

COMISION DE DISEÑO Y EVALUACION DE PAVIMENTOS

DRENABILIDAD Y TIEMPOS DE SATURACION PARA BASES DE PAVIMENTOS

**Preparado por:
LEN Y ASOCIADOS LTDA.
Ingenieros Consultores**

CAMARA CHILENA DE
LA CONSTRUCCION
Centro Documentación

-06363-

1995

**Cámara Chilena de la Construcción
Corporación de Investigación de la Construcción**

INDICE

| | PAG. |
|--|------|
| I. INTRODUCCION | 1 |
| II. CALCULO DEL COEFICIENTE DE DRENAJE | 4 |
| 2.1. Generalidades. | 4 |
| 2.2. Calidad del Drenaje. | 5 |
| 2.3. Tiempo de Saturación. | 10 |
| 2.4. Ejemplo de Cálculo del Coeficiente de Drenaje | 17 |
| 2.5. Tablas: Precipitación Media Anual para Diversas Estaciones | 19 |
| | |
| ANEXO I : CALIDAD DEL DRENAJE | |
| | |
| ANEXO II : TIEMPO DE SATURACION | |
| | |
| ANEXO III : INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE DRENAJE EN LOS ESPESORES DE DISEÑO | |
| | |
| REFERENCIAS | |

DRENABILIDAD Y TIEMPOS DE SATURACION PARA BASES DE PAVIMENTOS

I. INTRODUCCION

El método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) para diseñar pavimentos incorpora, a partir de la versión de 1986, las características del drenaje de la estructura en el comportamiento de los pavimentos.

Este efecto se expresa modificando el coeficiente estructural de las capas no ligadas de los pavimentos flexibles, y el espesor en los pavimentos rígidos, para lo cual interviene el factor denominado **Coficiente de Drenaje**, determinado en función de:

- **Tiempo de Drenaje (T_{50}):** Período que requiere una determinada estructura en drenar el 50% del agua libre a partir de un estado 100% saturado. La **Calidad del Drenaje** se define para rangos del tiempo de drenaje.
- **Tiempo de Saturación:** Porcentaje de tiempo de la vida útil durante el cual se prevé que la estructura se encontrará con niveles de humedad cercanos a la saturación (humedad igual o mayor al 50% del agua libre de saturación).

En los pavimentos flexibles, el coeficiente de drenaje que modifica el coeficiente estructural de capas no ligadas se denota por " m_i " y está incorporado en la ecuación que determina el número estructural (SN) en conjunto con el coeficiente estructural de la capa (a_i) y su espesor (D_i). De esta forma:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

En los pavimentos rígidos, el coeficiente de drenaje " C_d " modifica directamente el espesor de éste, al afectar la resistencia a la flexotracción del hormigón.

Para efectos de comparación, tanto a m_i como a C_d , se les asignó el valor 1,0 en las condiciones de drenaje y clima prevaleciente donde se efectuó la Prueba AASHTO. Allí el tiempo de saturación fue del 5% y el tiempo de drenaje de 1 semana, lo que se definió como calidad de drenaje "regular".

Tanto por diferencias estructurales como climatológicas, resulta evidente la necesidad de adaptar la metodología (propuesta por AASHTO) para calcular los coeficientes de drenaje, a las condiciones particulares imperantes en el país. Con ese objetivo se desarrolló el presente estudio basado, en general, en las hipótesis y consideraciones señaladas en la Guía AASHTO, salvo por los siguientes aspectos:

- El tiempo de drenaje se establece mediante un modelo con régimen impermanente con evacuación tanto horizontal como vertical del agua libre existente. (la Guía AASHTO sólo considera evacuación horizontal en un modelo con régimen permanente).
- Aún cuando la permeabilidad (K) de un suelo, es extremadamente sensible a algunas propiedades del material, en especial la cantidad y tipo de finos (porcentaje que pasa por el tamiz de 0,08 mm) presentes en él, se entrega un rango de valores para las bandas granulométricas más frecuentemente especificadas para las bases y sub-bases de los pavimentos chilenos (Ref. 7).
- Se caracterizan las precipitaciones del país, modelando su distribución y frecuencia para 6 zonas diferentes que abarcan desde la IV a la XII Región. En función de las precipitaciones, la infiltración y el tiempo de drenaje, se establece el tiempo de saturación por medio de una modelación dinámica de los caudales que entran y salen de la base.

Para facilitar el uso de la información contenida en el estudio, éste se presenta dividido de la siguiente forma:

- **Cálculo del Coeficiente de Drenaje**

Se expone el procedimiento establecido en el estudio para determinar los coeficientes de drenaje, m_i para pavimentos flexibles y C_d , para los rígidos. Ello se realiza mediante gráficos que permiten establecer el tiempo de drenaje en función de las características de la estructura y de las permeabilidades de la base y sub-rasante, así como el tiempo de saturación para diferentes zonas del país, en función de la precipitación media anual y del tiempo de drenaje.

- **Anexo I, Calidad del Drenaje**

Se describe el modelo implementado para determinar el tiempo de drenaje que establece la Calidad del Drenaje según rangos de valores definidos por AASHTO. Además, se entregan las hipótesis, análisis y simplificaciones utilizadas para obtener los gráficos finales.

- **Anexo II, Tiempo de Saturación**

Se describen los procedimientos seguidos para relacionar las precipitaciones medias anuales que se presentan a lo largo del país, con el porcentaje de tiempo del año que una determinada base permanecerá con una humedad cercana a la de saturación. Además, se presenta el cálculo de la infiltración a partir de un método empírico propuesto por AASHTO y la modelación de las características de la estructura a partir del tiempo de drenaje (T_{50}).

- **Anexo III, Influencia del Coeficiente de Drenaje en los Espesores de Diseño.**

Se analiza, mediante la sensibilización de los parámetros que afectan el coeficiente de drenaje, cuál es la influencia de éste en los espesores de diseño.

II.- CALCULO DEL COEFICIENTE DE DRENAJE

2.1 Generalidades

El método de diseño AASHTO (Ref. 1 y Ref. 11) tiene en consideración la influencia de la calidad del drenaje y las características de las precipitaciones en el comportamiento del pavimento, al tratar el efecto de la humedad en las propiedades de los materiales que conforman las diferentes capas del pavimento y, consecuentemente, su capacidad estructural. Este efecto queda expresado en los coeficientes de drenaje C_d y m_i (para los pavimentos rígidos y flexibles, respectivamente), los que se determinan en función de la calidad del drenaje y del porcentaje de tiempo en que las bases están expuestas a niveles de humedad cercanos a la saturación.

Las Tablas N° 1 y N° 2 muestran los coeficientes de drenaje propuestos en el Método AASHTO (Ref. 1). A estas Tablas se ingresa en forma discreta por la "Calidad del Drenaje" y en forma continua (interpolando) en función del "Tiempo de Saturación".

| CALIDAD DEL DRENAJE | PORCENTAJE DE TIEMPO EN QUE LA ESTRUCTURA ESTA EXPUESTA A NIVELES DE HUMEDAD CERCANOS A LA SATURACION. | | | |
|---------------------|--|-----------|-----------|--------|
| | < 1 % | 1 - 5% | 5 - 25% | > 25 % |
| Excelente | 1,25-1,20 | 1,20-1,15 | 1,15-1,10 | 1,10 |
| Bueno | 1,20-1,15 | 1,15-1,10 | 1,10-1,00 | 1,00 |
| Regular | 1,15-1,10 | 1,10-1,00 | 1,00-0,90 | 0,90 |
| Pobre | 1,10-1,00 | 1,00-0,90 | 0,90-0,80 | 0,80 |
| Muy Pobre | 1,00-0,90 | 0,90-0,80 | 0,80-0,70 | 0,70 |

TABLA N° 1. C_d para pavimentos rígidos. (Fuente: Ref. 1)

| CALIDAD DEL DRENAJE | PORCENTAJE DE TIEMPO EN QUE LA ESTRUCTURA ESTA EXPUESTA A NIVELES DE HUMEDAD CERCANOS A LA SATURACION. | | | |
|---------------------|--|-----------|-----------|--------|
| | < 1 % | 1 - 5% | 5 - 25% | > 25 % |
| Excelente | 1,40-1,35 | 1,35-1,30 | 1,30-1,20 | 1,20 |
| Bueno | 1,35-1,25 | 1,25-1,15 | 1,15-1,00 | 1,00 |
| Regular | 1,25-1,15 | 1,15-1,00 | 1,00-0,80 | 0,80 |
| Pobre | 1,15-1,05 | 1,05-0,80 | 0,80-0,60 | 0,60 |
| Muy Pobre | 1,05-0,95 | 0,95-0,75 | 0,75-0,40 | 0,40 |

TABLA N° 2. m_i para pavimentos flexibles. (Fuente: Ref. 1)

2.2 CALIDAD DEL DRENAJE

La "Calidad del Drenaje" queda definida por el tiempo que demora una base en drenar el 50% del agua libre de saturación, es decir, del tiempo durante el cual permanece con niveles de humedad cercanos a la saturación (T_{50}).

La Tabla N° 3, muestra la calificación de la "Calidad del Drenaje" sugerida por AASHTO.

| CALIDAD DEL DRENAJE | T_{50} CALCULADO | T_{50} RECOMENDADO |
|---------------------|--------------------|----------------------|
| Excelente | 2 - 4 horas | 2 horas |
| Bueno | 0,5 a 1 día | 1 día |
| Regular | 3 a 6 días | 7 días |
| Malo | 18 a 36 días | 1 mes |
| Muy malo | Más de 36 días | No drena |

TABLA N° 3. Relación entre Tiempo de Drenaje y Calidad del Drenaje (Fuente, Ref. 1).

En el modelo implementado en este estudio, el tiempo de drenaje (T_{50}) se establece por medio de la siguiente relación:

$$T_{50} = T_{50}' * C1 * C2 * C3 \text{ [DIAS]}$$

donde:

T_{50}' [DIAS]: Es el tiempo, expresado en días, que demora una "base tipo", en drenar el 50% del agua libre de saturación.

El Gráfico N° 1, permite determinar el T_{50}' en función de las permeabilidades de la base (y sub-base) y de la sub-rasante.

En caso de no disponer de información confiable del valor de K, este puede, en general, estimarse con la fórmula de Hazen:

$$K = C d_{10}^2 \left[\frac{cm}{s} \right]$$

d_{10} [cm] : Diámetro por el cual pasa el 10% del material.

C : Coeficiente que varía entre 90 y 120 (aprox. 100 según Ref. 5).

Las permeabilidades de las bases que más usualmente se utilizan en el país y que se ajustan a los requisitos del LNV 102 de la Dirección de Vialidad, pueden también estimarse con el Gráfico N° 2.

La permeabilidad de diversos suelos que normalmente conforman la sub-rasante, se encuentran dentro de los valores de referencia que se indican en el propio Gráfico N° 1, de acuerdo con la Ref. 4.

C1 .. C3: Para secciones diferentes de la "sección tipo" usada para calcular el Gráfico N° 1 (cuyas características se indican en la parte superior) el T_{50}' debe modificarse, afectándolo con los factores de ajuste que se determinan de los Gráficos N° 3 al N° 5. Ellos entregan el factor de ajuste para pasar del T_{50}' de la sección tipo, al tiempo de drenaje correspondiente a la sección real que se analiza, en función de la relación entre las permeabilidades de la base (K_b) y de la sub-rasante (K_{sr}).

* Gráfico N° 3 : Factor de Ajuste para el ANCHO; C1

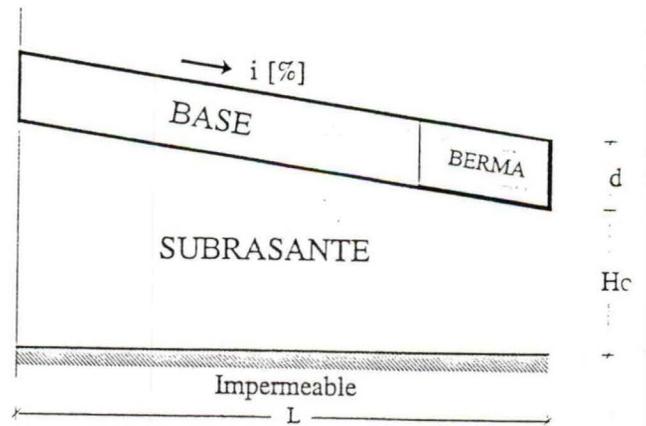
* Gráfico N° 4 : Factor de Ajuste para PENDIENTE transversal; C2

* Gráfico N° 5 : Factor de Ajuste para la ALTURA DE LA SUB-RASANTE; C3

TIEMPO DE DRENAJE -> T_{50}' [Días]

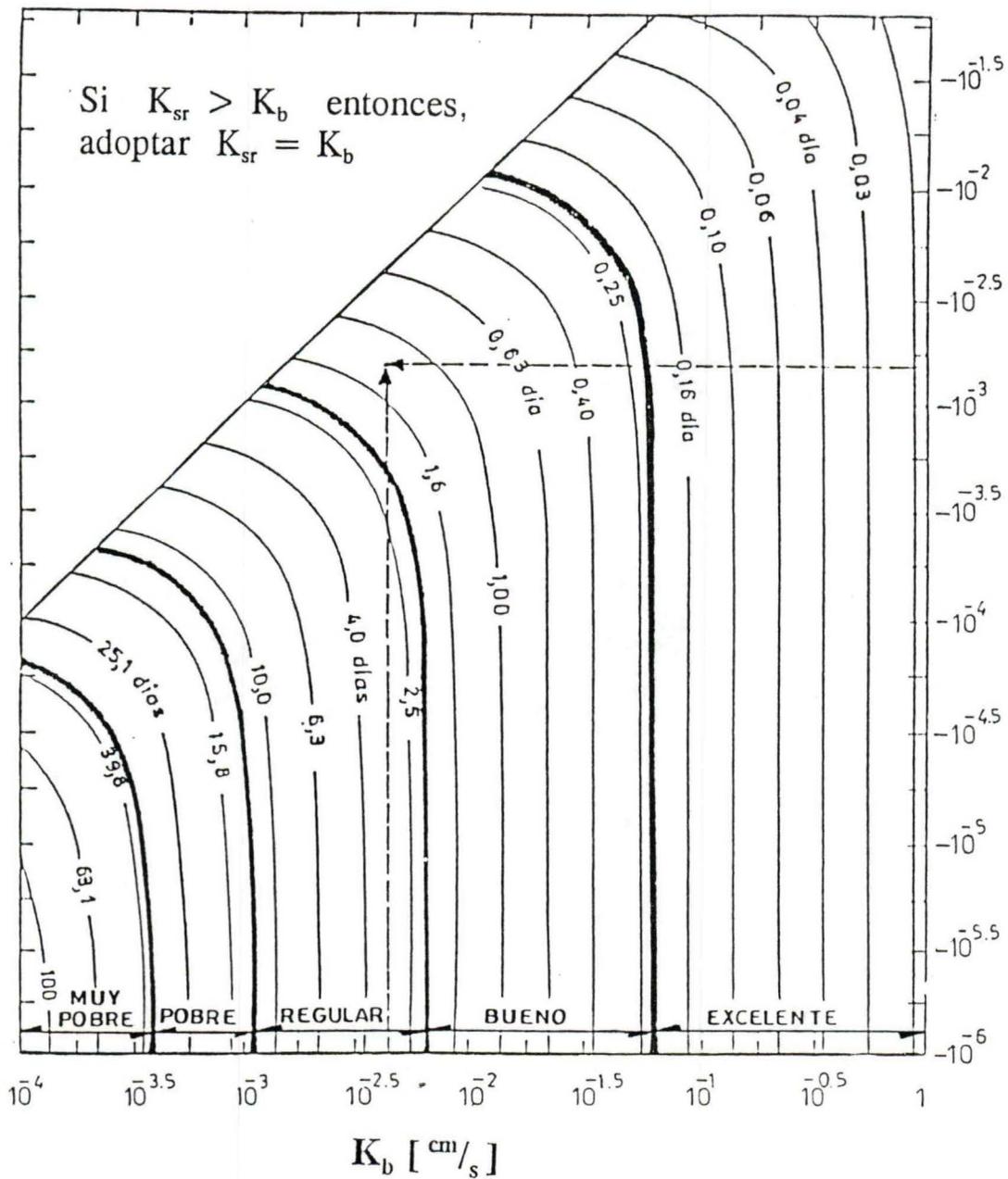
SECCION TIPO

| | | |
|--------------------------------|---|--------|
| Ancho de la Base (L) | = | 6,00 m |
| Espesor de la Base (d) | = | 0,15 m |
| Porosidad Cinemática (n_c) | = | 12,0 % |
| Bombeo (i) | = | 2,0 % |
| Altura de Subrasante (H_o) | = | 0,50 m |



SUB-RASANTE

| | | | |
|--------------|--|---|----------------|
| GRAVA LIMPIA | - ARENAS LIMPIAS - - GRAVA-ARENA LIMPIA - | - ARENAS MUY FINAS, LIMOS - - ARENAS LIMOSAS, LIMO-ARCILLA, MORENAS - - ARCILLAS ESTRATIFICADAS - | ARCILLA FRANCA |
|--------------|--|---|----------------|



PERMEABILIDAD SUB-RASANTE

PERMEABILIDAD BASE/SUB-BASE

OTROS AJUSTES: Además de las variaciones que experimenta el T_{50}' por los factores señalados antes, se analizaron otros, no incluidos por lo siguiente:

- * En estricto rigor, el T_{50}' cambia al variar el espesor de la base. Sin embargo, tal como se muestra en el Anexo I, el error que se comete al obviarlo es poco relevante, de manera que se optó por no incluirlo.
- * El Gráfico N° 1, fue calculado para una porosidad total del 15% y una porosidad cinemática (agua libre) igual al 80% de aquella, es decir 0,12. Si para una situación específica resultara una porosidad cinemática muy diferente del 0,12 utilizado en el Gráfico N° 1, el T_{50}' debe afectarse de un Factor de Ajuste adicional (C4), determinado de acuerdo con lo que se indica en el Anexo I.

*PERMEABILIDAD DE BASES Y SUB-BASES
(Bases de la Dirección de Vialidad, según LNV 102)*

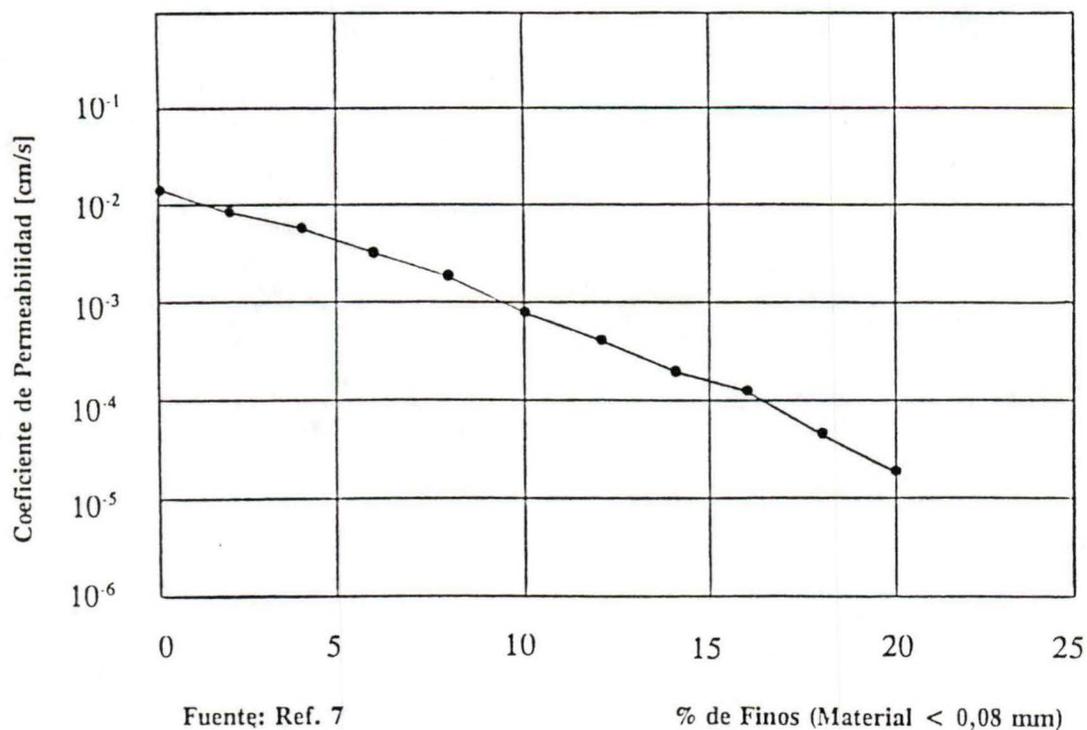


GRAFICO N° 2.

FACTOR DE AJUSTE \rightarrow C1
 PARA EL ANCHO DE LA BASE

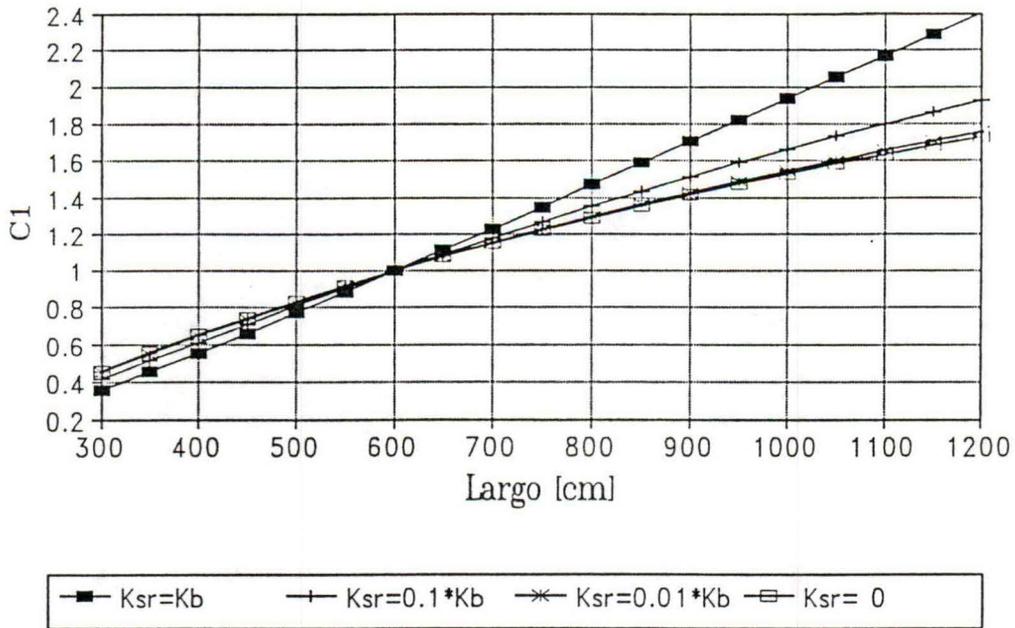


GRAFICO N° 3.

FACTOR DE AJUSTE \rightarrow C2
 PARA LA PENDIENTE TRANSVERSAL

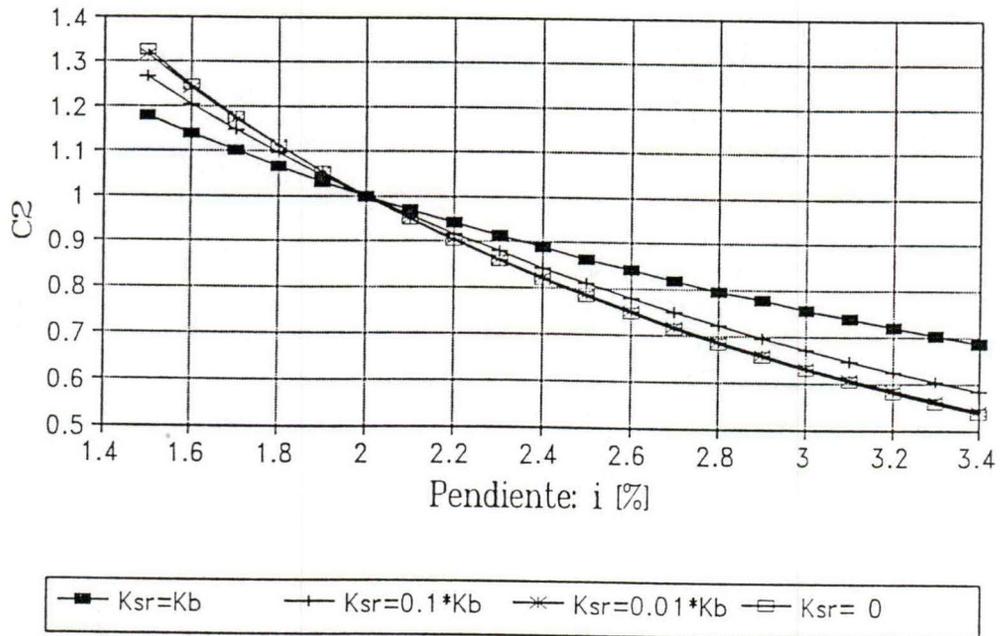


GRAFICO N° 4.

