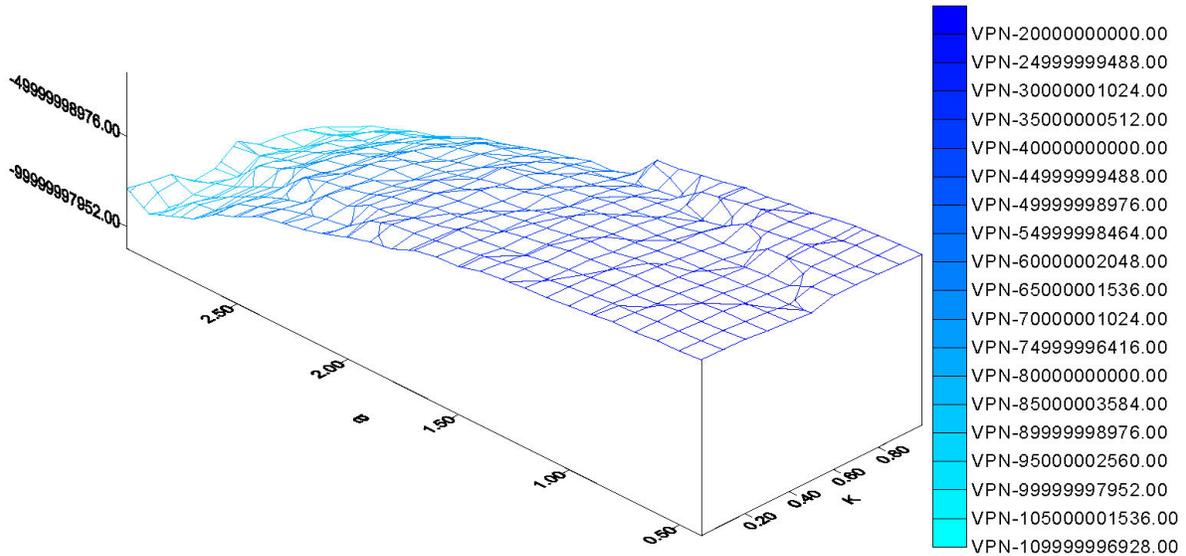


Figura 7.25 a – k – VPN Politica1

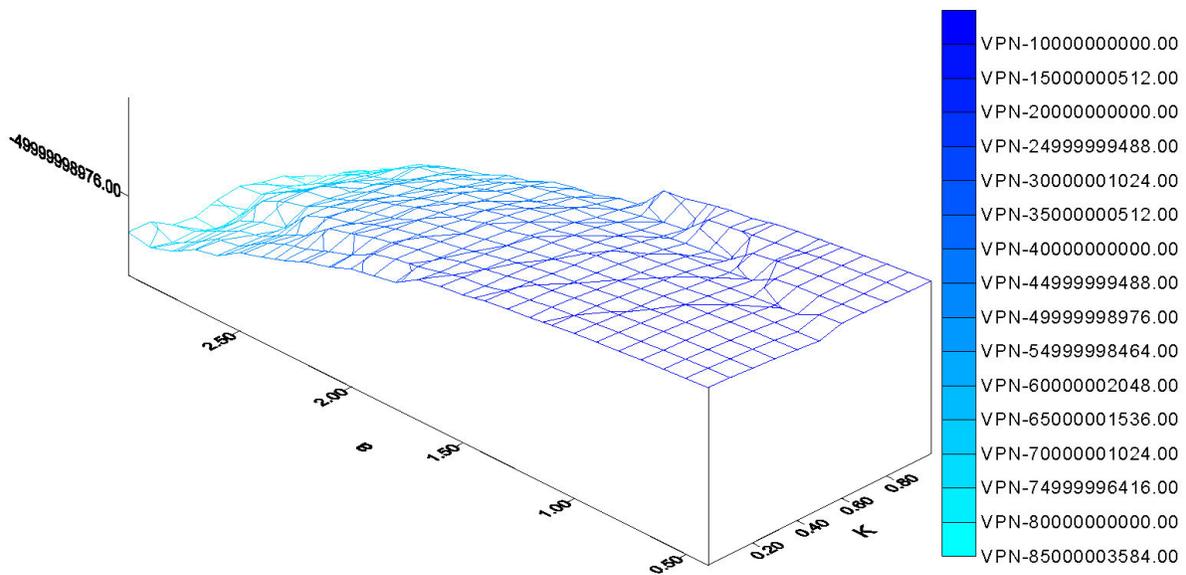


Figura 7.26 a – k – VPN Politica2

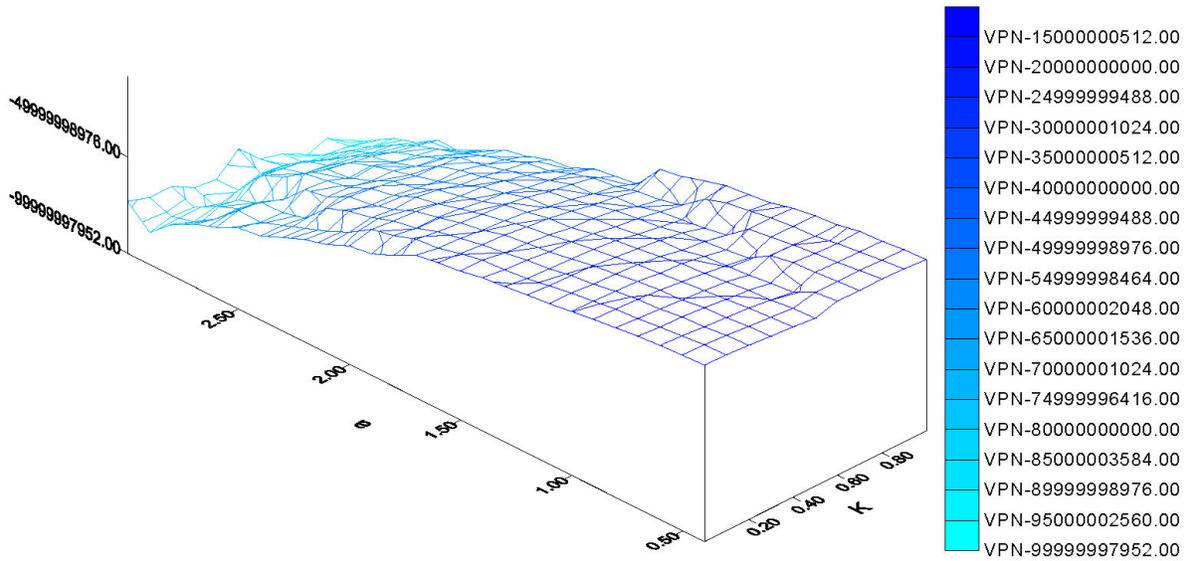


Figura 7.27 a – k – VPN Política3

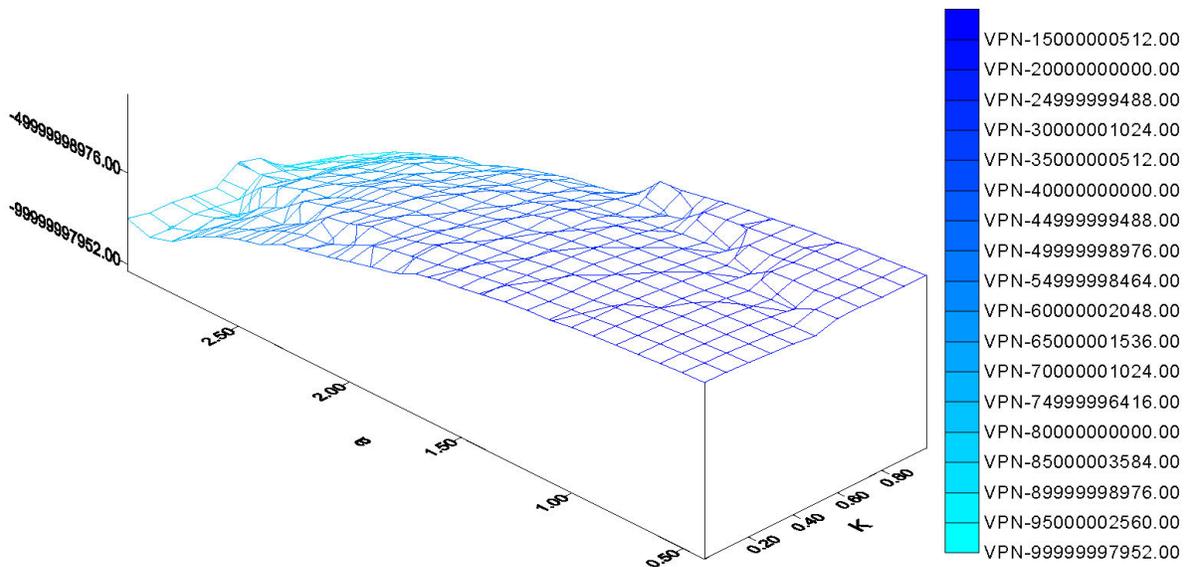


Figura 7.28 a – k – VPN Política4

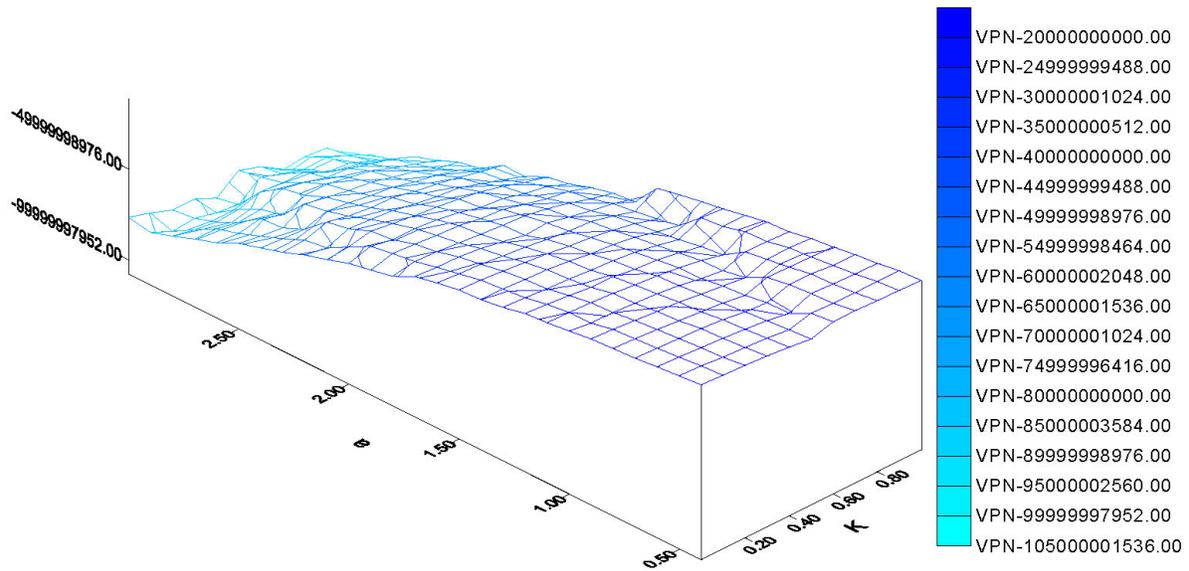


Figura 7.29 a – k – VPN Politica5

Riesgo Suelo – Riesgo Corrosión - VPN

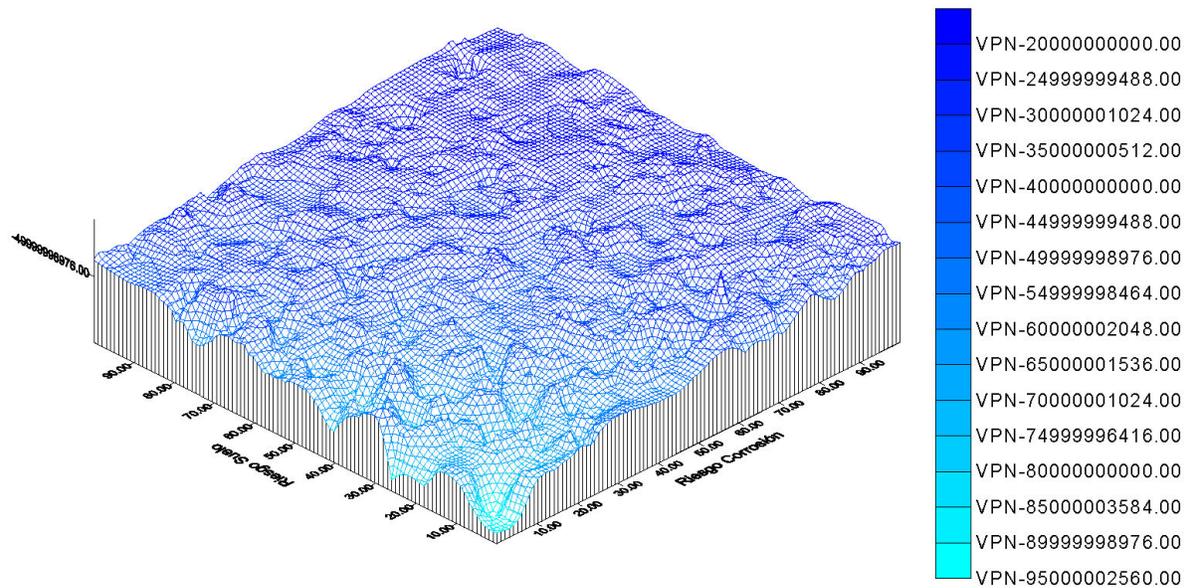


Figura 7.30 Riesgo Suelo – Riesgo Corrosión – VPN Politica1

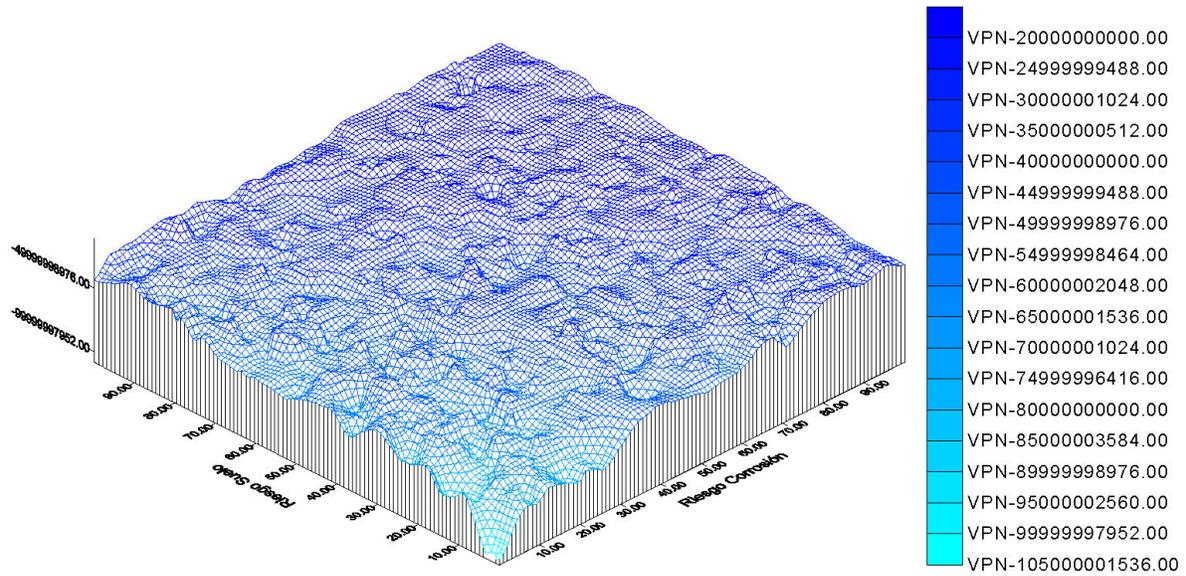


Figura 7.31 Riesgo Suelo – Riesgo Corrosión – VPN Politica2

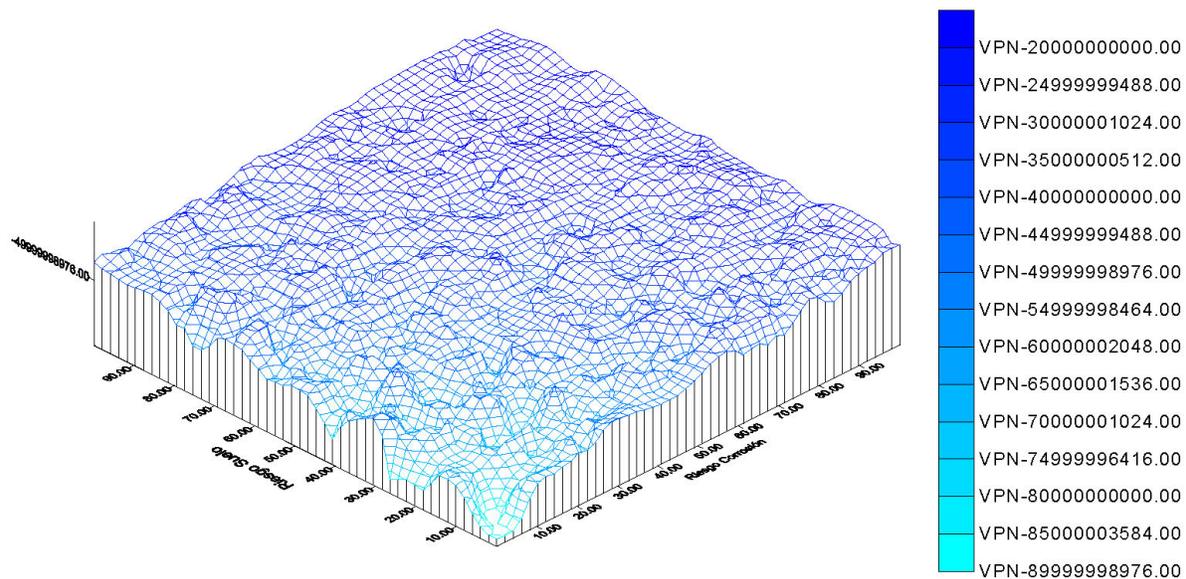