FACTOR DE AJUSTE $\rightarrow C3$
PARA LA ALTURA DE LA SUBRASANTE

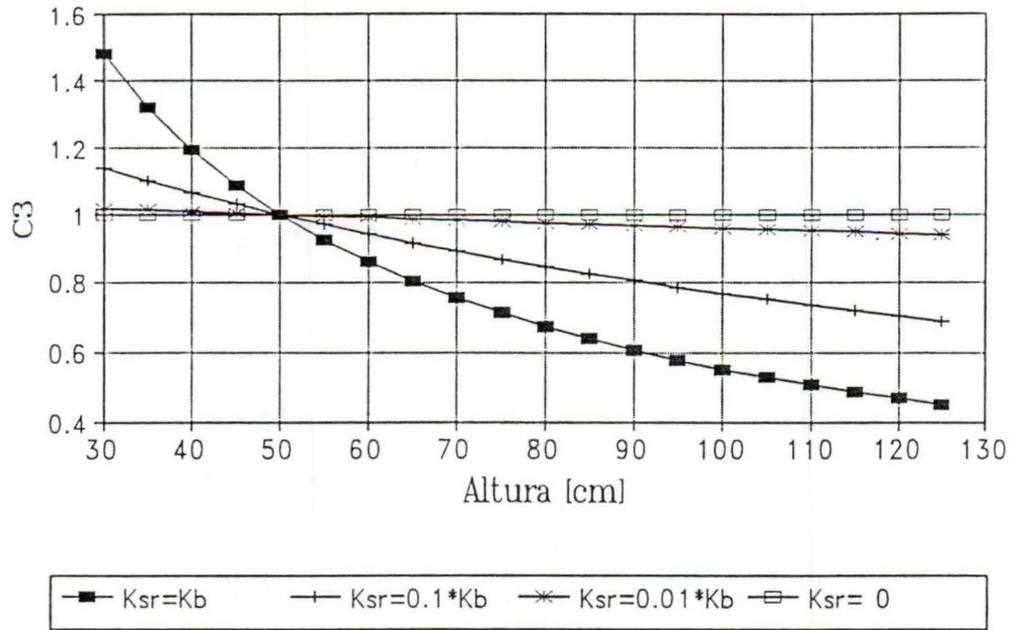


GRAFICO N° 5.

2.3 TIEMPO DE SATURACION

El tiempo que una determinada estructura de pavimento permanecerá con humedades cercanas a la saturación, es función de la drenabilidad de la base, de la tasa de infiltración del pavimento y de las características de las precipitaciones en la zona del proyecto. Todos estos factores fueron analizados y ponderados, de acuerdo con lo que se detalla en el Anexo II, Tiempo de Saturación.

El resultado de los estudios queda resumido en los 6 gráficos (Gráficos N° 6 al N° 11) que se adjuntan, donde el "tiempo de saturación" se determina a partir de 3 parámetros:

- Tiempo de Drenaje : T_{50} [días]
- Región o zona del país en que se localiza el proyecto
- Precipitación media anual [mm] característica en el área de emplazamiento del proyecto.

TIEMPO DE SATURACION

IV REGION

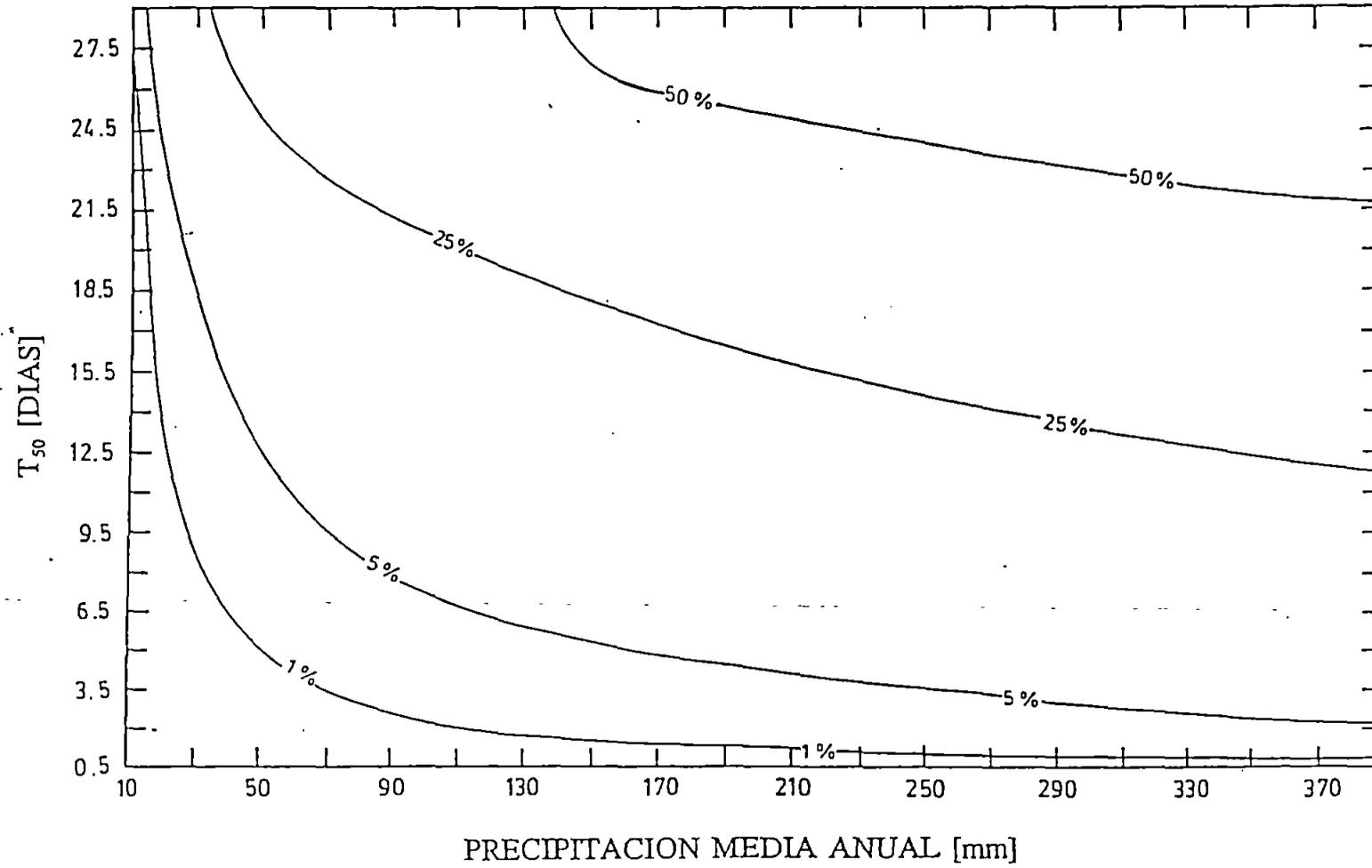


GRAFICO N° 6

TIEMPO DE SATURACION

V - A.M. - VI REGIONES

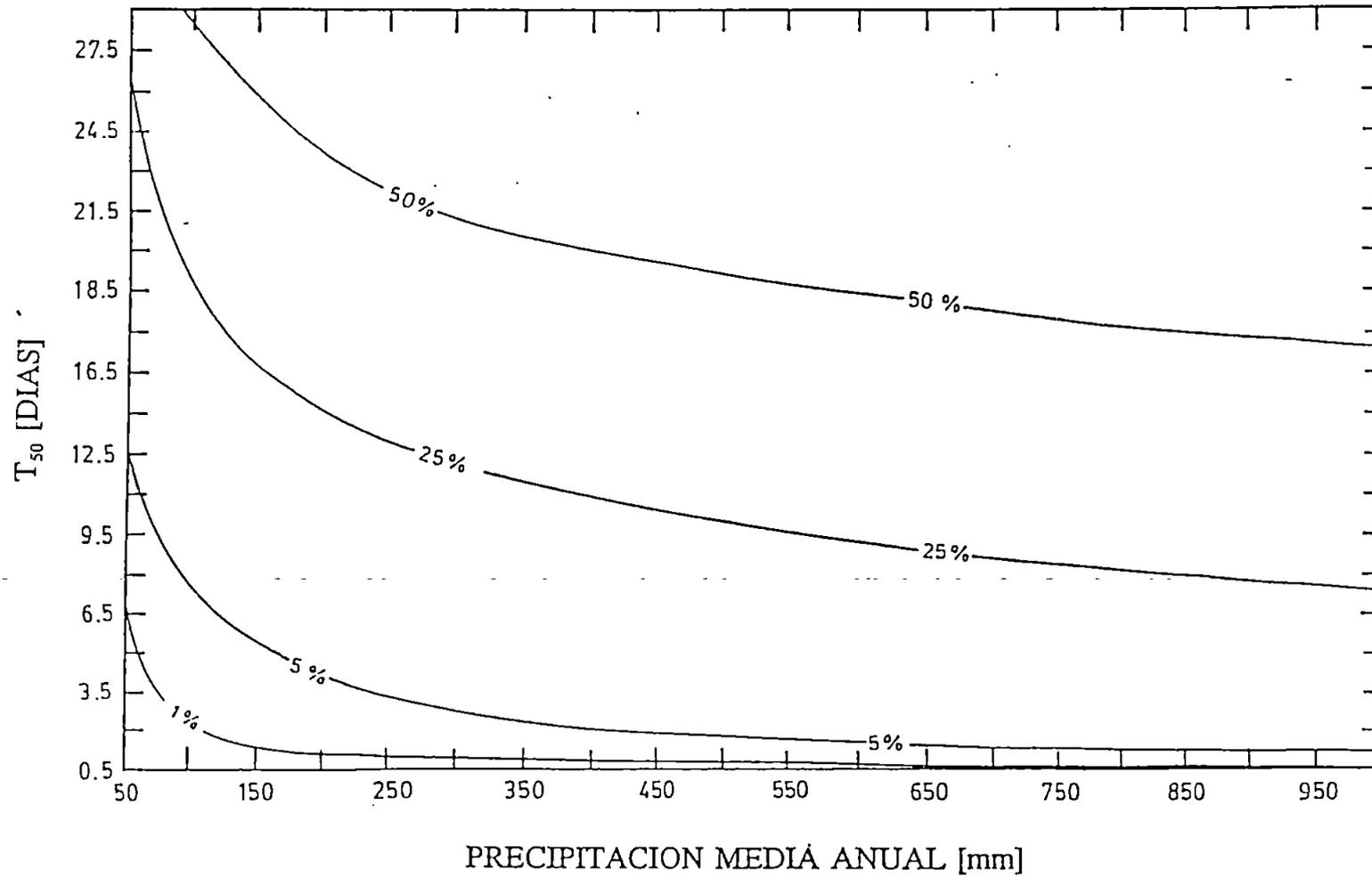


GRAFICO N° 7

TIEMPO DE SATURACION

VII - VIII - IX REGIONES

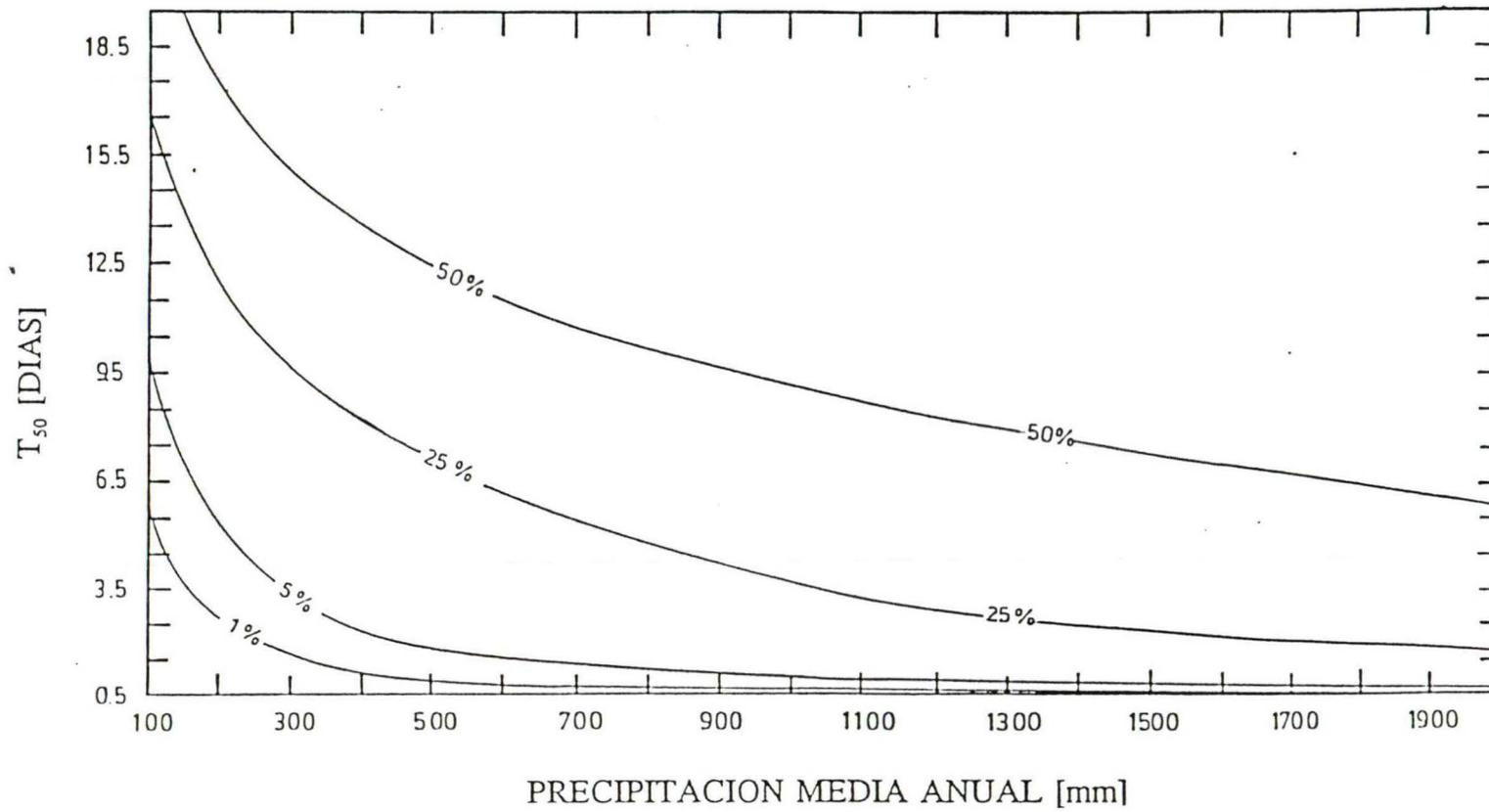


GRAFICO N° 8

TIEMPO DE SATURACION

X REGION

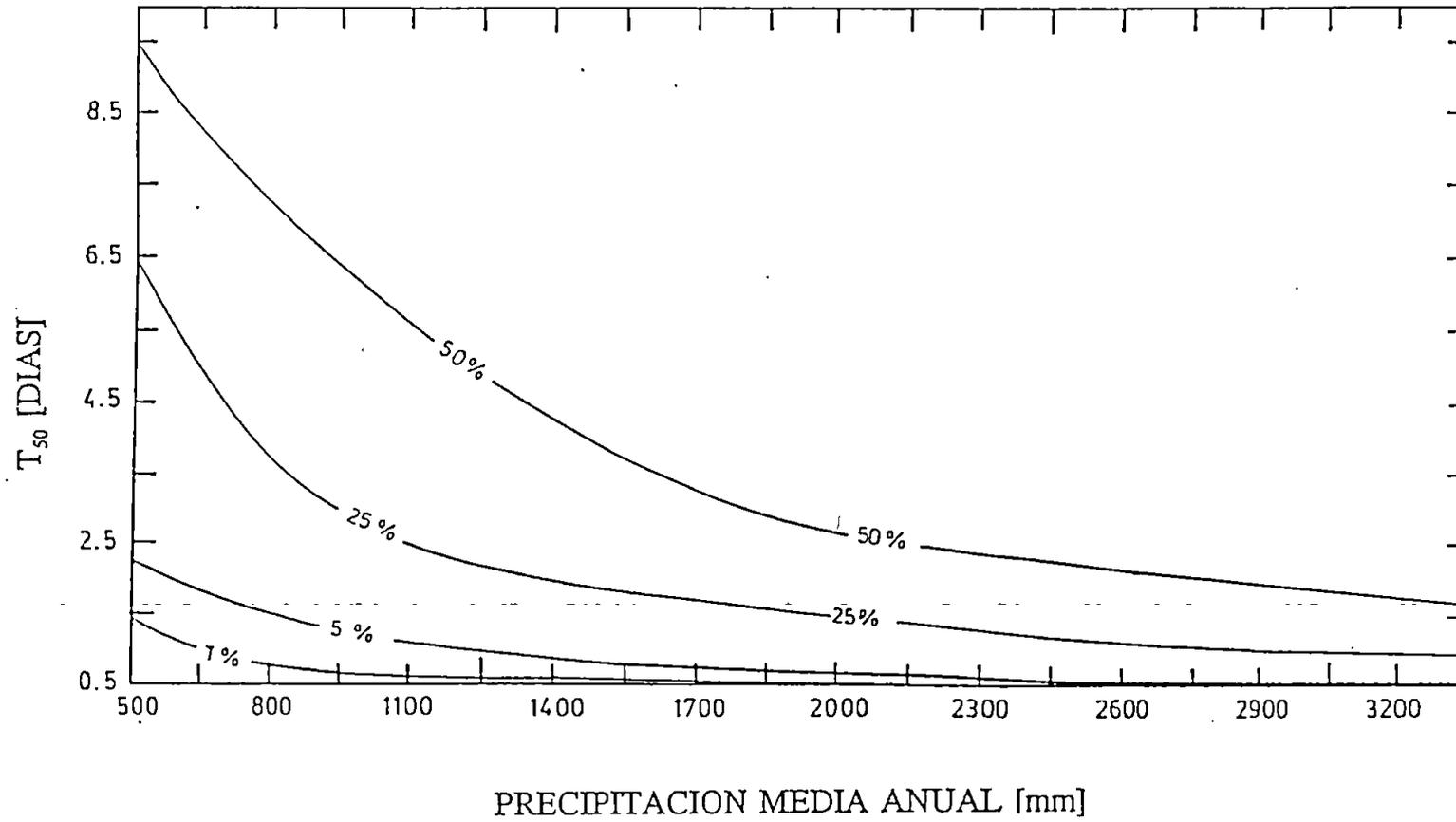


GRAFICO N° 9

TIEMPO DE SATURACION

XI REGION

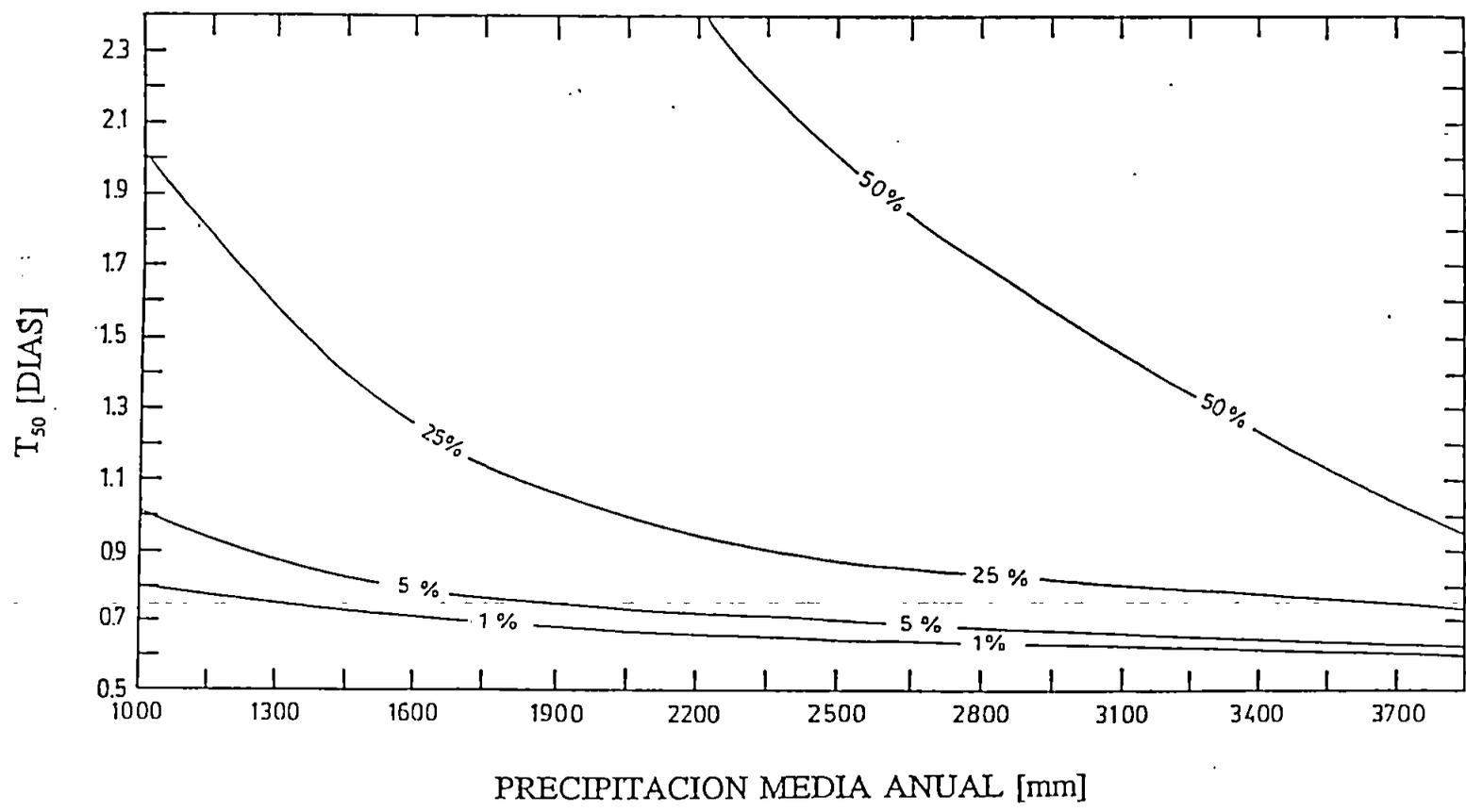


GRAFICO N° 10

TIEMPO DE SATURACION

XII REGION

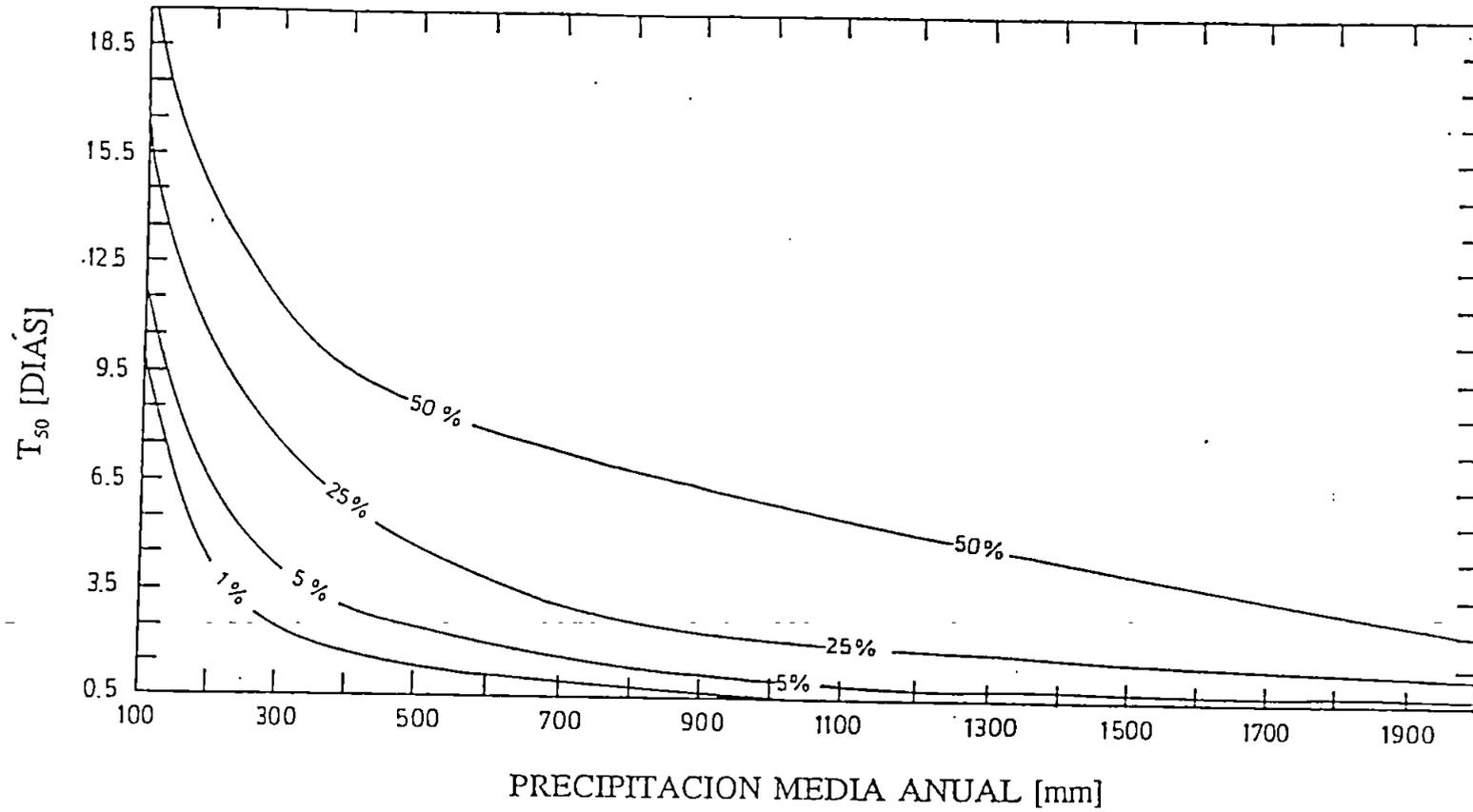


GRAFICO N° 11

2.4 EJEMPLO DE CALCULO DEL COEFICIENTE DE DRENAJE

Determinar el coeficiente de drenaje (C_d) para diseñar un pavimento rígido en la zona de la ciudad de Parral en la VII Región.