Figura 7.32 Riesgo Suelo – Riesgo Corrosión - VPN Politica3

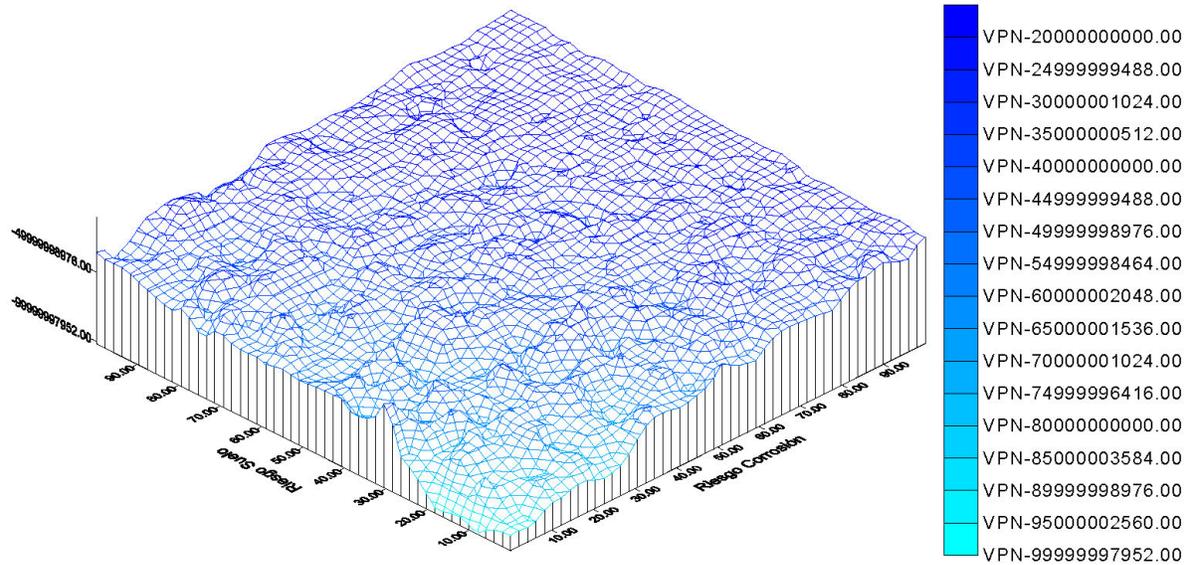


Figura 7.33 Riesgo Suelo – Riesgo Corrosión - VPN Politica4

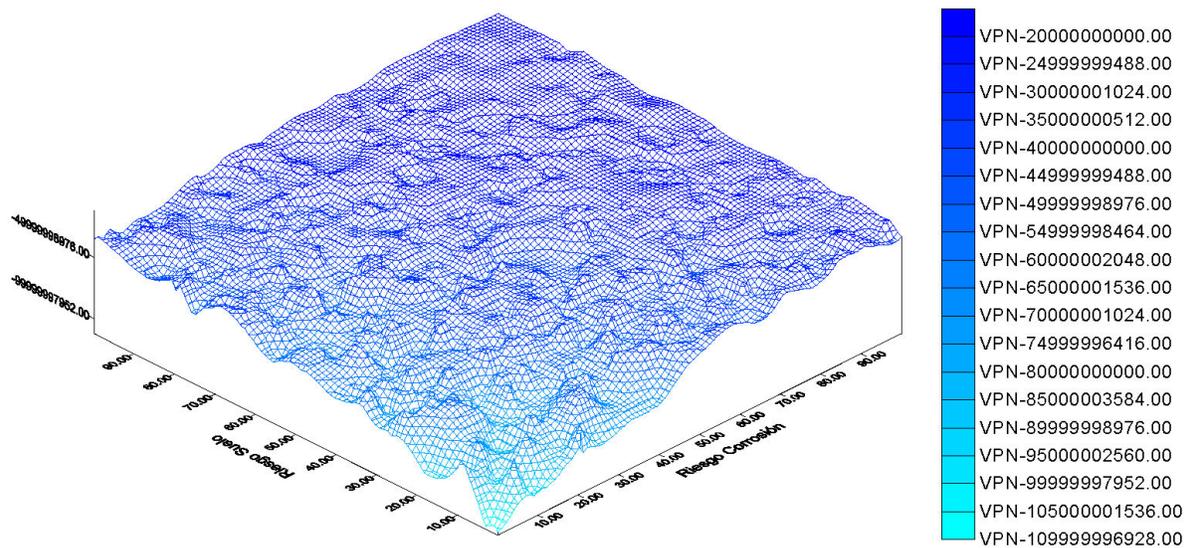


Figura 7.34 Riesgo Suelo – Riesgo Corrosión - VPN Politica5



Los resultados gráficos agrupados por tipo de gráfico (parámetros evaluados) muestran grandes similitudes de una Política a la otra. (Ver Figura 7.6 – Figura 7.34)

Los resultados del Riesgo Suelo vs. a muestran que la mayor incidencia en el VPN se refleja por parte del parámetro a, y que a medida que este aumenta el VPN es más negativo. La disminución del Riesgo Suelo también refleja un VPN más negativa, pero con una incidencia menor. (Ver Figura 7.6 – Figura 7.9).