Los antecedentes básicos son:

- * Precipitación media anual según Estación Parral Dos: 982 mm.
- * Base según especificación de la Dirección de Vialidad (LNV 102) tipo TM-50b con 5 % de finos limosos.
- * Ancho de la base: 950 cm.
- * Pendiente transversal (bombeo): 2 %
- * Sub-rasante conformada por una grava-arenosa de 1 m. de altura.

Respuesta:

- * El Gráfico N° 2 indica $K_b = 10^{-2,3}$ (cm/s)
- * El Gráfico N° 1 permite estimar que para la sub-rasante se puede adoptar $K_{sr} = 10^{-3}$ (Por lo tanto $K_{sr} \approx 0,2 \cdot K_b$).
- * Del Gráfico N° 1, con $K_b = 10^{-2,3}$ y $K_{sr} = 10^{-3}$ se obtiene $T_{50}' \approx 1,3$ (días).
- * Ajuste por el ancho de la base (950 cm) : $C1 \approx 1,70$
- * Ajuste por bombeo (2%) : $C2 = 1,0$
- * Ajuste por altura sub-rasante (1 m) : $C3 \approx 0,70$
- * En consecuencia:

$$T_{50} = 1,3 \text{ (días)} \cdot 1,70 \cdot 1,00 \cdot 0,70 = 1,55 \text{ (días)}$$
- * La calidad del drenaje es "buena" (Gráfico N° 1)
- * El Tiempo de Saturación se calcula con el Gráfico N° 8 (VII Región), una precipitación media anual de 982 mm. y un Tiempo de Drenaje de 1,55 días.

Tiempo de Saturación : 5 al 25% (\approx 8%)

- * La Tabla N° 1, indica que para un drenaje "bueno" y un tiempo de saturación entre 5 y 25%, $C_d = 1,10$ a $1,00$.

Interpolando con un Tiempo de Saturación del 8%, se tiene $C_d = 1,08$.

Ajuste Adicional.

Si además de los antecedentes básicos señalados antes para la base, se establece que, por ejemplo:

| | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| D.C.S. = 2,10 (gr/cm ³) | (densidad compactada seca) |
| P.E.S. = 2,60 (gr/cm ³) | (peso específico de los sólidos) |
| $n = 1 - 2,10/2,60 = 0,19$ | (porosidad total) |

Esta porosidad total difiere bastante de $n = 0,15$ usado en el Gráfico N° 1, por lo que de acuerdo con lo indicado en el Anexo I, conviene hacer un ajuste adicional, como sigue:

- * Según la Tabla N° I.1, con 5% de finos limosos

$$r = 0,40 \text{ (grava)}$$

- * $n_c = r \cdot n = 0,40 \cdot 0,19 = 0,08$

- * Del Gráfico N° I.3, para $n_c = 0,08$, $C_4 = 0,68$

- * En consecuencia:

$$T_{50} = 1,55 \text{ (días)} \times 0,68 = 1,05 \text{ (días)}$$

- * El drenaje se califica como "bueno" y el tiempo de saturación (Gráfico N° 8) es aproximadamente de un 5%.

- * De la Tabla N° 1, se deduce que $C_d = 1,10$

**2.5 TABLAS: PRECIPITACION MEDIA ANUAL PARA DIVERSAS
 ESTACIONES PLUVIOMETRICAS**

PERIODO 1951 - 1980

FUENTE: Ref. 10

| ESTACION | LAT | LON | ELEV | P |
|-------------------------------|-------|--------|------|--------|
| | o ' " | o ' " | msnm | mm/año |
| VILLA ALEMANA | 33 04 | 71 25 | 140 | 427.0 |
| LAGO PEÑUELAS | 33 09 | 71 33 | 360 | 690.0 |
| PTA. CURAUMILLA | 33 06 | 71 45 | 85 | 291.0 |
| VALPARAISO (PTA. ANGELES) | 33 01 | 71 38 | 41 | 389.0 |
| VALPARAISO (CERRO ALEGRE) | 33 03 | 71 38 | 112 | 428.0 |
| HUALLILEMU FDO. | 33 24 | 71 38 | 340 | 426.0 |
| SAN GERONIMO HDA. | 33 22 | 71 31 | 220 | 467.0 |
| CASABLANCA | 33 19 | 71 24 | 253 | 366.0 |
| SAN ANTONIO | 33 35 | 71 38 | 60 | 373.0 |
| LAS MAJADAS | 33 35 | 71 32 | 180 | 434.0 |
| EL TABO | 33 27 | 71 38 | 12 | 483.0 |
| PTA. PANUL | 33 34 | 71 37 | 63 | 367.0 |
| ISLA ROBINSON CRUSOE | 33 37 | 78 52 | 6 | 922.2 |
| ISLA DE PASCUA | 27 10 | 109 26 | 41 | 1113.8 |
| LAS MELOSAS | 33 55 | 70 13 | 1600 | 728.0 |
| QUELTEHUES | 33 49 | 70 13 | 1350 | 666.0 |
| EL YESO EMB. | 33 40 | 70 06 | 2475 | 508.0 |
| SAN GABRIEL | 33 47 | 70 14 | 1195 | 555.0 |
| SAN ALFONSO | 33 44 | 70 19 | 1040 | 541.0 |
| SAN JOSE DE MAIPO RETEN | 33 38 | 70 22 | 915 | 555.0 |
| SAN JOSE DE MAIPO | 33 38 | 70 22 | 992 | 536.0 |
| RIO COLORADO | 33 36 | 70 23 | 910 | 570.0 |
| LOS MAITENES CENTRAL | 33 33 | 70 16 | 1140 | 421.0 |
| PUENTE ALTO | 33 37 | 70 35 | 713 | 496.0 |
| LA OBRA DE MAIPO | 33 35 | 70 30 | 799 | 514.8 |
| EL CANELO | 33 34 | 70 27 | 843 | 694.0 |
| PIRQUE | 33 40 | 70 36 | 670 | 471.0 |
| PIRQUE FDO. LO ARCAYA | 33 39 | 70 35 | 670 | 397.0 |
| EL TRANSITO FDO. | 33 48 | 70 40 | 370 | 437.0 |
| PAINE FDO. VILUCO | 33 47 | 70 47 | 400 | 464.0 |
| BUIN | 33 44 | 70 45 | 488 | 440.0 |
| ALTO JAHUEL | 33 44 | 70 41 | 380 | 414.0 |
| HUELQUEN FDO. LA VEGA | 33 49 | 70 40 | 391 | 428.0 |
| CHADA HDA. | 33 54 | 70 40 | 400 | 502.0 |
| COLONIA DE PAINE | 33 50 | 70 44 | 395 | 448.0 |
| ACULEO | 33 53 | 70 55 | 370 | 575.0 |
| HUIGANAL FDO. | 33 20 | 70 30 | 830 | 409.0 |
| CERRO CALAN | 33 23 | 70 32 | 900 | 350.0 |
| SANTIAGO (EDIF. MOP) | 33 27 | 70 39 | 560 | 296.0 |
| APOQUINDO RETEN | 33 25 | 70 32 | 782 | 360.0 |
| LA CISTERNA | 33 33 | 70 42 | 568 | 351.0 |
| LOS CERRILLOS | 33 30 | 70 42 | 506 | 287.0 |
| EL BOSQUE | 33 33 | 70 41 | 568 | 321.0 |
| TOBALABA AERODROMO | 33 27 | 70 33 | 654 | 307.0 |
| VILLA EL DORADO | 33 23 | 70 33 | 710 | 440.0 |
| LA FLORIDA CENTRAL | 33 33 | 70 33 | 665 | 408.0 |
| MACUL ESC. AGRICOLA | 33 30 | 70 34 | 570 | 379.0 |
| SANTIAGO (QUINTA N° 111 (MAL) | 33 26 | 70 41 | 520 | 300.0 |
| SAN BERNARDO | 33 35 | 70 43 | 573 | 341.0 |
| POLPAICO FDO. | 33 10 | 70 53 | 522 | 302.0 |
| RINCON DE LOS VALLES | 32 57 | 70 45 | 950 | 250.0 |
| CALEU | 33 01 | 71 00 | 1120 | 572.0 |
| RUNGUE EMB. | 33 01 | 70 55 | 750 | 317.0 |
| TIL-TIL | 33 05 | 70 56 | 515 | 324.0 |
| VALLE HERMOSO FDO. | 33 17 | 70 38 | 544 | 254.0 |
| HUELEN | 33 23 | 70 45 | 560 | 278.0 |
| ESMERALDA DE COLINA | 33 11 | 70 40 | 550 | 272.0 |
| PENAFLO | 33 37 | 70 55 | 370 | 320.0 |
| MALLOCO | 33 36 | 70 52 | 407 | 367.0 |
| CARMEN DE LAS ROSAS | 33 46 | 70 10 | 165 | 421.0 |
| MELIPILLA | 33 42 | 71 13 | 200 | 307.0 |
| CAJON DE ACULEO | 33 49 | 71 05 | 370 | 498.0 |
| COLLIGUAY | 33 10 | 71 08 | 490 | 586.0 |
| ARRAYANES | 33 10 | 71 05 | 560 | 594.0 |
| CURACAVI | 33 25 | 71 03 | 167 | 328.0 |
| LOS MORROS RETEN | 33 39 | 71 13 | 580 | 355.0 |
| CERRILLOS DE LEYDA | 33 38 | 71 30 | 150 | 404.0 |

| ESTACION | LAT o ' " | LON o ' " | ELEV msnm | P mm/año |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| VI REGION | | | | |
| PANGAL B. T. | 34 16 | 70 20 | 1428 | 754.0 |
| PANGAL CASA DE FUERZA | 34 15 | 70 27 | 920 | 670.0 |
| BARAHONA SITIO K | 34 07 | 70 31 | 1672 | 826.0 |
| CALETONES | 34 06 | 70 27 | 1570 | 606.0 |
| SEWELL | 34 05 | 70 22 | 2155 | 754.0 |
| PARRON | 34 16 | 70 40 | 692 | 687.0 |
| COYA | 34 12 | 70 33 | 785 | 686.0 |
| RANCAGUA S/E | 34 10 | 70 45 | 500 | 406.0 |
| CENTRAL SAUZAL | 34 15 | 70 38 | 650 | 652.0 |
| GRANEROS | 34 04 | 70 44 | 500 | 456.0 |
| CACHAPOAL B. T. | 34 16 | 71 00 | 900 | 759.0 |
| POPETA | 34 26 | 70 48 | 360 | 579.0 |
| CENTRAL LAS NIEVES | 34 29 | 70 42 | 720 | 815.0 |
| RENGO | 34 25 | 70 53 | 310 | 521.0 |
| SAN FERNANDO S/E | 34 36 | 71 00 | 330 | 705.0 |
| VINA VIEJA FDO. | 34 31 | 71 12 | 170 | 546.0 |
| LAGUNA TAGUA-TAGUA | 34 29 | 71 10 | 170 | 717.0 |
| ESPERANZA FDO. | 34 18 | 71 18 | 164 | 531.0 |
| PUENTE ARQUEADO | 34 17 | 71 21 | 119 | 505.0 |
| ESPINALILLO | 34 47 | 70 41 | 890 | 926.0 |
| LA RUFINA | 34 44 | 70 44 | 735 | 1058.0 |
| PUENTE NEGRO | 34 40 | 70 53 | 497 | 686.0 |
| PLACILLA | 34 38 | 71 08 | 154 | 775.0 |
| SANTA SUSANA | 34 51 | 70 59 | 620 | 871.0 |
| CONVENTO VIEJO | 34 46 | 71 07 | 245 | 704.0 |
| SANTA ROSA HDA. | 34 47 | 71 06 | 890 | 723.0 |
| PANIAHUE S/E | 34 38 | 71 22 | 190 | 743.0 |
| NANCAGUA CCT | 34 41 | 71 12 | 370 | 762.0 |
| LIHUEIMO FDO. | 34 32 | 71 27 | 350 | 737.0 |
| SAN JOSE DEL CARMEN | 34 33 | 71 23 | 138 | 696.0 |
| LAS ARANAS | 34 42 | 71 15 | 334 | 645.0 |
| VILLA ALHUE | 34 02 | 71 05 | 270 | 505.0 |
| LONCHA | 34 07 | 71 08 | 210 | 526.0 |
| LOS QUILLAYES HDA. | 34 08 | 71 28 | 130 | 486.0 |
| PUQUILLAY | 34 12 | 71 30 | 330 | 626.0 |
| LLALLAUQUEN | 34 15 | 71 26 | 113 | 446.0 |
| CALLEUQUE | 34 22 | 71 28 | 106 | 567.0 |
| MARCHIHUE | 34 24 | 71 38 | 117 | 532.0 |
| LA ESTRELLA | 34 12 | 71 40 | 200 | 600.0 |
| QUELENTARO (C. RAPEL) | 34 02 | 71 35 | 260 | 449.0 |
| CORNECHE | 33 57 | 71 40 | 190 | 687.0 |
| RAPEL | 33 57 | 71 52 | 50 | 638.0 |
| PICHILEMU | 34 24 | 72 00 | 5 | 541.0 |
| LA CANDELARIA | 34 47 | 71 41 | 220 | 882.0 |
| LOLOL HDA. | 34 45 | 71 40 | 170 | 759.0 |
| PUMANQUE HDA. | 34 37 | 71 40 | 112 | 614.0 |

VII REGION

| | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|------|--------|
| ILOCA | 34 57 | 72 13 | 50 | 819.0 |
| LLICO | 34 46 | 72 07 | 4 | 714.0 |
| LOS QUEÑES | 35 00 | 70 49 | 809 | 1330.0 |
| EL MANZANO | 34 58 | 70 56 | 550 | 1382.0 |
| RAUCO | 34 55 | 71 19 | 164 | 778.0 |
| TENO | 34 52 | 71 10 | 298 | 780.0 |
| POTRERO GRANDE | 35 12 | 71 07 | 450 | 1087.0 |
| MOLINA | 35 06 | 71 16 | 125 | 809.0 |
| CURICO | 34 59 | 71 14 | 125 | 717.0 |
| VILLA ALEGRE | 34 57 | 71 08 | 294 | 769.0 |
| ROMERAL | 34 58 | 71 05 | 294 | 807.0 |
| LONTUE | 35 02 | 71 18 | 230 | 666.0 |
| CUREPTO SENDOS | 35 05 | 72 03 | 60 | 624.0 |
| CENTRAL ISLA B. T. | 35 49 | 70 46 | 850 | 1598.0 |
| EL MEDANO | 35 49 | 70 46 | 970 | 1502.0 |
| LOS TOROS | 35 50 | 70 45 | 1150 | 1463.0 |
| CENTRAL CIPRESES C. MAQ. | 35 48 | 70 49 | 943 | 1517.0 |
| CENTRAL CIPRESES CAMP. | 35 47 | 70 49 | 990 | 1634.0 |
| DESAGUE LAGUNA INVERNADA | 35 44 | 70 47 | 1325 | 1402.0 |
| COLORADO EN JUNTA CON MAULE | 35 46 | 70 36 | 800 | 1598.0 |
| ESTERO LAS GARZAS | 35 46 | 71 00 | 700 | 1572.0 |

| ESTACION | LAT | LON | ELEV | P |
|-----------------------------|-------|-------|------|--------|
| | o ' ° | o ' ° | msnm | mm/año |
| MELADO EN LA LANCHA | 35 51 | 71 04 | 650 | 2253.0 |
| ARMERILLO | 35 42 | 71 06 | 450 | 2428.0 |
| CLARO EN TORRECILLAS | 35 41 | 71 21 | 900 | 2169.0 |
| CLARO EN SAN CARLOS | 35 42 | 71 04 | 500 | 2559.0 |
| ESTERO LAS LAJAS | 35 44 | 71 09 | 470 | 1471.0 |
| MAULE EN LA Balsa | 35 43 | 71 12 | 450 | 1488.0 |
| DIGUA EMB. | 36 15 | 71 32 | 380 | 1575.0 |
| SN. MANUEL EN PERQUILAUQUEN | 36 21 | 71 39 | 255 | 1444.0 |
| PERQUILAUQUEN | 36 15 | 72 00 | 166 | 967.0 |
| RETIRO BUREO | 36 07 | 71 47 | 150 | 849.0 |
| QUELLA | 36 04 | 72 05 | 130 | 752.0 |
| CAUQUENES | 35 58 | 72 20 | 142 | 662.0 |
| TUTUVEN EMB. | 35 55 | 72 23 | 170 | 816.0 |
| NIRIVILO | 35 33 | 72 06 | 215 | 882.0 |
| PARRAL DOS | 36 09 | 71 50 | 170 | 982.0 |
| BULLILEO EMB. | 36 17 | 71 26 | 600 | 2368.0 |
| LONGAVI | 35 58 | 71 12 | 145 | 912.0 |
| PEJERREY RETEN | 35 58 | 71 08 | 400 | 1648.0 |
| HORNILLOS | 35 52 | 71 09 | 760 | 2157.0 |
| ANCOA EMB. | 35 54 | 71 17 | 410 | 1747.0 |
| LIGUAY | 35 56 | 71 41 | 145 | 959.0 |
| MELOZAL | 35 45 | 71 47 | 90 | 765.0 |
| COLBUN MAULE SUR | 35 37 | 71 25 | 280 | 1008.0 |
| LINARES | 35 52 | 71 34 | 150 | 895.0 |
| SANTA MARIA FDO. | 35 45 | 71 38 | 125 | 858.0 |
| PANIMAVIDA | 35 45 | 71 24 | 156 | 937.0 |
| SAN JAVIER | 35 36 | 71 44 | 110 | 777.0 |
| CHOCOA FDO. | 35 42 | 72 33 | 50 | 774.4 |
| EL GUINDO | 35 16 | 71 21 | 260 | 760.0 |
| EL HUAPI | 35 29 | 71 17 | 225 | 1051.0 |
| CANAL LAS LOMAS | 35 29 | 71 12 | 360 | 1076.0 |
| MAULE BAJO | 35 32 | 71 19 | 250 | 1110.0 |
| COLORADO | 35 38 | 71 16 | 400 | 1451.0 |
| SAN LUIS (TALCA) | 35 26 | 71 35 | 122 | 647.0 |
| EL LIRIO | 35 41 | 71 21 | 134 | 1135.0 |
| EL PERAL FDO. | 35 24 | 71 49 | 110 | 673.0 |
| CONSTITUCION | 35 20 | 72 26 | 7 | 755.0 |
| PUNTA CARRANZA | 35 36 | 72 38 | 30 | 737.0 |
| UNIHUE FDO. | 35 45 | 72 15 | 250 | 774.0 |
| CHANCO | 35 42 | 72 32 | 37 | 832.0 |

VIII REGION

| | | | | |
|-----------------------|-------|-------|------|--------|
| SAN FABIAN DE ALICO | 36 34 | 71 36 | 500 | 1896.0 |
| COIHUECO EMB. | 36 35 | 71 47 | 300 | 1242.0 |
| CHILLAN VIEJO | 36 38 | 72 08 | 140 | 1002.0 |
| CHILLAN | 36 37 | 72 07 | 140 | 1080.0 |
| SAN CARLOS DOS | 36 25 | 71 55 | 172 | 1065.0 |
| CHOLGUAN | 37 10 | 72 03 | 260 | 1442.0 |
| TRUPAN | 37 16 | 71 50 | 370 | 1724.0 |
| GENERAL CRUZ | 36 55 | 72 21 | 100 | 1292.0 |
| ATACALCO FDO. | 36 53 | 71 37 | 900 | 2359.0 |
| LAS TRANCAS | 36 54 | 71 33 | 1190 | 2437.0 |
| DIGUILLIN EMB. | 36 50 | 71 44 | 800 | 2056.0 |
| BELLA ROSA FDO. | 36 52 | 72 04 | 160 | 1314.0 |
| SAN LORENZO FDO. | 36 53 | 71 40 | 950 | 2368.0 |
| PEMUCO | 36 58 | 72 06 | 180 | 1319.0 |
| BULNES DOS | 36 45 | 72 19 | 83 | 1002.0 |
| NUEVA ALDEA | 36 39 | 72 27 | 30 | 1011.0 |
| CHILLANCITO | 36 45 | 72 29 | 65 | 905.0 |
| SAN IGNACIO PALOMARES | 36 38 | 72 36 | 15 | 1113.0 |
| COLEMU | 36 29 | 72 41 | 30 | 852.0 |
| LIRCAY | 36 20 | 72 21 | 130 | 713.0 |
| SAN NICOLAS RETEN | 36 29 | 72 18 | 120 | 852.0 |
| QUILPOLEMU HDA. | 36 23 | 72 39 | 300 | 1009.0 |
| QUIRIHUE | 36 17 | 72 33 | 257 | 758.0 |
| PENCO DOS. | 36 44 | 73 00 | 13 | 1192.0 |
| TOME | 36 37 | 72 57 | 5 | 1268.0 |
| NONQUEN | 36 52 | 72 58 | 145 | 1203.0 |
| CONCEPCION LICEO | 36 50 | 73 02 | 10 | 1162.0 |
| PUNTA HUALPEN | 36 46 | 73 12 | 48 | 496.0 |

| ESTACION | LAT | LON | ELEV | P |
|------------------------|------------------|--------------------|------|--------|
| | o ' ' o ' ' msnm | o ' ' o ' ' mm/año | msnm | mm/año |
| TALCAHUANO | 36 43 | 73 07 | 84 | 1169.0 |
| LAGUNA GALLETUE DESG. | 38 41 | 71 14 | 1050 | 1375.0 |
| LONQUIMAY | 38 26 | 71 14 | 1000 | 1943.0 |
| TROYO | 38 14 | 71 18 | 650 | 2260.0 |
| RALCO (PANGUE) | 37 53 | 71 37 | 550 | 4080.0 |
| QUEUCO BAJO LLALLAHUEN | 37 51 | 71 38 | 480 | 3160.0 |
| HUACHI | 37 38 | 71 44 | 600 | 2213.0 |
| CERRO EL PADRE | 37 46 | 71 53 | 400 | 2149.0 |
| QUILACO | 37 41 | 72 00 | 225 | 1600.0 |
| SANTA BARBARA | 37 40 | 72 02 | 225 | 1540.0 |
| VILLACURA RETEN | 37 33 | 71 55 | 357 | 1725.0 |
| DUQUECO | 37 31 | 72 20 | 120 | 1080.0 |
| HUAMAN FDO. | 37 26 | 72 15 | 166 | 1124.0 |
| EL TORREON | 37 23 | 72 56 | 200 | 1490.0 |
| MULCHEN | 37 43 | 72 14 | 130 | 1192.0 |
| SAN JOSE DE MUNILQUE | 37 35 | 72 25 | 125 | 1104.0 |
| SAN LUIS DE MALVEN | 37 40 | 72 25 | 15 | 1193.0 |
| SANTA FE | 37 28 | 72 37 | 77 | 1145.0 |
| LOS GUINDOS | 38 03 | 71 49 | 440 | 3550.0 |
| EL MORRO HDA. | 38 01 | 71 57 | 400 | 2480.0 |
| LAGUNA DEL MALLECO | 38 13 | 71 49 | 830 | 2653.0 |
| COLLIPULLI | 37 57 | 72 26 | 240 | 1287.0 |
| EL FISCAL FDO. | 37 53 | 72 26 | 244 | 1084.0 |
| LOS SAUCES FDO. | 37 59 | 72 49 | 111 | 727.0 |
| ANGOL (LOS ESTANQUES) | 37 48 | 72 42 | 79 | 1059.0 |
| EL TAMBILLO | 37 33 | 72 40 | 125 | 1260.0 |
| NACIMIENTO | 37 30 | 72 41 | 57 | 1377.0 |
| LAS ACHIRAS FDO. | 37 21 | 72 23 | 140 | 1135.0 |
| TUCAPEL RETEN | 37 17 | 71 57 | 335 | 1329.0 |
| HUAQUI | 37 23 | 72 12 | 200 | 1487.0 |
| COLONIA SAN GERARDO | 37 32 | 71 50 | 350 | 1120.0 |
| LOS ANGELES | 37 28 | 72 21 | 109 | 1155.0 |
| DESAGUE LAGO LAJA | 37 22 | 71 22 | 1375 | 2197.0 |
| POLCURA EN BALSEADERO | 37 19 | 71 32 | 740 | 2176.0 |
| CENTRAL ABANICO | 37 21 | 71 30 | 765 | 2190.0 |
| ANTUCO | 37 20 | 71 40 | 602 | 1330.0 |
| LA PALMA | 37 15 | 72 35 | 160 | 986.0 |
| LOS QUILLAYES | 37 15 | 72 32 | 112 | 1217.0 |
| CABRERO DOS. | 37 01 | 72 24 | 130 | 953.0 |
| SAN CRISTOBAL FDO. | 37 10 | 72 35 | 110 | 1026.0 |
| BATUCO EN YUMBEL | 37 08 | 72 18 | 150 | 1080.0 |
| LA AGUADA | 37 10 | 72 25 | 150 | 1250.0 |
| LAJA | 37 16 | 72 42 | 140 | 1015.0 |
| HUALQUI DOS. | 36 58 | 72 57 | 21 | 1368.0 |
| LLEPINHUE | 36 57 | 71 55 | 22 | 1509.0 |
| CHIGUAYANTE DOS. | 36 55 | 73 02 | 18 | 1580.0 |
| CERRO CARACOL DOS. | 36 50 | 73 03 | 100 | 1120.0 |
| ISLA SANTA MARIA | 36 59 | 73 32 | 79 | 850.8 |
| LOTA | 37 05 | 73 10 | 10 | 1239.0 |
| CORONEL | 37 01 | 73 10 | 5 | 1110.0 |
| LA COLCHA FDO. | 37 15 | 73 15 | 30 | 1498.0 |
| ARAUCO | 37 15 | 73 19 | 10 | 1419.0 |
| CURANILAHUE | 37 29 | 73 20 | 140 | 1937.0 |
| LEBU | 37 35 | 73 40 | 8 | 1447.0 |
| CANETE | 37 48 | 73 24 | 25 | 1374.0 |
| ANTIQUINA FDO. | 38 03 | 73 21 | 20 | 1228.0 |
| ISLA MOCHA | 38 21 | 73 58 | 18 | 1149.0 |

IX REGION

| | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-----|--------|
| CONTULMO | 38 02 | 73 13 | 30 | 1723.0 |
| PUREN | 38 02 | 73 03 | 90 | 1408.0 |
| LUMACO | 38 09 | 72 55 | 160 | 970.0 |
| VICTORIA (LAS MERCEDES) | 38 14 | 72 20 | 350 | 1467.0 |
| SAN ELIAS FDO. | 38 14 | 72 22 | 300 | 1588.0 |
| TRAIQUEN | 38 15 | 72 40 | 170 | 1373.0 |
| SELVA OSCURA | 38 21 | 72 11 | 449 | 1239.0 |
| QUILLEN | 38 27 | 72 25 | 280 | 1267.0 |
| GALVARINO | 38 24 | 72 47 | 45 | 912.0 |
| EL AROMO | 38 25 | 72 52 | 46 | 993.0 |
| NUEVA IMPERIAL | 38 45 | 72 56 | 26 | 721.0 |
| MANZANAR | 38 28 | 71 42 | 780 | 2230.0 |
| MALALCAHUELLO | 38 28 | 71 34 | 920 | 2067.0 |
| CURACAUTIN | 38 26 | 71 53 | 571 | 2023.0 |
| LAUTARO | 38 31 | 72 26 | 210 | 1442.0 |
| CERRO NIELOL | 38 43 | 72 36 | 120 | 1267.0 |
| TEMUCO PUEBLO NUEVO | 38 44 | 72 45 | 115 | 1265.0 |
| PADRE LAS CASAS | 38 46 | 72 35 | 111 | 1275.0 |
| TEMUCO | 38 46 | 72 38 | 114 | 1217.0 |
| CHERQUENCO | 38 41 | 72 00 | 526 | 2039.0 |

| ESTACION | LAT o ' | LON o ' | ELEV msnm | P mm/año |
|---------------------|------------|------------|--------------|-------------|
| VILCUN | 38 40 | 72 14 | 290 | 1757.0 |
| FREIRE | 38 56 | 72 39 | 100 | 1579.0 |
| FREIRE CPTO. FISCAL | 38 56 | 72 39 | 100 | 1606.0 |
| BOROA MISION | 38 50 | 72 51 | 103 | 1036.0 |
| CARAHUE | 38 43 | 73 09 | 10 | 777.0 |
| PUERTO SAAVEDRA | 38 47 | 73 24 | 5 | 1183.0 |
| CUNCO | 38 55 | 72 02 | 385 | 1977.0 |
| LOS LAURELES | 38 59 | 72 14 | 190 | 2128.0 |
| QUECHEREGUA | 39 00 | 72 02 | 420 | 2081.0 |
| DESAGUE LAGO COLICO | 39 03 | 72 04 | 93 | 2238.0 |
| SANTA ADELA FDO. | 39 06 | 72 13 | 240 | 2472.0 |
| CURACO EN LA BALSA | 39 03 | 72 12 | 250 | 2238.0 |
| CURARREHUE | 39 21 | 71 36 | 530 | 2487.0 |
| LLAFENCO RETEN | 39 20 | 71 47 | 300 | 3367.0 |
| CABURGUA | 39 10 | 71 46 | 480 | 3768.0 |
| PUCON | 39 16 | 71 58 | 215 | 2100.0 |
| VILLARRICA | 39 17 | 72 14 | 250 | 2159.0 |
| FLOR DEL LAGO | 39 09 | 72 07 | 300 | 2608.0 |
| LA CASCADA FDO. | 39 20 | 71 58 | 1200 | 2173.0 |
| QUITRATUE | 39 09 | 72 40 | 90 | 2264.0 |
| ALLIPEN CHIDUCO | 39 01 | 72 27 | 220 | 2189.0 |

X REGION

| | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-----|--------|
| MEHUIN | 39 22 | 73 13 | 22 | 1537.0 |
| PIRIHUEICO | 40 02 | 71 42 | 600 | 2962.0 |
| PUERTO FUI | 39 52 | 71 54 | 596 | 4440.0 |
| HUAHUM EN LA FRONTERA | 40 05 | 71 41 | 654 | 2364.0 |
| HUILO-HUILO | 39 49 | 72 00 | 320 | 3392.0 |
| DESAGUE LAGO NELTUME | 39 49 | 71 58 | 450 | 3437.0 |
| DESAGUE LAGO CALAFQUEN | 39 33 | 72 04 | 200 | 2148.0 |
| CENTRAL PULLINQUE | 39 35 | 72 13 | 145 | 2096.0 |
| PANGUIPULLI | 39 39 | 72 20 | 140 | 2297.0 |
| CHAN-CHAN | 39 51 | 72 08 | 130 | 4284.0 |
| DESAGUE LAGO RIÑIHUE | 39 46 | 72 28 | 130 | 2433.0 |
| REUMEN | 39 58 | 72 51 | 170 | 2284.0 |
| ANTILHUE | 39 47 | 72 58 | 15 | 1922.0 |
| MAFIL | 39 53 | 72 57 | 25 | 1017.0 |
| LLANCAHUE | 39 50 | 73 10 | 80 | 2103.0 |
| VALDIVIA | 39 49 | 73 14 | 5 | 2307.0 |
| VISTA ALEGRE | 39 48 | 73 13 | 100 | 2266.0 |
| LA PAZ | 39 24 | 72 43 | 94 | 1718.0 |
| LONCOCHE | 39 22 | 72 38 | 120 | 2191.0 |
| PURULON (ESC. AGRICOLA) | 39 28 | 72 36 | 95 | 2245.0 |
| S. JOSE DE LA MARIQUINA | 39 31 | 72 58 | 40 | 1515.0 |
| MINA EL ROBLE | 39 34 | 72 46 | 100 | 2193.0 |
| NIEBLA | 39 52 | 73 24 | 40 | 2261.0 |
| PUERTO MARIN | 40 15 | 72 03 | 130 | 4755.7 |
| PUNIRO | 40 16 | 72 12 | 140 | 3306.2 |
| LAGO RANCO | 40 19 | 72 28 | 75 | 1946.6 |
| ISLA HUAPI | 40 13 | 72 24 | 90 | 1690.7 |
| CALCURRUPE EN LLIFEN | 40 13 | 72 16 | 90 | 2091.0 |
| FUTRONO | 40 08 | 72 24 | 90 | 1553.5 |
| COTRILLAR FDO. | 40 07 | 72 30 | 280 | 1641.2 |
| RIO BUENO | 40 18 | 72 56 | 70 | 1191.0 |
| LA UNION SENDOS | 40 18 | 73 06 | 29 | 1157.3 |
| QUILLACO L. RANCO | 40 18 | 73 30 | 79 | 1769.9 |
| CHOROICO FDO. | 40 11 | 72 54 | 88 | 1339.0 |
| LAGO PUYEHUE | 40 41 | 72 32 | 220 | 1515.3 |
| CENTRAL PILMAIQUEN | 40 32 | 72 40 | 103 | 2016.5 |
| SAN PABLO | 40 25 | 73 01 | 60 | 1346.1 |
| TRUMAO | 40 21 | 73 07 | 11 | 994.0 |
| RIO BONITO-RUPANCO | 40 52 | 72 77 | 82 | 3140.8 |
| RUPANCO | 40 51 | 72 21 | 172 | 1701.7 |
| CASMA | 41 01 | 73 07 | 113 | 1228.7 |
| PURRANQUE | 40 56 | 73 09 | 112 | 1505.8 |
| BARROS BLANCOS CAMPEX | 40 34 | 73 04 | 27 | 1276.8 |
| ISLA FRESIA | 40 39 | 72 25 | 220 | 1845.4 |
| OSORNO | 40 35 | 73 06 | 50 | 1384.0 |
| FORESTAL HDA. | 40 15 | 73 30 | 40 | 1974.0 |
| VENECIA | 40 15 | 73 42 | 200 | 3120.9 |
| PUERTO VARAS | 41 20 | 72 59 | 74 | 1725.4 |
| MIRADOR FDO. | 41 20 | 72 57 | 74 | 1707.2 |
| LLANQUIHUE | 41 14 | 72 58 | 54 | 1422.5 |
| PUERTO OCTAY | 40 59 | 72 52 | 40 | 1515.2 |
| GERMANIA COLEGIO | 41 20 | 73 07 | 150 | 1697.3 |
| GUTAMANGA | 41 39 | 73 29 | 50 | 2410.5 |
| MAULLIN | 41 37 | 73 35 | 47 | 1789.8 |
| PTO. MONTT (EL TEPUAL) | 41 26 | 73 07 | 81 | 1910.6 |
| LAGO CHAPO EN CEDRO | 41 31 | 72 27 | 247 | 4523.1 |
| CANUTILLAR EN PORTEZUELO | 41 31 | 72 22 | 550 | 4519.1 |

| ESTACION | LAT | LON | ELEV | P |
|--------------------------------|-------|-------|------|--------|
| | o ' " | o ' " | msnm | mm/año |
| DESAGUE LAGO CHAPO | 41 26 | 72 35 | 247 | 3304.1 |
| CASA PANGUE | 41 03 | 71 53 | 320 | 3397.2 |
| LAGO TODOS LOS SANTOS | 41 39 | 72 11 | 28 | 3119.4 |
| CAYUTUE | 41 10 | 72 16 | 221 | 3929.8 |
| PUNTA HUANO | 41 08 | 72 17 | 186 | 3162.3 |
| PETROHUE EN LAGO T. LOS SANTOS | 41 08 | 72 25 | 150 | 3798.2 |
| ENSENADA | 41 12 | 72 32 | 51 | 2456.3 |
| COCHAMO | 41 30 | 72 19 | 10 | 3333.0 |
| MANSO EN LA FRONTERA | 41 31 | 71 51 | 485 | 2455.2 |
| MANSO EN JTA. CON PUELO | 41 44 | 72 03 | 45 | 3095.8 |
| PUELO EN LLANADA GRANDE | 41 52 | 71 56 | 250 | 2581.0 |
| PUELO EN JUNTA CON MANSO | 41 45 | 72 03 | 50 | 3310.0 |
| LAGO TAGUA TAGUA EN DESAGUE | 41 39 | 72 11 | 28 | 3232.0 |
| PUELO EN CARRERA BASILIO | 41 38 | 72 16 | 8 | 3891.0 |
| RINIHUE | 42 34 | 71 30 | 5 | 5343.0 |
| CHAITEN | 42 54 | 72 45 | 20 | 3543.0 |
| LAGO ESPOLON EN DESAGUE | 43 13 | 71 57 | 780 | 2405.0 |
| FUTALEUFU EN LA FRONTERA | 43 10 | 71 45 | 500 | 1438.0 |
| FUTALEUFU | 43 12 | 71 52 | 330 | 2252.8 |
| PUERTO RAMIREZ | 43 27 | 72 09 | 62 | 3775.0 |
| PUERTO CARDENAS | 43 12 | 72 27 | 62 | 4680.0 |
| TRES CRUCES | 41 50 | 73 29 | 25 | 2063.3 |
| CASTRO | 42 29 | 73 48 | 30 | 1886.1 |
| QUELLON | 43 10 | 73 43 | 4 | 2007.2 |
| ANCUD | 41 52 | 73 49 | 30 | 2965.2 |
| PUNTA CORONA | 41 47 | 73 52 | 48 | 2113.1 |
| ISLA GUAFO | 43 34 | 74 45 | 140 | 1234.2 |

XI REGION

| | | | | |
|------------------------------|-------|-------|------|--------|
| ALTO PALENA | 43 37 | 71 47 | 226 | 1652.1 |
| VALLE CALIFORNIA | 43 40 | 71 37 | 320 | 1576.0 |
| PALENA EN LA FRONTERA | 43 35 | 71 45 | 230 | 1365.0 |
| RIO FRIO | 43 35 | 72 20 | 80 | 4030.0 |
| LAGO VERDE | 44 14 | 71 53 | 402 | 1495.0 |
| FUNDO RISOPATRON | 43 45 | 72 35 | 10 | 4667.0 |
| PUERTO PUYUHUAPI | 44 19 | 72 34 | 5 | 3620.6 |
| RIO CISNES | 44 30 | 71 19 | 710 | 514.9 |
| PUERTO CISNES | 44 45 | 72 45 | 7 | 3939.4 |
| MANIHUALES | 45 10 | 72 09 | 400 | 1789.3 |
| BALMACEDA | 45 54 | 71 43 | 520 | 837.5 |
| COIHAIQUE (ESC. AGRICOLA) | 45 34 | 72 01 | 343 | 1190.0 |
| COIHAIQUE ALTO | 45 29 | 71 39 | 771 | 369.2 |
| DESAGUE LAGO CARO | 45 48 | 72 36 | 285 | 2909.0 |
| PUERTO AISEN | 45 24 | 72 42 | 10 | 2802.5 |
| PUERTO CHACABUCO | 45 29 | 72 59 | 1 | 2945.4 |
| ISTMO OFQUI | 46 44 | 74 00 | 25 | 2933.0 |
| CABO RAPER | 46 50 | 75 41 | 40 | 2625.3 |
| PUERTO IBAÑEZ | 46 15 | 72 00 | 215 | 512.0 |
| VILLA CASTILLO | 46 07 | 72 10 | 270 | 774.2 |
| PUERTO CRISTAL | 46 38 | 72 22 | 208 | 681.3 |
| PUERTO GUADAL | 46 51 | 72 41 | 230 | 822.1 |
| COLONIA | 47 15 | 72 38 | 150 | 715.5 |
| COCHRANE | 47 16 | 72 38 | 100 | 708.0 |
| CHILE CHICO | 46 32 | 71 44 | 215 | 354.5 |
| BAKER BAJO LOS ÑADIS | 47 32 | 73 02 | 25 | 1589.8 |
| LAGO VARGAS | 47 40 | 73 03 | 20 | 1885.0 |
| PUERTO BERTRAND | 47 01 | 72 43 | 100 | 1314.1 |
| LAGO O'HIGGINS EN LA FLORIDA | 48 40 | 72 35 | 914 | 245.2 |
| LAGO O'HIGGINS EN TENENCIA | 48 55 | 72 44 | 300 | 764.5 |
| PASCUA EN LAGO QUETRU | 48 13 | 73 10 | 20 | 2985.0 |
| ESTANCIA BAKER | 47 12 | 71 58 | 1200 | 409.0 |
| SAN PEDRO | 47 43 | 74 55 | 22 | 4293.8 |

A N E X O I

CALIDAD DEL DRENAJE

- Modelación del tiempo de drenaje.
- Ajuste por variación de la porosidad cinemática
- Ajuste por variación del espesor de la base
- Cálculo aproximado de la permeabilidad

MODELACION DEL TIEMPO DE DRENAJE

El Tiempo de Drenaje (T_{50}) es el período que requiere una determinada estructura en drenar el 50% del agua libre a partir de un estado 100% saturado.

En este trabajo se presenta un modelo con régimen impermanente para determinar el tiempo de drenaje con evacuación horizontal y vertical del agua libre existente. Dicho modelo queda determinado por la ecuación que define el flujo de régimen permanente en un acuífero libre entre dos zanjas paralelas (Ec. *) y la variación de las condiciones de borde a medida que aumenta el volumen drenado. Es decir, el régimen impermanente se modela discretizando el drenaje en pequeños intervalos con modelos de flujo permanente.

Las variables involucradas en el modelo son:

- Ancho (de la calzada + berma) = L [cm]
- (Si existe un dren, L se mide hasta el dren)
- Espesor de la base = d [cm]
- Porosidad cinemática = n_c
- Bombeo = i [%]
- Altura de subrasante = H_o [cm]
- Permeabilidad de la base = K_b [cm/s]
- Permeabilidad de la subrasante = K_{sr} [cm/s]

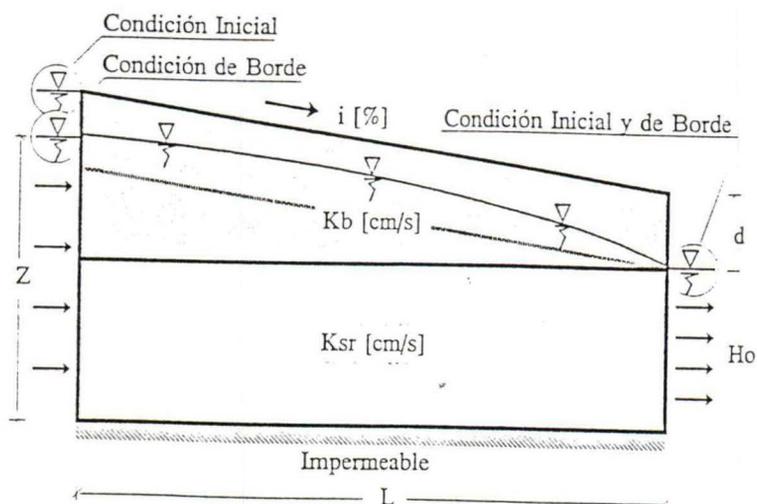


FIGURA I.1. Esquema del modelo para determinar el T_{50} .

Tanto las variables involucradas como las condiciones de borde consideradas en el modelo se grafican en la Figura I.1.

La ecuación que describe el caudal de salida en el modelo propuesto, se expresa como:

$$Q = \frac{K_{eq}}{2L} (Z^2 - H_0^2) \quad \left[\frac{cm^3}{s} \right] \quad (\text{Ec. } *)$$

donde Z queda definido en la Figura I.1 y K_{eq} es la permeabilidad equivalente considerando la base y subrasante:

$$K_{eq} = \frac{\left(\frac{Z-H_0}{2}\right) K_b + H_0 K_{SR}}{\left(\frac{Z-H_0}{2}\right) + H_{SR}} \quad \left[\frac{cm}{s} \right]$$

El modelo opera calculando el tiempo que demora la estructura en drenar una altura de agua equivalente a 5 mm; luego bajando la altura de la condición de borde de la izquierda de la Figura I.1 en 5 mm, se vuelve a calcular el tiempo requerido en drenar un volumen equivalente a 5 mm de altura de agua. Este procedimiento se realiza sucesivamente hasta que el agua en la base alcanza a la mitad de su altura. La suma de los intervalos de tiempo determina el tiempo de drenaje (T_{50}).

El modelo fue aplicado en una estructura considerada como "típica" de pavimento variando las permeabilidades de la base y subrasante (Gráfico N° 1). En seguida se analizó lo que sucedía al modificar las características geométricas de la estructura (una cada vez); se comprobó que el tiempo de drenaje es función de esos parámetros y de la relación que exista entre las permeabilidades de la base y subrasante (sólo el efecto de la variación de la porosidad cinemática es independiente de las permeabilidades). En consecuencia se propone determinar el tiempo de drenaje partiendo de un T_{50}' para la estructura típica y luego ajustarlo (multiplicando por factores) por el efecto que implican condiciones diferentes.

Como los factores de ajuste para corregir el T_{50}' se determinaron considerando el conjunto de características (sección tipo) constantes y variando sólo la característica

de interés, se verificó mediante algunos ejemplos que la variación simultánea de varias características no produce un error considerable en el cálculo del tiempo de drenaje. Es decir, los factores de ajuste entregan las derivadas parciales de las variables dado un grupo de características (sección tipo). Sin embargo, si se considera otro grupo de características el error que se comete es despreciable. A continuación se ilustran dos de los ejemplos realizados:

Considere una sección con las siguientes características:

| | | |
|------------|---|---------|
| Largo | = | 1000 cm |
| Espesor | = | 20 cm |
| Porosidad | = | 10 % |
| Bombeo | = | 2,5 % |
| Alt. Subr. | = | 30 cm |

| | | | |
|-----|----------|---|------------|
| Con | K_b | = | 0,01 cm/s |
| | K_{sr} | = | 0,001 cm/s |

Por gráficos se tiene (valores exactos de factores de ajuste):

$$T_{50} = 0,971 \text{ días} \times 1,66 \times 0,8333 \times 0,811 \times 1,1379$$

$$= 1,29 \text{ días}$$

Con la aplicación directa del modelo se tiene el T_{50} real:

$$T_{50} = 1,26 \text{ días}$$

Por otro lado, considere la sección:

| | | |
|------------|---|--------|
| Largo | = | 400 cm |
| Espesor | = | 29 cm |
| Porosidad | = | 15 % |
| Bombeo | = | 3 % |
| Alt. Subr. | = | 100 cm |

| | | | |
|-------|----------|---|------------|
| y con | K_b | = | 0,01 cm/s |
| | K_{sr} | = | 0,001 cm/s |

Por gráficos se tiene:

$$T_{50} = 0,971 \text{ días} \times 0,61 \times 1,25 \times 0,671 \times 0,7677$$

$$= 0,40 \text{ días}$$

Y con la aplicación directa del modelo: $T_{50} = 0,45 \text{ días}$ (real)

AJUSTE POR VARIACION DEL ESPESOR DE LA BASE

Entre los parámetros que afectan el tiempo de drenaje, está el espesor de la base a drenar. En el Gráfico I.1, se muestra el factor de ajuste en función de este parámetro y de la relación de permeabilidades entre la base y la sub-rasante.

En el Gráfico I.2, se muestra la variación del tiempo de drenaje en función del espesor de la base y para varias relaciones de permeabilidad entre la base y la sub-rasante (se consideró $K_b = 10E(-3)$). Se comprueba que para los rangos habituales de espesores de base más sub-base (15 a 35 cm), el efecto es muy poco significativo. Consecuentemente se propone no considerar el efecto de variación del espesor de la base, dado la poca relevancia que ello tiene en el tiempo de drenaje. En todo caso, si se decidiera considerarlo, debe adoptarse un factor de ajuste igual a la unidad cuando $K_{sr} = K_b$.