Los resultados del Riesgo Corrosión vs. a muestran que la mayor incidencia en el VPN se refleja por parte del parámetro a, y que a medida que este aumenta el VPN es más negativo. La disminución del Riesgo Corrosión también refleja un VPN más negativa, pero con una incidencia menor. (Ver Figura 7.10 – Figura 7.14).

Resultados similares a los dos anteriores son los que se ven reflejados en Riesgo Suelo vs. a y Riesgo Corrosión vs. a respectivamente. Los resultados muestran una mayor incidencia en el VPN por parte del parámetro K. La disminución del Riesgo Suelo o del Riesgo Corrosión reflejan un VPN más negativa, pero con una incidencia menor. (Ver Figura 7.15 – Figura 7.24)

Por su parte las graficas del parámetro a vs. Parámetro K muestran una mayor variación con el parámetro a, el exponente de fugas, mientras que la variación con el parámetro K, con el coeficiente de fugas es muy pequeña. (Ver Figura 7.25 – Figura 7.29)

Las graficas de Riesgo Suelo vs. Riesgo Corrosión muestran una tendencia muy clara a disminuir el VPN en la medida en que se hacen más pequeños el Riesgo Suelo y el Riesgo Corrosión, la incidencia por separado del uno y del otro es muy similar y este se ve reflejado de manera clara en los porcentajes de incidencia en la probabilidad de falla, los cuales son muy similares. (Ver Figura 7.30 – Figura 7.34)



## **Capítulo 8 Conclusiones**

---

- A través del siguiente trabajo quedo definida una metodología y un algoritmo para la evaluación de políticas en una red de acueducto. A través de la definición de clases este mismo algoritmo permite ser implementado a un lenguaje de programación distinto.
- La evolución y modificabilidad del software se ve permitida por medio de la definición de clases, lo que permite que se pueda cambiar o agregar nuevas características, como puede ser el caso de agregar una nueva política o un nuevo material o cambiar alguno o algunos de los existentes
- Las pruebas del software mostraron que no hay una Política que resulte ser más adecuada en todas las circunstancias, a pesar de que la Política 5 produjo en promedio resultados más satisfactorios pero que presentaba una elevada desviación estándar en los resultados que mostró.
- Las pruebas de software también permitieron mostrar la ver la incidencia de las variables analizadas en función del VPN, las cuales fueron el Riesgo Suelo, el Riesgo Corrosión, el coeficiente y el exponente de Fugas.
- Se realizaron unidades de carácter utilitario que hacen distintas tareas y que permiten facilitar la elaboración de los resultados.  
Utilidades  
Utilidades2  
LeerArchivoDatos  
TLeerClass