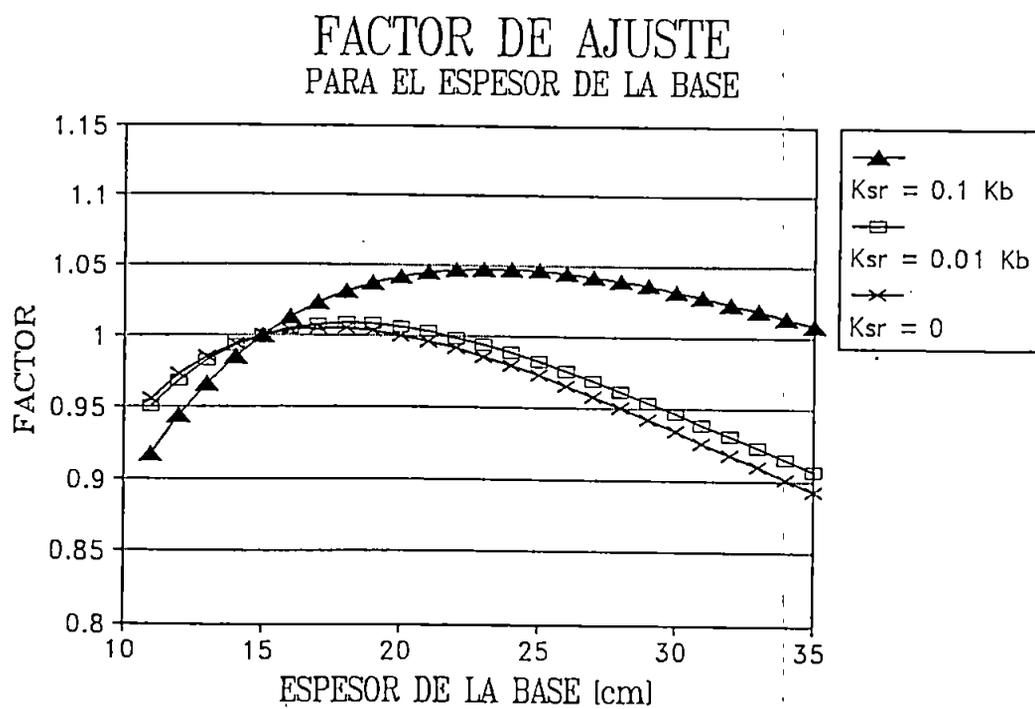


GRAFICO I.1

VARIACION DEL ESPESOR DE LA BASE

$$K_b = 1 \text{ E}(-4)$$

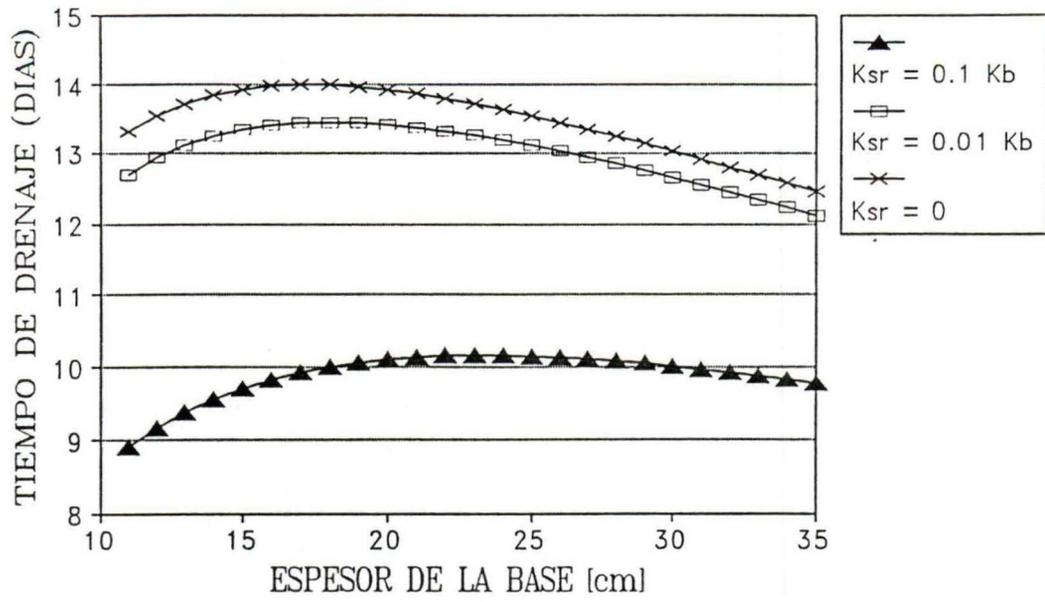


GRAFICO I.2

- AJUSTE POR VARIACION DE LA POROSIDAD CINEMATICA

El Gráfico N° 1 permite calcular los T_{50}' para las condiciones de la Sección Tipo y para una porosidad cinemática (agua libre) del 12%. En el caso que en un proyecto se prevea una porosidad muy diferente del valor usado en el Gráfico N° 1, el T_{50}' calculado debe corregirse afectándolo por un factor de ajuste C4, a determinar del Gráfico I.3.

La POROSIDAD TOTAL (n) es igual a 1 menos la razón entre la densidad compactada seca (D.C.S.) y el peso específico de los sólidos (P.E.S.). Es decir:

$$n = 1 - D.C.S./P.E.S.$$

Ahora bien, el volumen de agua a drenar es el agua libre contenida en el suelo, es decir, aquella susceptible de evacuar por medios gravitacionales. El agua libre o porosidad cinemática (n_c) es una fracción de n . Por lo tanto:

$$n_c = r \cdot n$$

Para suelos sin finos, normalmente se acepta que $r = 0,80$ (80% del agua de saturación es libre). Para suelos con algún contenido de finos el valor de "r" se puede determinar a partir de la Tabla I.1.

| MATERIAL | CANTIDAD DE FINOS | | | | | | | | |
|--------------|-------------------|------|---------|--------------|------|---------|--------------|------|---------|
| | < 2.5% | | | 5% | | | 10% | | |
| | TIPO DE FINO | | | TIPO DE FINO | | | TIPO DE FINO | | |
| PREDOMINANTE | FILLER | LIMO | ARCILLA | FILLER | LIMO | ARCILLA | FILLER | LIMO | ARCILLA |
| GRAVA | 0,70 | 0,60 | 0,40 | 0,60 | 0,40 | 0,20 | 0,40 | 0,30 | 0,10 |
| ARENA | 0,57 | 0,50 | 0,35 | 0,50 | 0,35 | 0,15 | 0,25 | 0,18 | 0,08 |

Tabla I.1.

Porcentaje (r) del agua susceptible de Drenar (Ref. 2)

Una vez determinado el valor de n_c , el Gráfico I.3 permite determinar el Factor de Ajuste, C_4 , por el cual debe multiplicarse el T_{50}' calculado según el Gráfico N° 1.

Se recuerda, que la porosidad y la permeabilidad no son variables independientes en un determinado suelo, tal como lo muestran las expresiones de la FHWA y Kozeny, incluidas en este mismo Anexo. En consecuencia, un cambio en la porosidad determina una modificación de la permeabilidad.

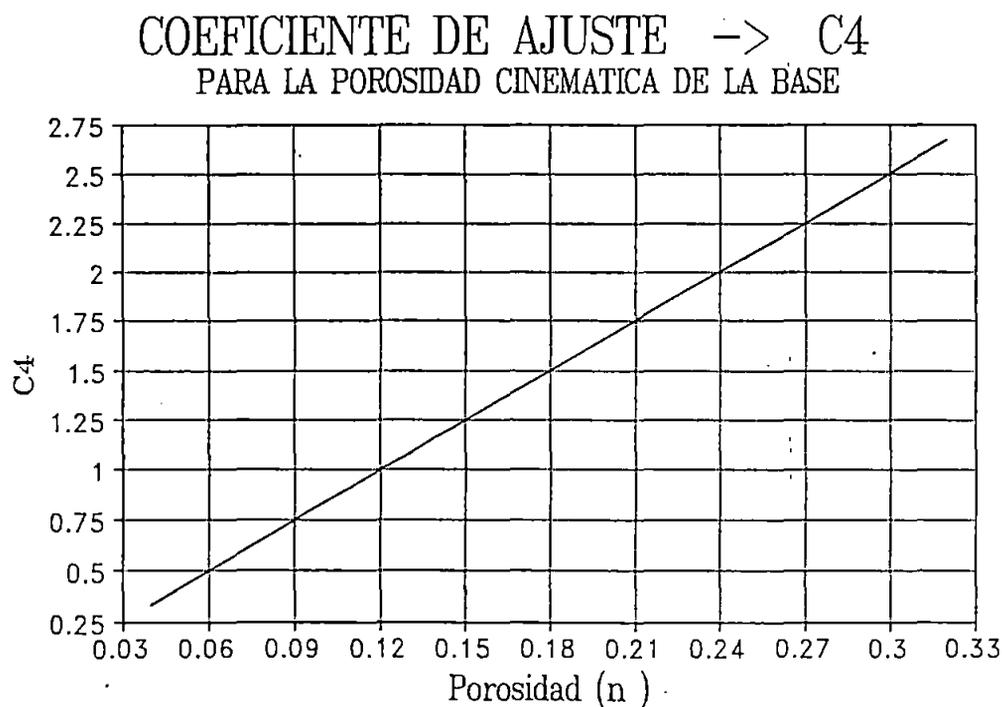


Gráfico I.3

- CALCULO APROXIMADO DE LA PERMEABILIDAD

Con el propósito de estimar la permeabilidad de las bases no tratadas, se estudiaron distintas fórmulas empíricas y teóricas que calculan el coeficiente hidráulico a partir de datos granulométricos y de mecánica de suelos (Ref. 5). Dichas fórmulas, en general, entregan resultados bastante aproximados a la realidad en suelos gruesos, es decir, con bajo contenido de finos; a medida que estos aumentan, los resultados son más imprecisos.

1) Fórmula de Hazen:

Esta fórmula empírica es utilizada por AASHTO (Ref. 1) y se caracteriza por su sencillez, incluye sólo una característica del suelo.

$$K = C d_{10}^2 \left[\frac{cm}{s} \right]$$

d_{10} [cm] : Diámetro por el cual pasa el 10% del material.
 C : Coeficiente que varía entre 90 y 120. (aprox. 100)

2) Fórmula de la FHWA :

Es una fórmula empírica que AASHTO (1993) recomienda para ser usada en bases de pavimentos:

$$K = \frac{219,22 d_{10}^{1,478} (n)^{6,654}}{(P_{200})^{0,597}} \left[\frac{cm}{s} \right]$$

d_{10} [cm] : Diámetro por el cual pasa el 10% del material.
 n : Porosidad total.
 P_{200} : Porcentaje que pasa la malla ASTM #200

3) Fórmula de Kozeny (Fair & Hatch, 1933):

Esta fórmula tiene fundamentos teóricos y un ajuste de coeficientes en forma empírica. Además, considera más características del material que las otras fórmulas.

$$K = 10^5 \beta \frac{n^3}{(1-n)^2} \left[\frac{\alpha}{100} \sum_m \frac{P_m}{d_m} \right]^{-2} \left[\frac{cm}{s} \right]$$

- P_m : Porcentaje que pasa entre dos mallas adyacentes.
 d_m : Media geométrica entre dos mallas adyacentes [cm].
 n : Porosidad total.
 α : Coeficiente de forma de los granos $\rightarrow 6$
 β : Coeficiente $\rightarrow 5$

Para verificar la bondad de las fórmulas precedentes, ellas se usaron para calcular la permeabilidad que correspondería a seis granulometrías de bases (sin finos) que figuran en la Ref. 1 y para las cuales se señalan los respectivos coeficientes de permeabilidad (aparentemente los valores de K fueron medidos). Para la porosidad total se asumió el valor 0,15.

El Gráfico I.4 muestra que tanto la fórmula de Kozeny como la de Hazen dan resultados igualmente próximos a los reales y por lo tanto podrían utilizarse con un grado de confiabilidad semejante. Sin embargo, debido a su simplicidad, se acostumbra utilizar la fórmula de Hazen para los cálculos de la permeabilidad.

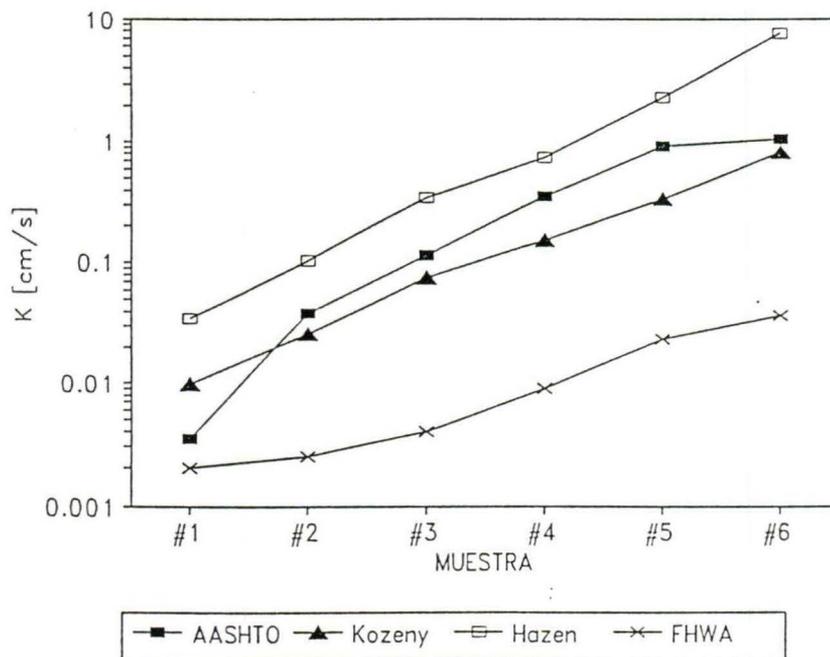


GRAFICO I.4. Comparación de las fórmulas para estimar permeabilidad.

A N E X O I I

TIEMPO DE SATURACION

- Tiempo de Saturación.
- Tasa de Infiltración
- Aplicación del modelo a diferentes secciones
- Modelación de las precipitaciones.
- Resumen de la modelación del Tiempo de Saturación.
- Ejemplo de aplicación del modelo.

TIEMPO DE SATURACION

Para estimar el porcentaje de tiempo del año en que una base presenta un contenido de humedad cercano a la saturación, se diseñó un modelo que entrega la altura de agua en la base conjugando la tasa de infiltración, las características del suelo y la cantidad y distribución de lluvias (Figura II.1).

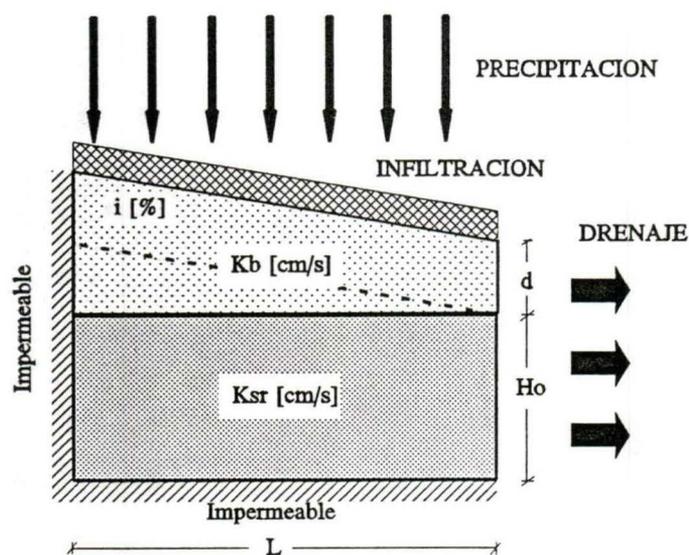


FIGURA II.1. Esquema del modelo Lluvia-Infiltración-Drenaje.

El modelo Lluvia-Infiltración-Drenaje calcula el tiempo que demora en bajar 1 mm el nivel de agua de la base; luego se resta 1 mm. de altura de agua y se agrega el agua correspondiente a lo precipitado en el lapso (la precipitación infiltra completamente en tanto la intensidad sea menor o igual a la tasa de infiltración). Reiterando el procedimiento para un año completo, se calcula el porcentaje de tiempo en que la altura de agua está por sobre el nivel medio de la base, es decir, se establece el Tiempo de Saturación.

En los párrafos siguientes se presentan las modelaciones, hipótesis y simplificaciones que se asumieron para representar adecuadamente la PRECIPITACION, la INFILTRACION y las CARACTERISTICAS DE LA SECCION.

TASA DE INFILTRACION

AASHTO (Ref.1), propone una fórmula empírica para determinar la tasa de infiltración:

$$Q_i = I_c \left(\frac{N_c}{W} + \frac{W_c}{WC_s} \right) + K_p \quad \left[\frac{ft^3/dia}{Area\ de\ Pav.} \right]$$

en que:

Q_i : Caudal por unidad patrón de área de pavimento

I_c : Tasa de infiltración de grietas [$ft^3/día/ft^2$]; la Ref. 1 sugiere adoptar $I_c = 2,4$.

N_c : Número de juntas longitudinales que contribuyen. Normalmente se adopta $N_c = N + 1$, donde N es el número de vías de la calzada.

W_c : Longitud de juntas transversales [ft]

WC_s : Espaciamiento entre juntas transversales [ft]

K_p : Permeabilidad de la capa de rodado [$ft/día$] ($K_p = 0$ salvo en casos especiales como mezclas tipo "open graded")

W : Ancho de la base sujeta a infiltración [ft]

En la Ref. 1, se asegura que, aun cuando la expresión es dimensionalmente incorrecta, permite evaluar adecuadamente la tasa de infiltración.

PLANTA

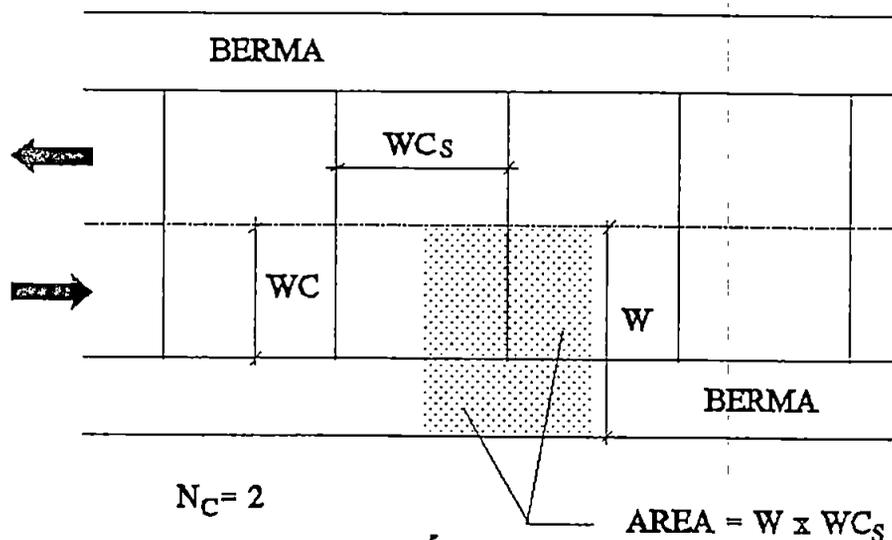


FIGURA II.2. Esquema del modelo de infiltración.

La aplicación de la fórmula expuesta entrega tasas de infiltración extremadamente bajas (del orden de 3 a 4 mm/día) que se contradicen con algunos otros estudios que han analizado el tema (Ref. 2 y 3), sin embargo el procedimiento parece ser adecuado a pesar de las limitaciones que presenta. En todo caso, teniendo en consideración lo detectado en otros estudios, a lo que se agrega que para el país debe normalmente esperarse que el nivel de conservación de los pavimentos sea menor que el de los Estados Unidos, se optó por modelar una situación que se supone sería más real para el país: se considera que en un pavimento de hormigón existen grietas transversales a un espaciamiento medio de 2 m. Esta menor distancia pretende representar tanto juntas normales con un sellado deteriorado como la existencia de grietas transversales que aparecen durante la vida útil del pavimento. (La infiltración por las grietas y juntas longitudinales sería despreciable, según la fórmula adoptada).

Con el modelo modificado, de acuerdo con los dos esquemas que se muestran en las Figuras II.3 y II.4, se obtiene un valor medio de infiltración de 11 mm/día, esto es considerablemente mayor que lo señalado en la Ref. 1, pero aún bastante por debajo de lo que señalan otras publicaciones. En el Anexo III, se analiza la influencia de este parámetro en los espesores de pavimento, comprobándose que la tasa de infiltración tiene alguna influencia para drenajes de calidad "bueno" y "regular" y que no afecta cuando ellos se califican como "excelente", "malo" y "muy malo".

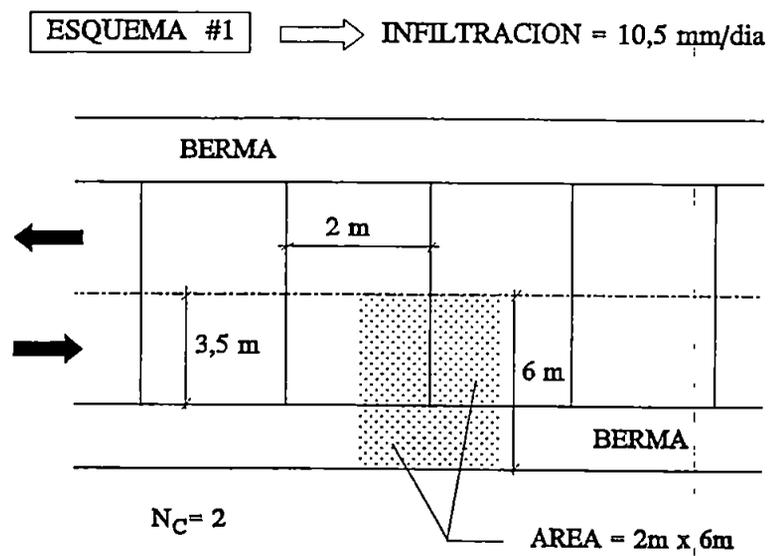


FIGURA II.3. Esquema del modelo de Infiltración aplicado a calzada bidireccional.

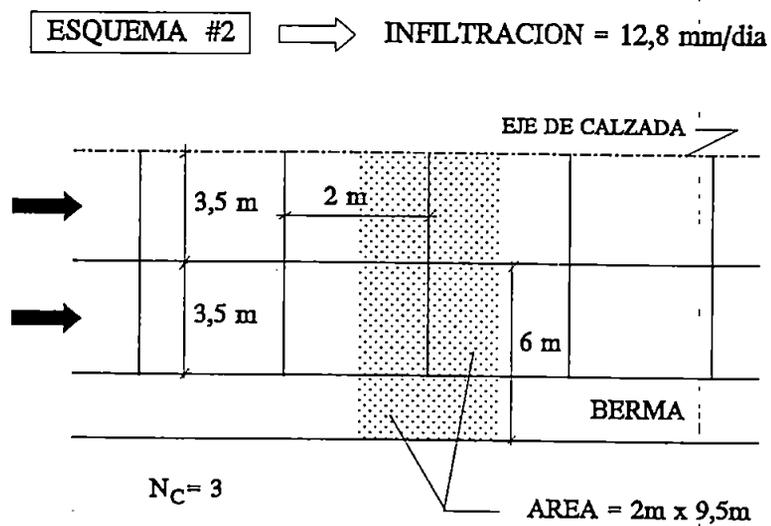


FIGURA II.4. Esquema del modelo de Infiltración aplicado a calzada unidireccional.

APLICACION DEL MODELO A DIFERENTES SECCIONES

La simulación del proceso Lluvia-Infiltración-Drenaje con el modelo propuesto, implica que necesariamente deben incorporársele las características geométricas y algunas propiedades del suelo a drenar. Surge, en consecuencia, la interrogante sobre como varían los tiempos de drenaje para diversos grados de saturación, al modificarse las características de la sección.

Afortunadamente se verificó (Tabla II.1) que para secciones que tienen tiempos de drenajes (T_{50}) similares, la variación de estos parámetros influye muy poco en los tiempos de drenaje para diversos grados de saturación. Esto permite disminuir el número de variables con que se debe trabajar y simplifica substancialmente la obtención de resultados.

| | | CARACTERISTICAS DE LA SECCION | | | |
|-----------------|--|-------------------------------|--------|--------|--------|
| | | S. TIPO | S. 1 | S. 2 | S. 3 |
| Ancho [cm] | | 600 | 900 | 400 | 1100 |
| Espesor [cm] | | 15 | 20 | 25 | 20 |
| Porosidad [nc] | | 0,12 | 0,09 | 0,14 | 0,12 |
| Pendiente [%] | | 2 | 3 | 2,5 | 2 |
| Alt. Subr. [cm] | | 50 | 50 | 50 | 100 |
| K base [cm/s] | | 1E(-3) | 1E(-3) | 5E(-4) | 1E(-3) |
| K subr. [cm/s] | | 1E(-4) | 1E(-5) | 1E(-4) | 3E(-4) |
| T10 [días] | | 1,552 | 1,602 | 1,459 | 1,669 |
| T20 [días] | | 3,267 | 3,350 | 3,110 | 3,458 |
| T30 [días] | | 5,174 | 5,266 | 4,995 | 5,383 |
| T40 [días] | | 7,306 | 7,374 | 7,170 | 7,459 |
| T50 [días] | | 9,707 | 9,706 | 9,708 | 9,708 |
| T60 [días] | | 12,432 | 12,229 | 12,713 | 12,153 |
| T70 [días] | | 15,552 | 15,199 | 16,333 | 14,823 |
| T80 [días] | | 19,163 | 18,465 | 20,789 | 17,756 |
| T90 [días] | | 23,392 | 22,170 | 26,434 | 20,996 |
| T100 [días] | | 23,418 | 26,409 | 33,863 | 24,599 |

TABLA II.1.

Se presentan los tiempos de drenaje para diversos grados de saturación, en una sección considerada como tipo y otras tres de características diferentes.

Como el vaciado de secciones con T_{50} iguales son similares, ellos son independientes de las características de la sección. Aprovechando esta condición, el modelo implementado determina, mediante aproximaciones sucesivas, cual es la combinación de permeabilidades de la base y la sub-rasante que mejor satisface un T_{50} dado. Los valores de K así determinados, permiten calcular los tiempos de vaciado para diferentes grados de saturación, considerando siempre las características de la sección tipo.

MODELACION DE LAS PRECIPITACIONES

Como el modelo Lluvia-Infiltración-Drenaje calcula los cambios en la altura de agua de la base en el intervalo de tiempo que se demora en drenar el volumen equivalente a una altura de 1 mm, lo ideal sería distribuir la lluvia media anual en intervalos de tiempo menor o igual a éste. Sin embargo, como existen pocos registros de lluvias horarias a lo largo del país, se debió optar por distribuir las lluvias medias anuales en lluvias mensuales y luego en lluvias diarias. Esto se realizó para nueve zonas a lo largo del país.

La distribución mensual se obtuvo a través de los promedios observados en la estadística (de 8 a 20 años) de estaciones ubicadas en ciudades importantes de estas zonas (Tabla II.2).

| | LATITUD | ESTACION |
|--------|---------|---------------|
| ZONA 1 | 30 | LA SERENA |
| ZONA 2 | 32 | SANTIAGO |
| ZONA 3 | 34 | CURICO |
| ZONA 4 | 36 | CHILLAN |
| ZONA 5 | 38 | TEMUCO |
| ZONA 6 | 40 | VALDIVIA |
| ZONA 7 | 42 | PUERTO MONTT |
| ZONA 8 | 46 | PUERTO CISNES |
| ZONA 9 | 54 | PUNTA ARENAS |

TABLA II.2 Estaciones usadas para calcular la distribución mensual.

Una vez definida la distribución mensual (Gráficos II.1 al II.9), la distribución diaria se obtuvo a través de la modelación realizada en la Ref. 3, la que relaciona el número de días con precipitaciones de intensidad mayor que 5 mm/día con la latitud y la precipitación media mensual de la zona, a través de la siguiente ecuación (el ajuste se logró con un coeficiente de correlación de 0,992):

$$N_5 = \frac{(LAT)^{7.4} \cdot 10^{-11}}{21} \frac{180}{\pi} \text{Arctg}\left(\frac{P}{14 \pi (LAT)^{7.4} \cdot 10^{-11}}\right)$$

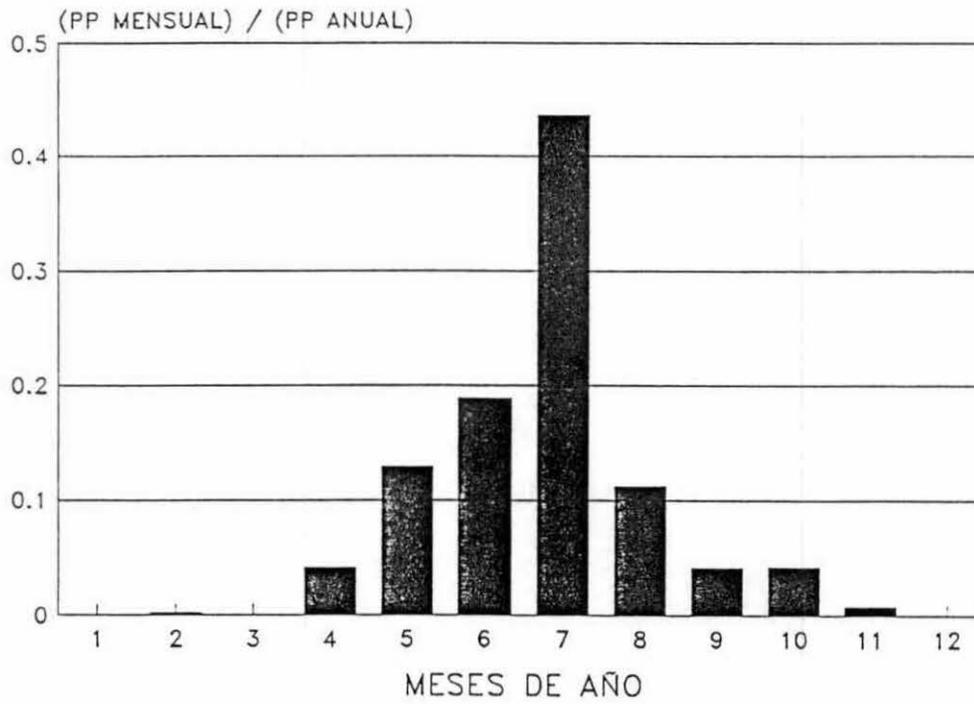
Además, en la misma Ref. 3 se muestran relaciones lineales entre el número de días del mes que llueve con intensidad mayor que 5 mm/día y los días que llueve con intensidad mayor que 0,1, 10, 20, 30 y 40 mm/día.

Finalmente, la distribución en el mes se realizó calculando la duración (en días) de 6 bloques de lluvia con intensidades de 2,5; 7,5; 15; 25; 35; y 45 mm/día, respectivamente. Dichos bloques fueron distribuidos en el mes, de manera que los tiempos de saturación obtenidos con distribuciones reales de lluvias (años reales) fueran similares a los tiempos de saturación obtenidos por la modelación de los bloques de lluvias (Gráficos II.10 al II.18).

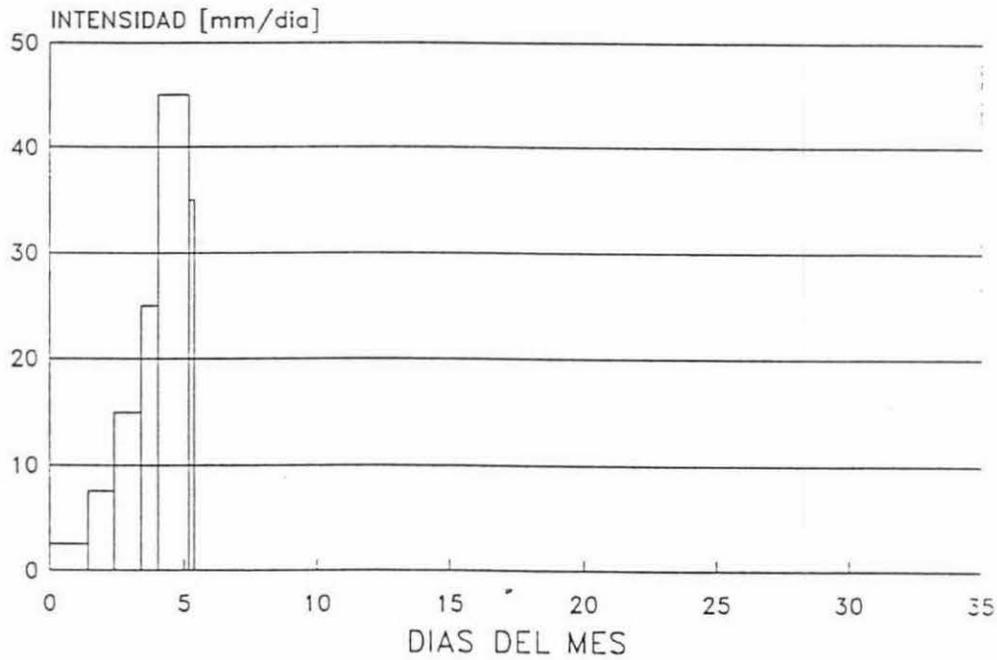
En los Gráficos II.1 al II.9 se detallan tanto las distribuciones mensuales adoptadas como la modelación y distribución de los bloques de lluvias que se obtuvieron para cada zona.

GRAFICO II.1

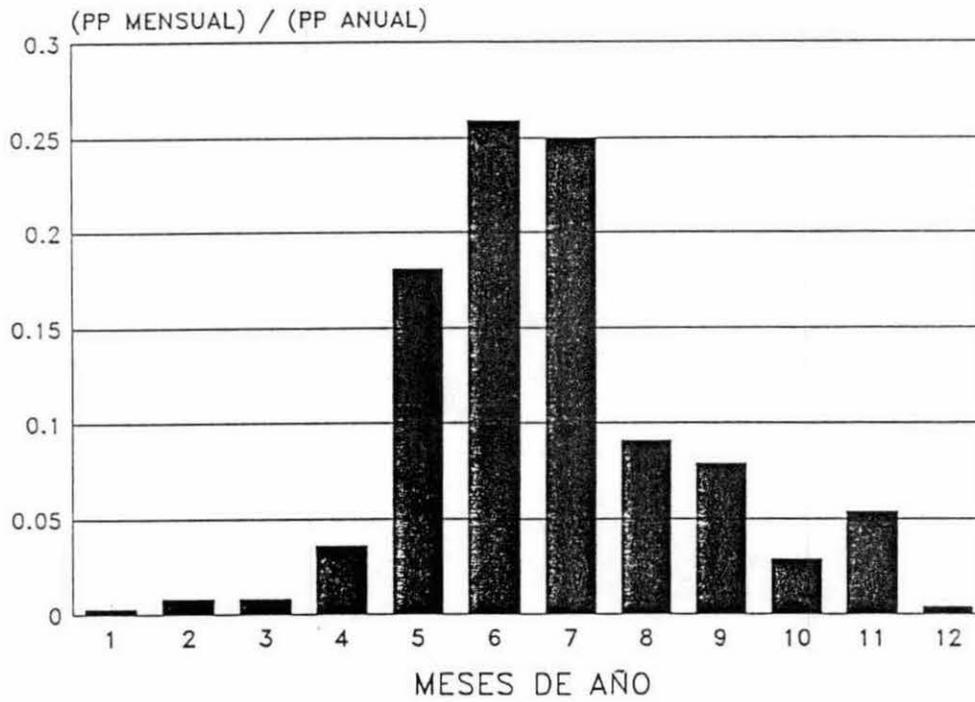
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 30



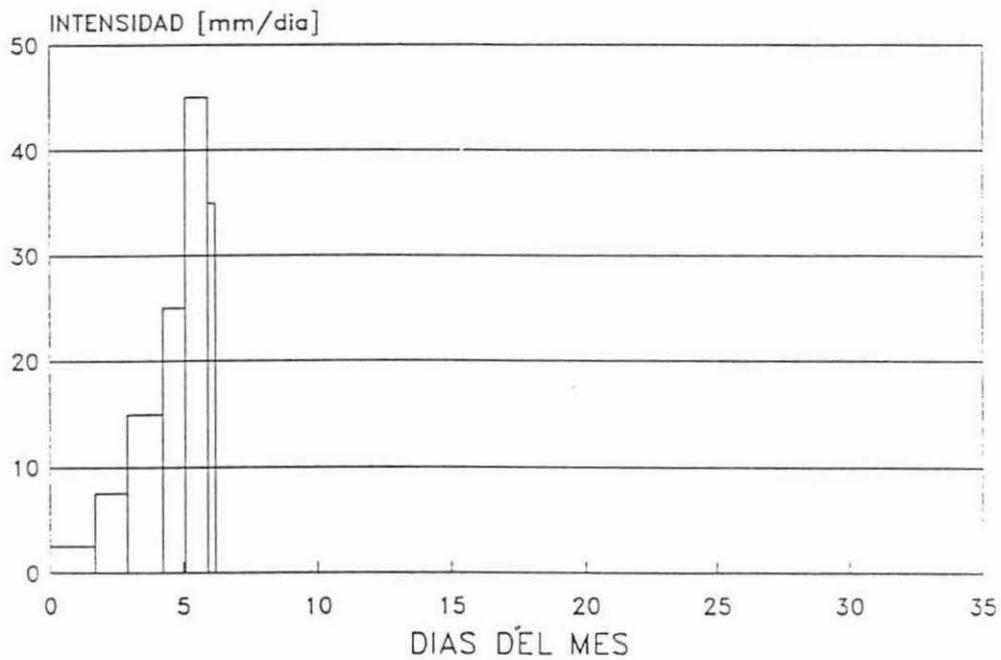
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 30
PRECIPITACION = 100 mm



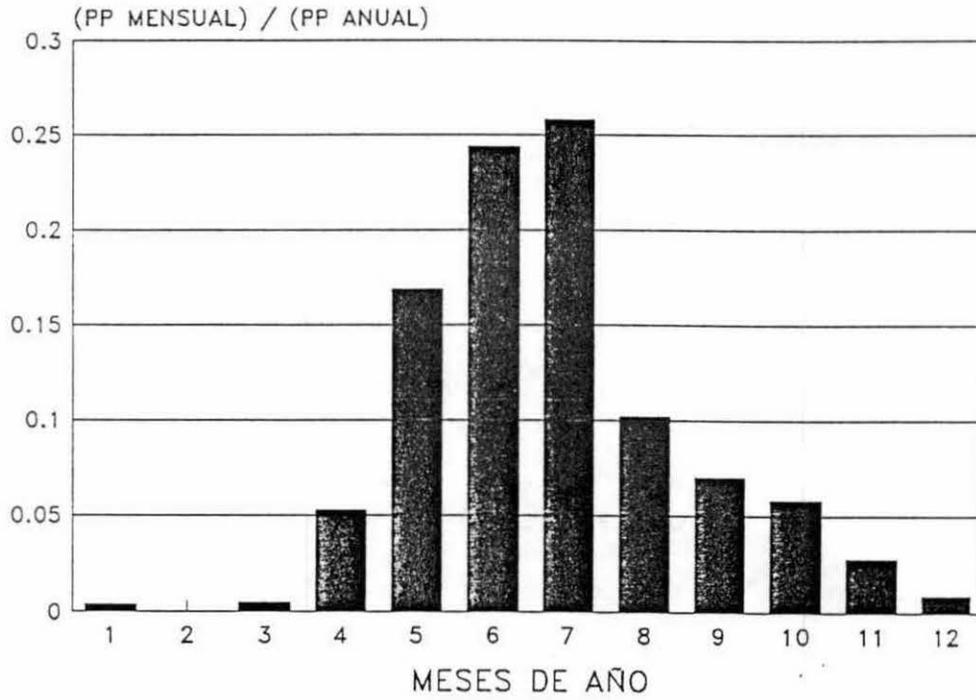
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 32



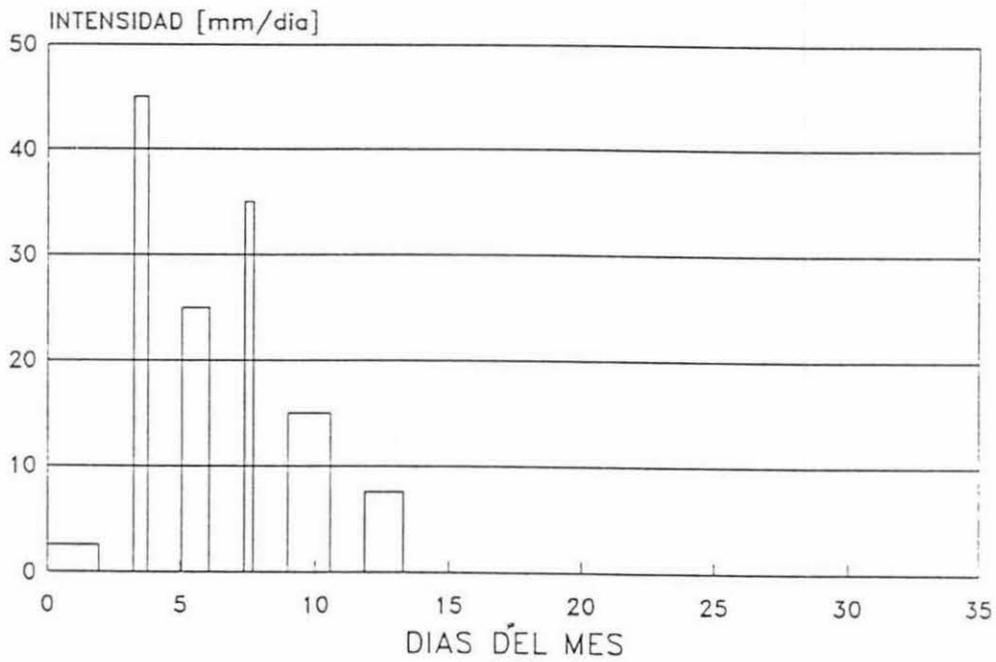
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 32
PRECIPITACION = 100 mm



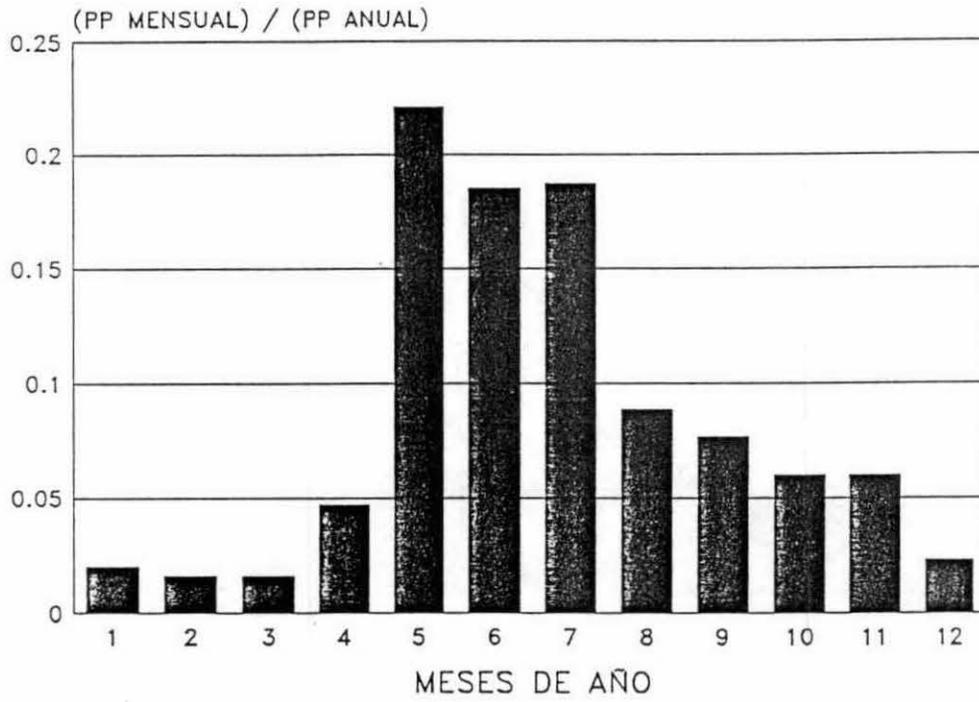
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 34



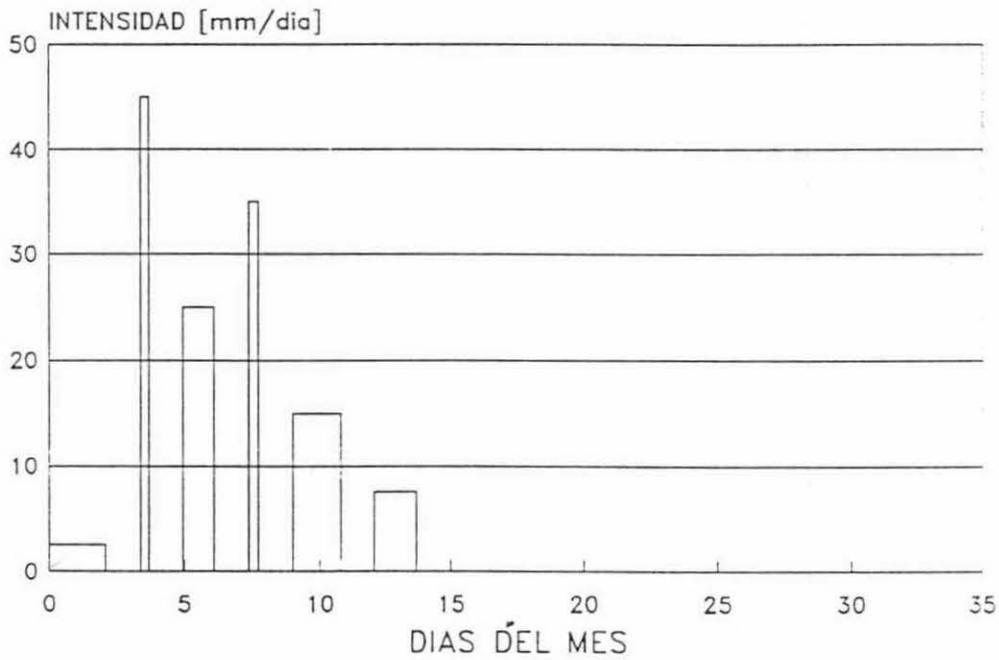
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 34
PRECIPITACION = 100 mm



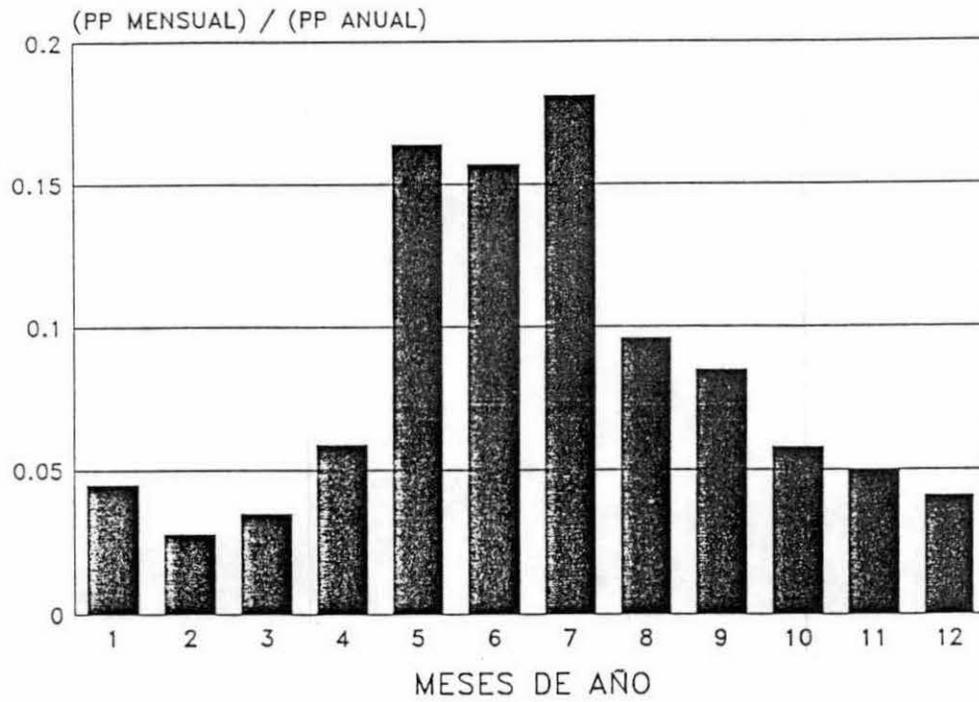
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 36



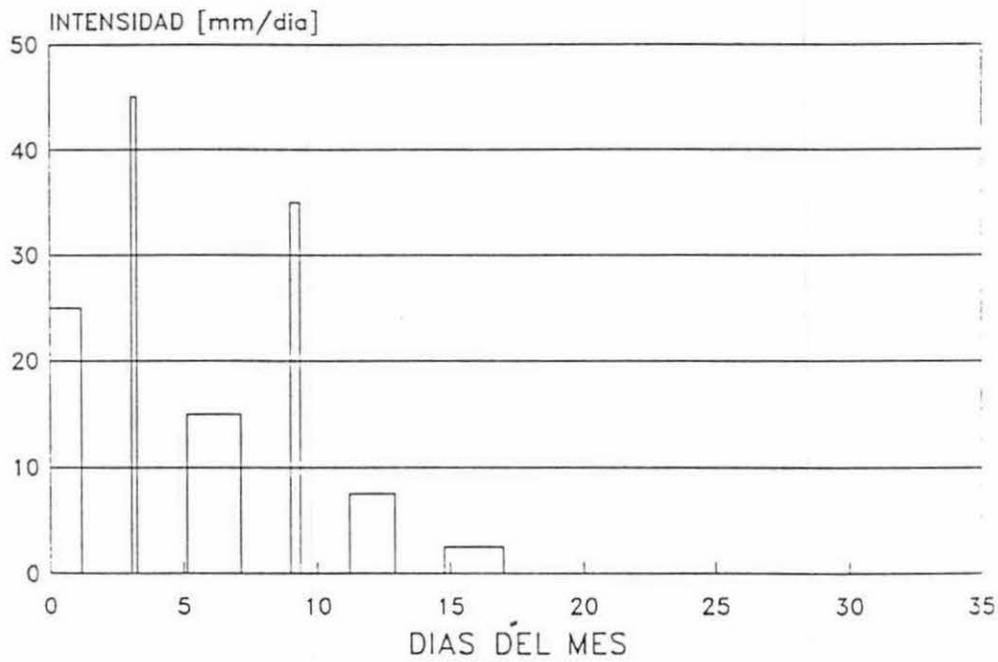
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 36
PRECIPITACION = 100 mm



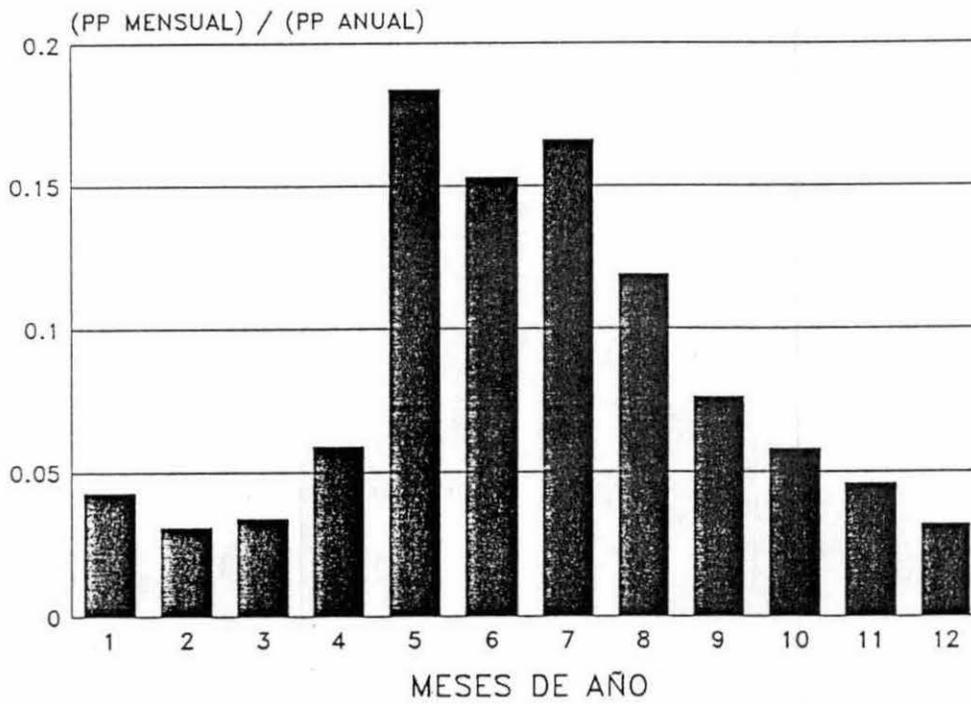
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 38



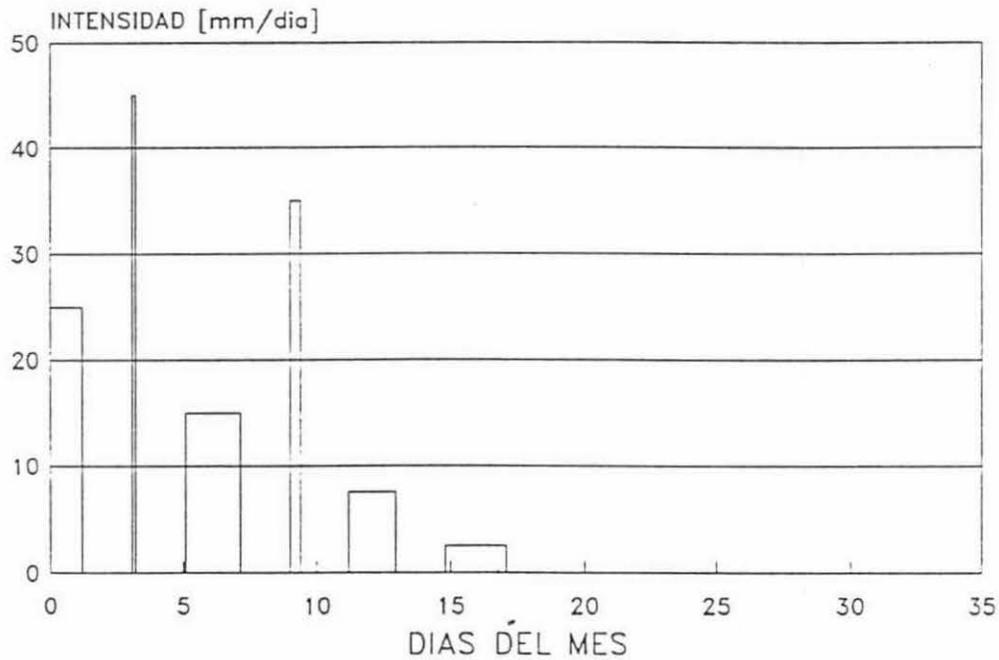
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 38
PRECIPITACION = 100 mm



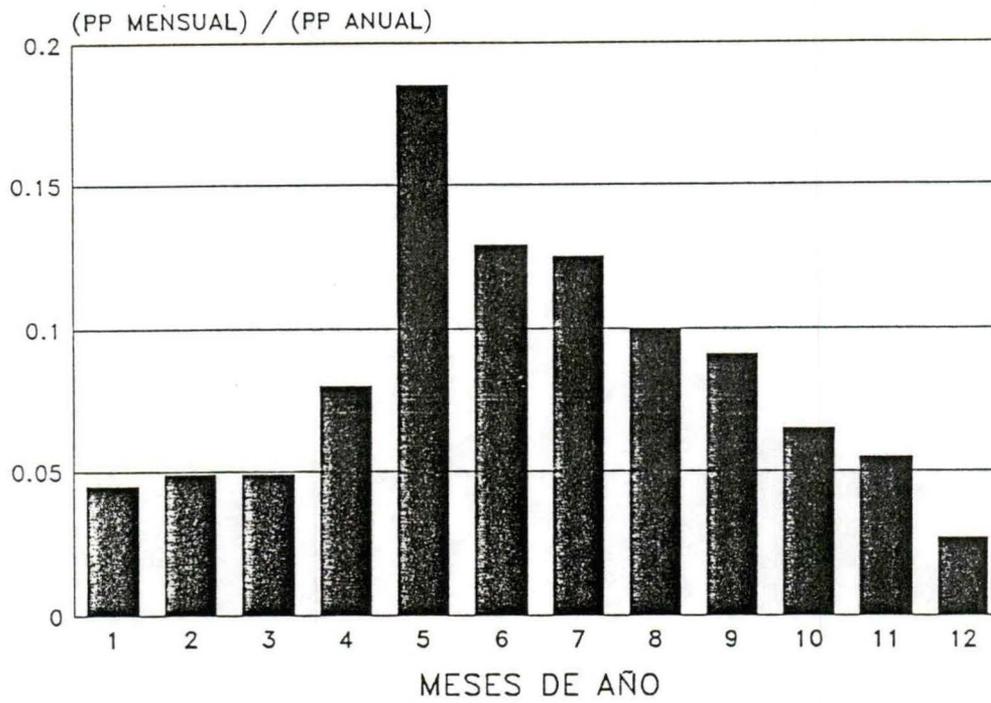
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 40



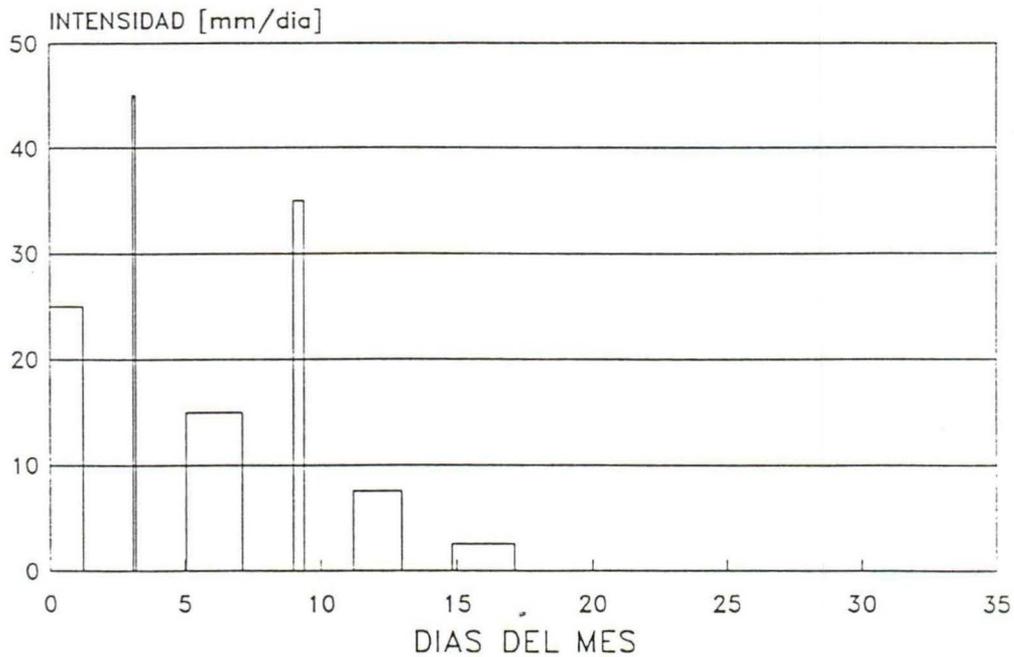
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 40
PRECIPITACION = 100 mm



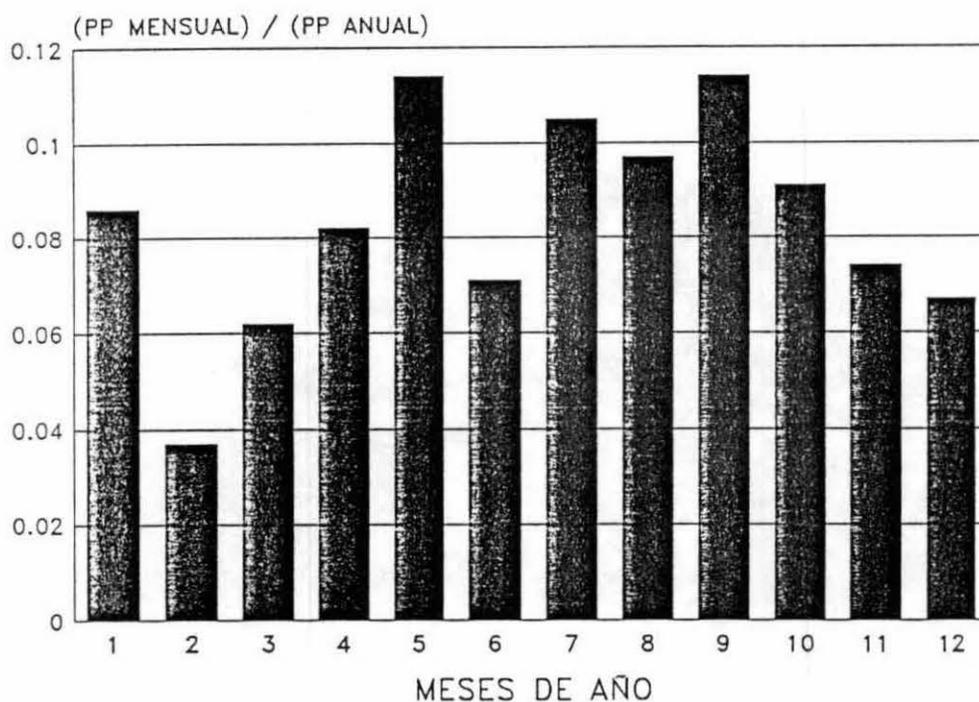
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 42



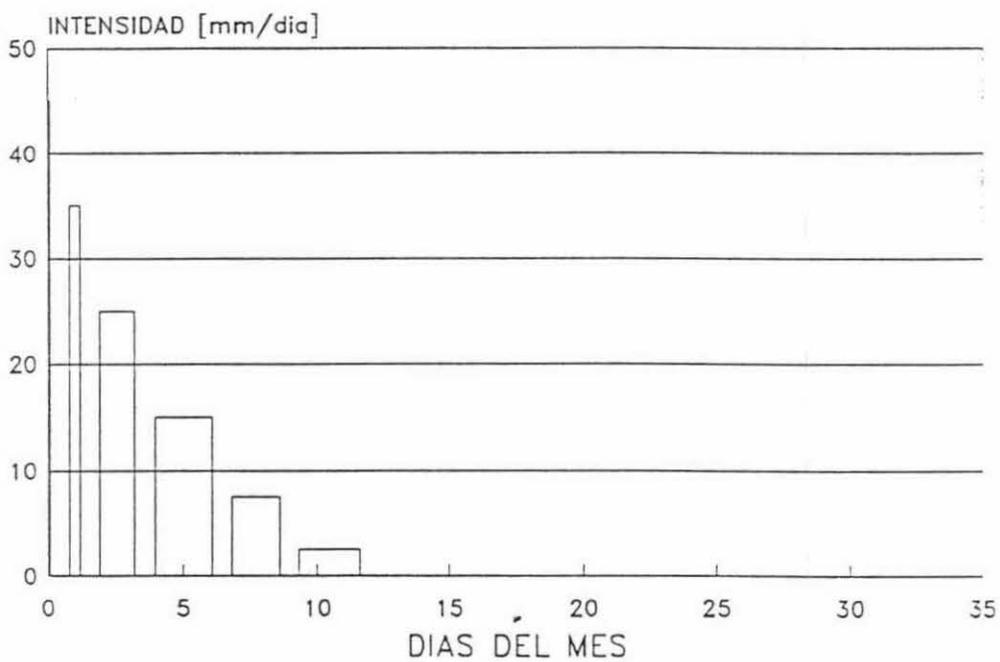
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 42
PRECIPITACION = 100 mm



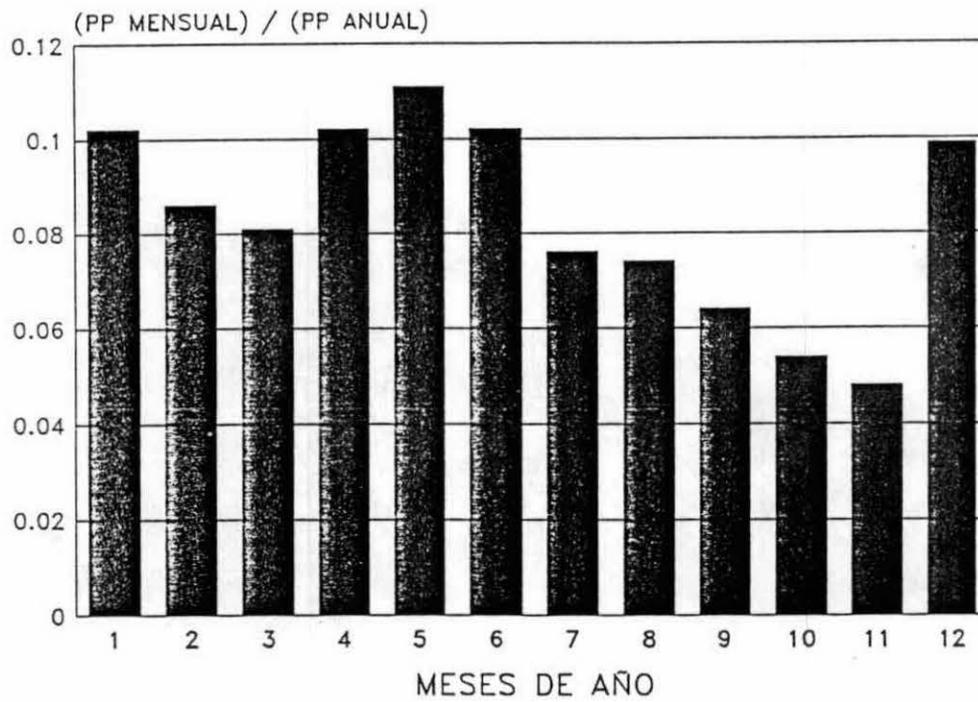
DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 46



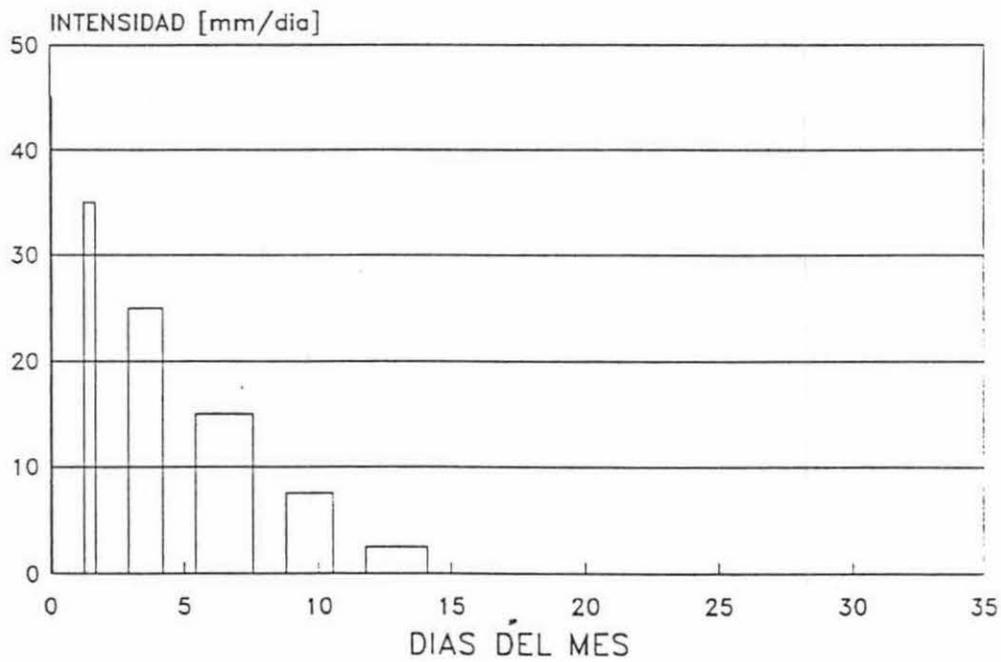
DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 46
PRECIPITACION = 100 mm



DISTRIBUCION ANUAL - LATITUD = 54

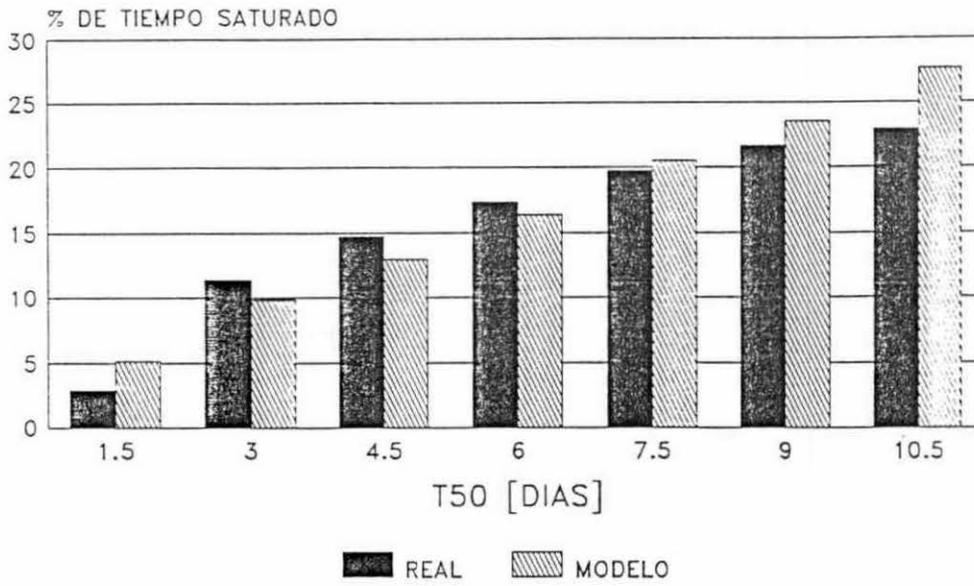


DISTRIBUCION MENSUAL - LATITUD = 54
PRECIPITACION = 100 mm



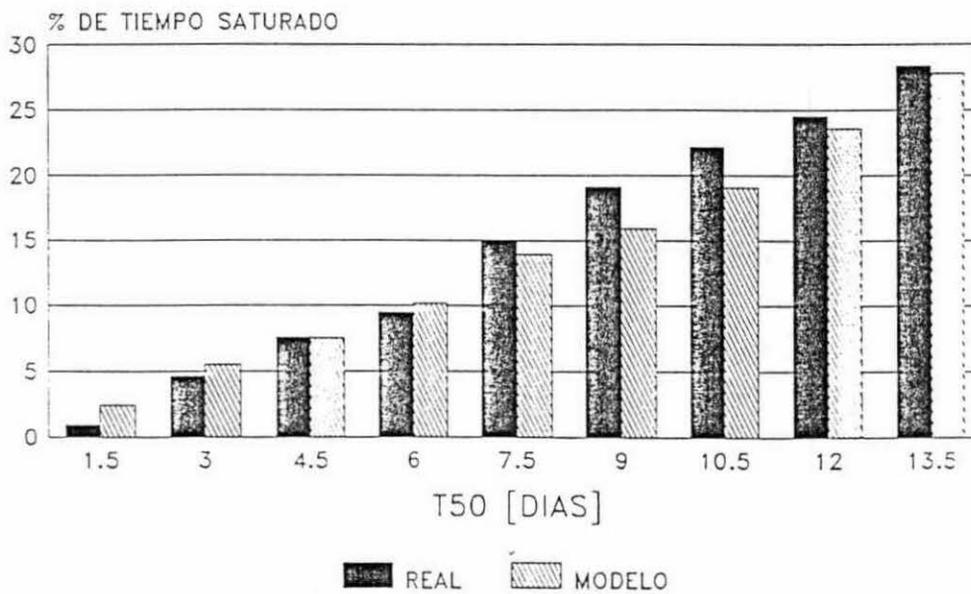
PIRQUE - 1989

PP = 464,3 mm



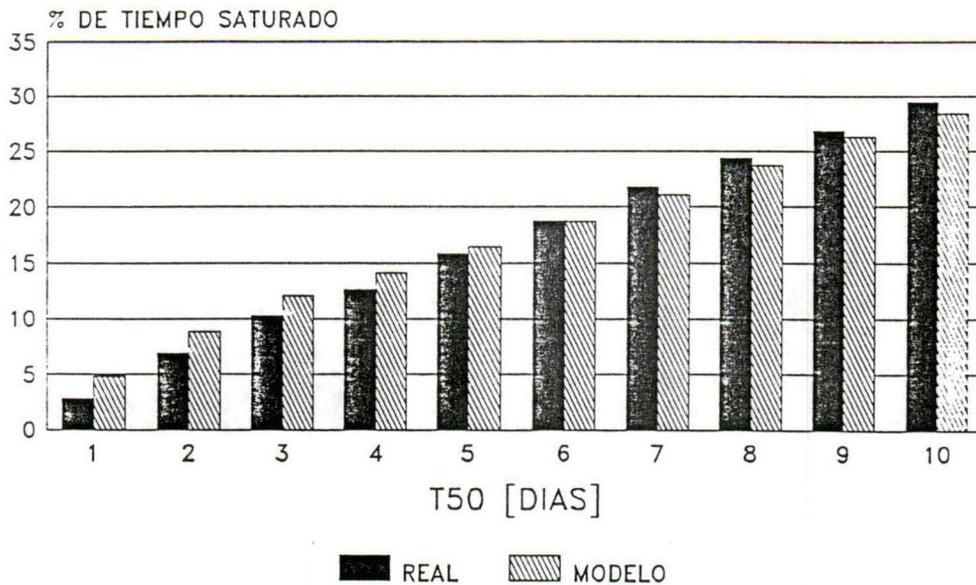
PIRQUE - 1990

PP = 250,1 mm



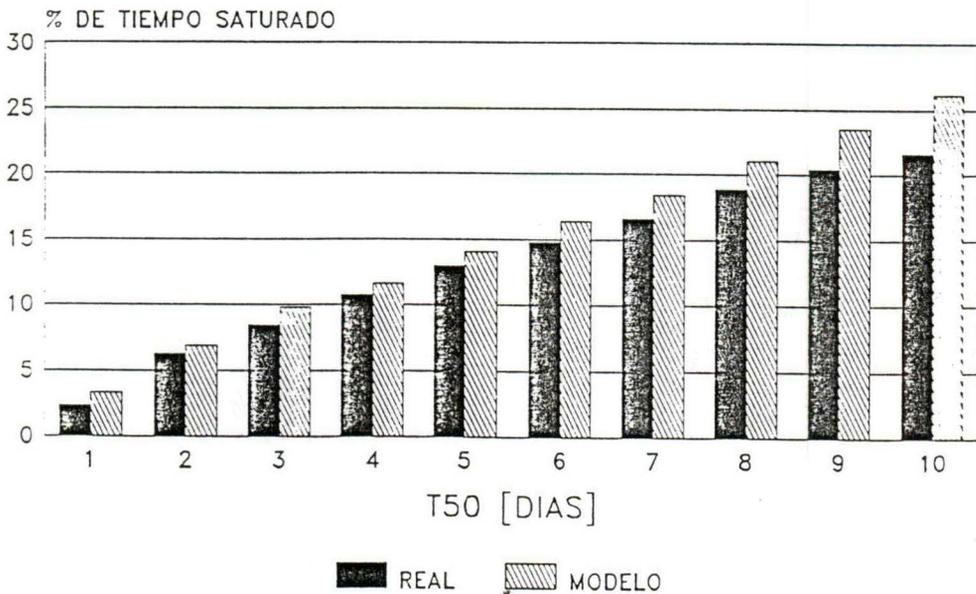
PIRQUE - 1991

PP = 611,4 mm



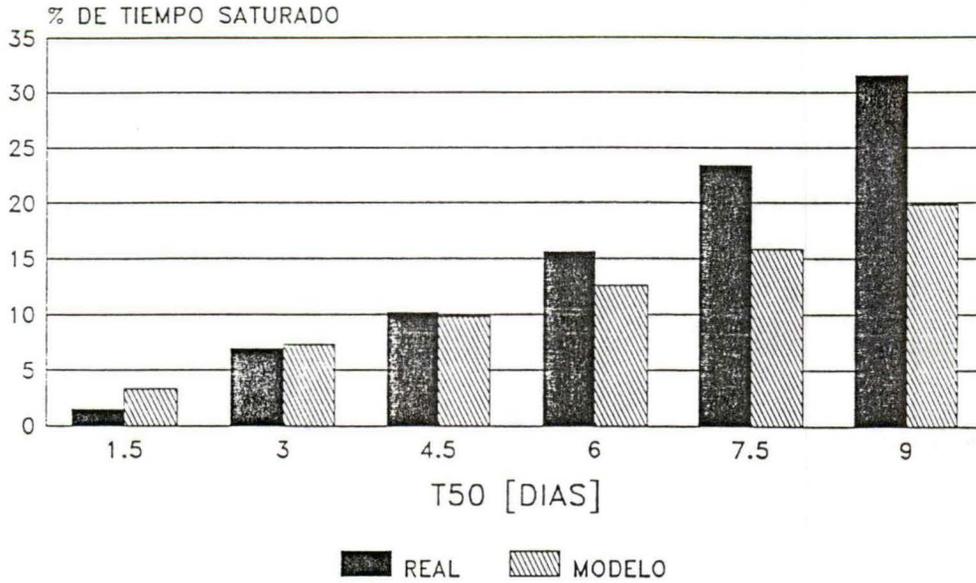
EL YESO - 1989

PP = 462 mm



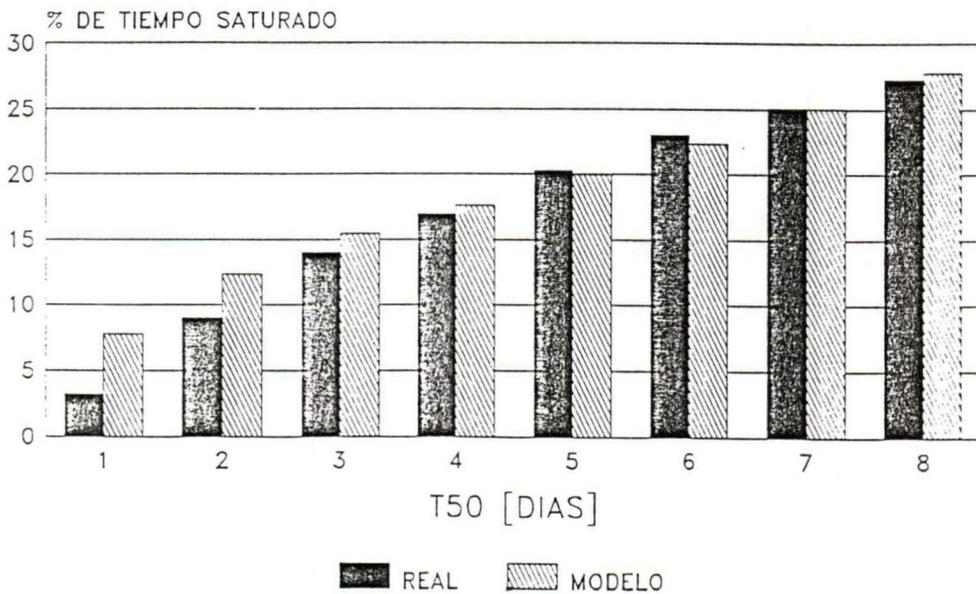
EL YESO - 1990

PP = 325 mm



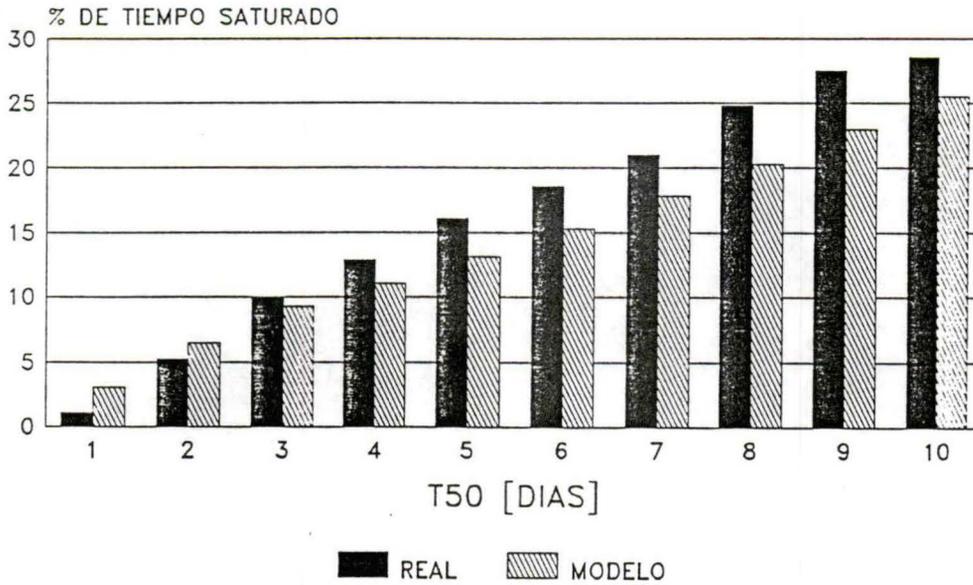
EL YESO - 1991

PP = 928,5 mm



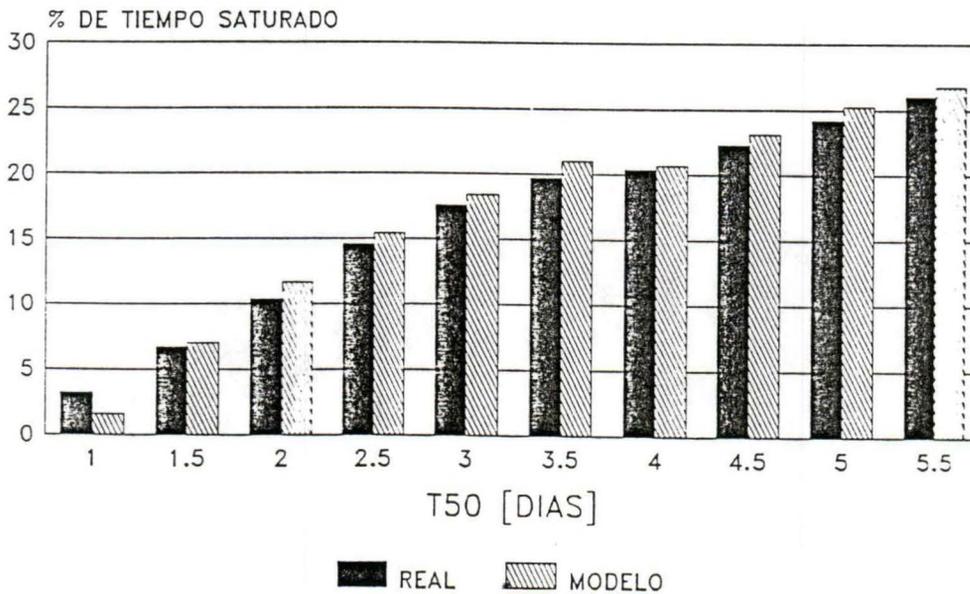
CURICO - 1989

PP = 433,5 mm



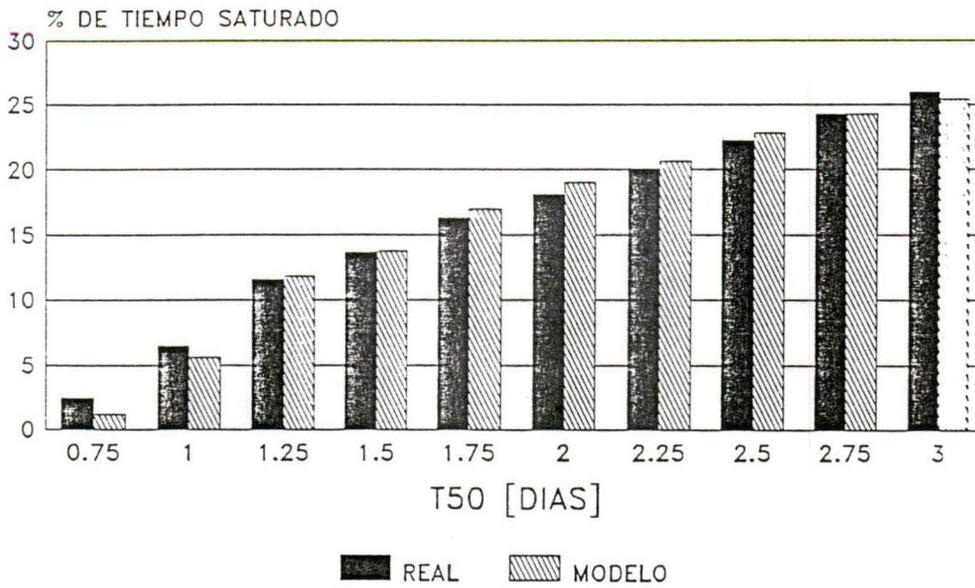
CHILLAN - 1989

PP = 786,6 mm



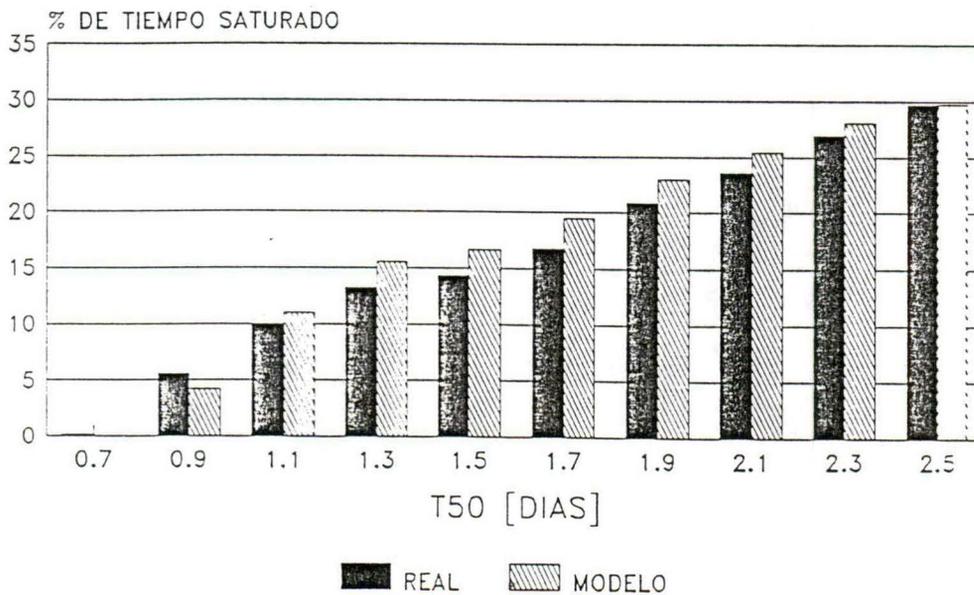
CHILLAN - 1991

PP = 1190,2 mm



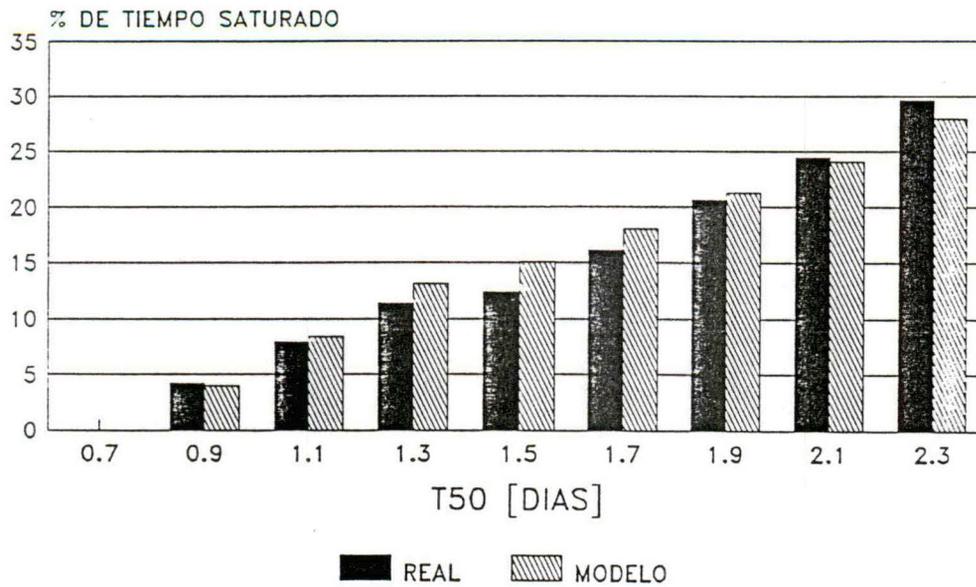
LOS ANGELES - 1986

PP = 1385 mm



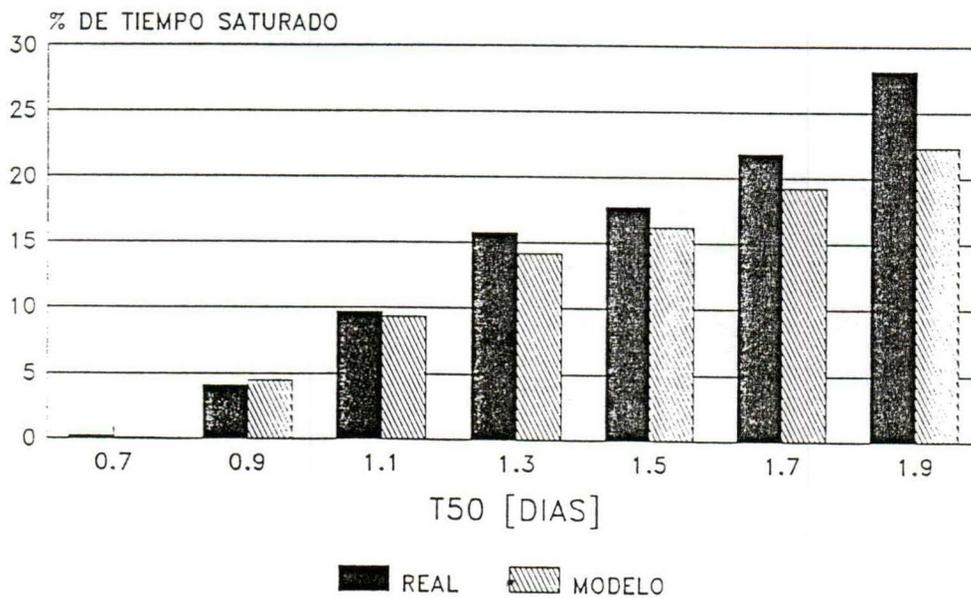
ADOLFO MATTHEI - 1990

PP = 1306,2 mm



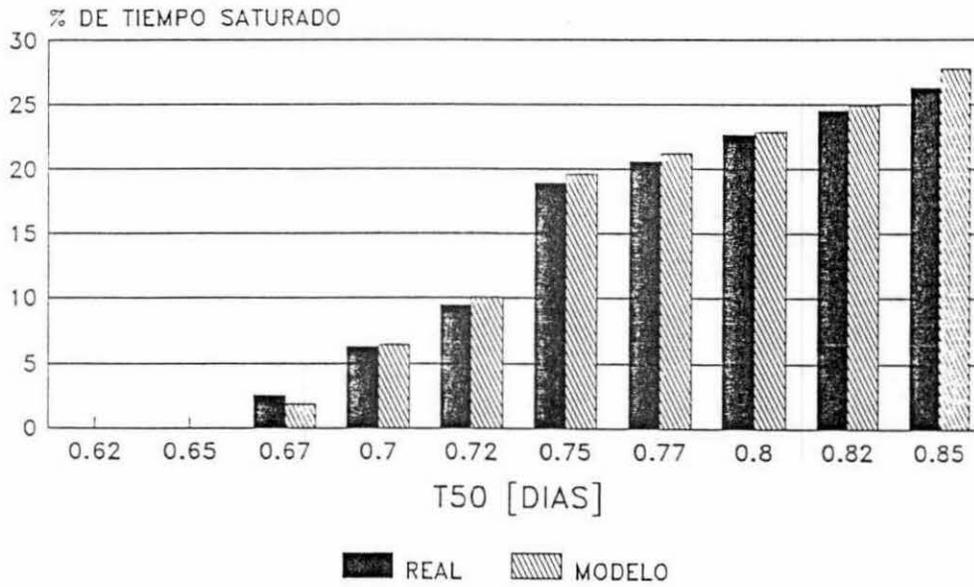
ADOLFO MATTHEI - 1991

PP = 1365 mm



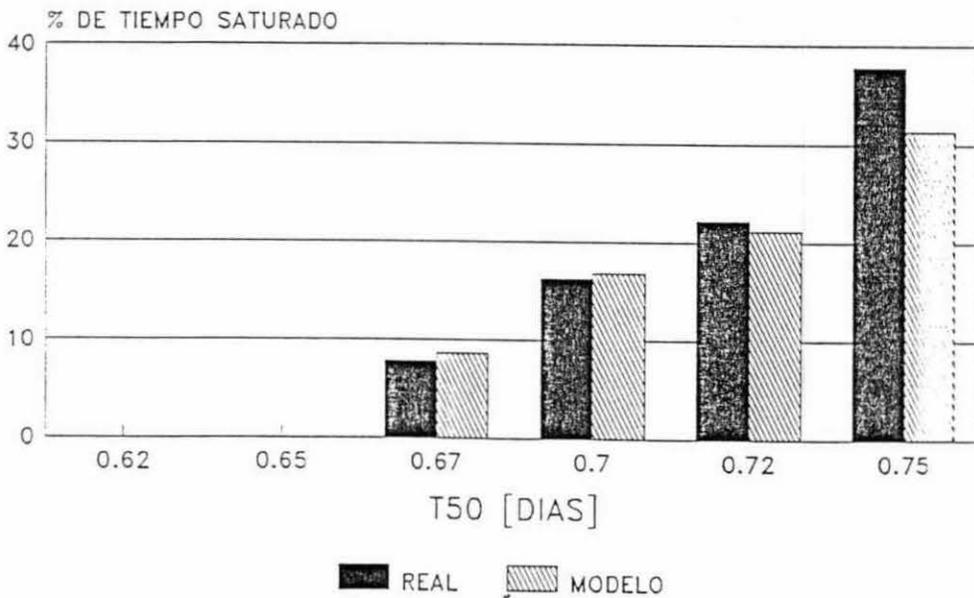
CHACABUCO - 1989

PP = 2959 mm



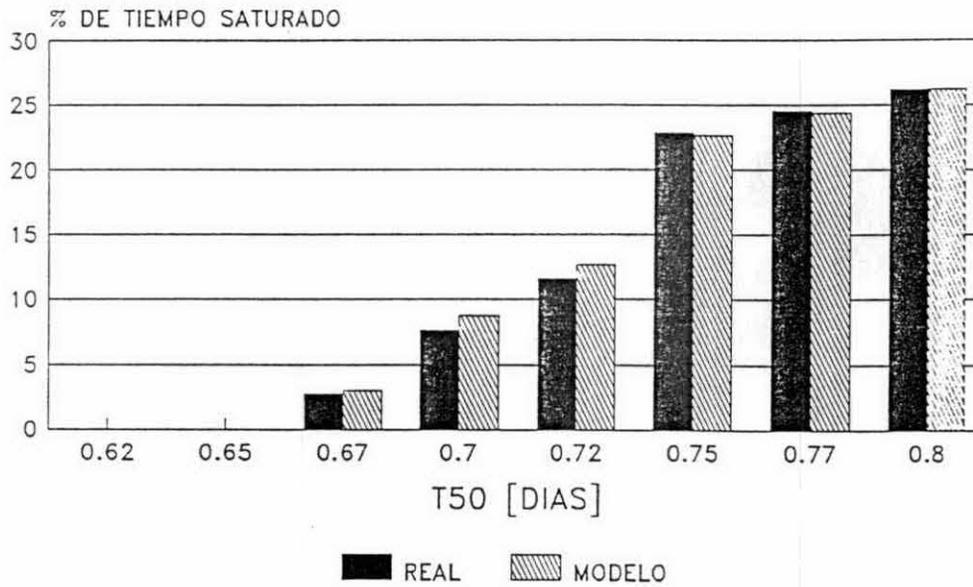
CHACABUCO - 1990

PP = 3874,4 mm



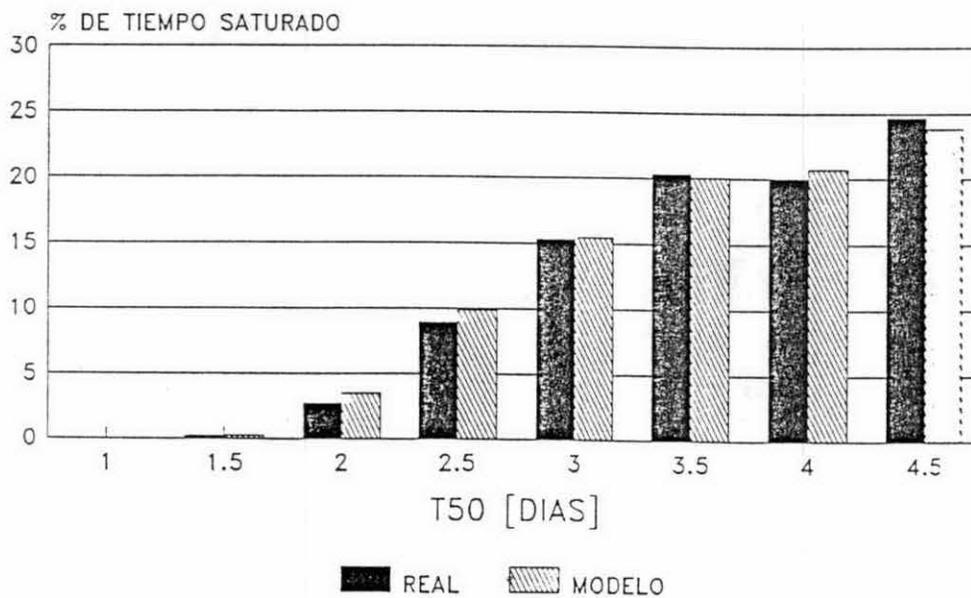
CHACABUCO - 1991

PP = 3197,1 mm

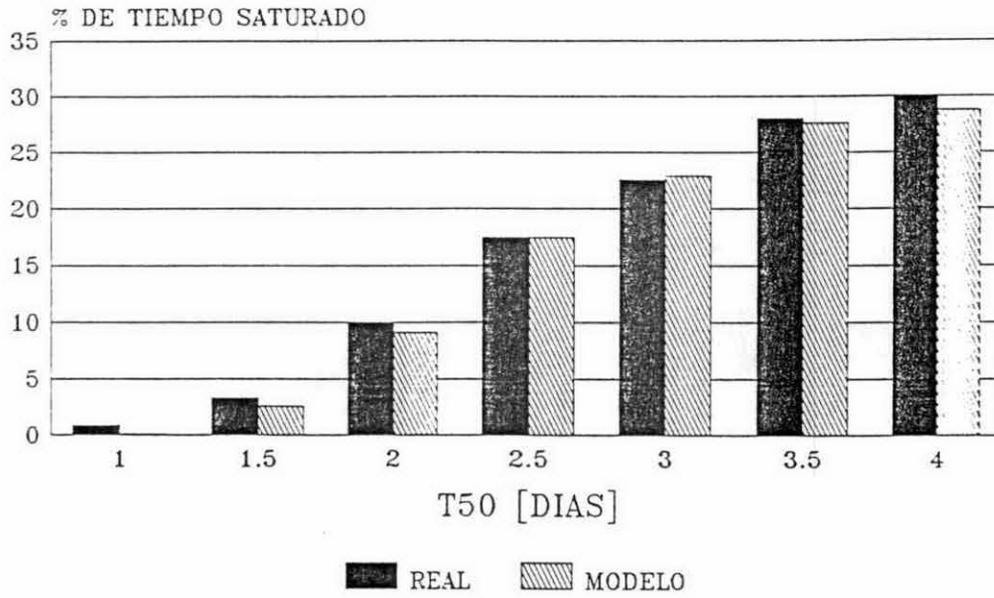


PUNTA ARENAS - 1989

PP = 497,4 mm



PUNTA ARENAS - 1990
 PP = 647,1 mm



- **RESUMEN DE LA MODELACION DEL TIEMPO DE SATURACION**

* **DATOS DE INGRESO**

- Precipitación Media Anual [mm]
- Tiempo de Drenaje -> T_{50} [días]
- Latitud {30, 32, ... , 44, 52}

* **PROCEDIMIENTO**

- 1) Se distribuye la precipitación anual en los meses de acuerdo a la Latitud. (Gráficos II.1 al II.9)
- 2) Se determina la duración de los bloques de lluvia en los meses de acuerdo a la latitud y se distribuye según la zona, en los días del mes (Gráficos II.1 al II.9). Para la distribución se comparan los tiempos de saturación de lluvias diarias reales con los tiempos predichos por el modelo (Gráficos II.10 al II.18).
- 3) A partir del T_{50} se determinan K_B y K_{SR} de manera que el T_{50} se represente con dichas permeabilidades con las características de la estructura tipo.
- 4) Se utiliza la infiltración máxima según fórmula AASHTO.

$$I_o = 11 \text{ mm/día}$$
- 5) Se simula el año normal efectuando el siguiente procedimiento por bloques:
 - a) Tiempo para Drenar una Altura de 1 mm de la Base.
 - b) Al final de dicho tiempo se suma la altura de lluvia infiltrada en dicho tiempo.

CONDICIONES DE BORDE: (H= Altura de la Napa)

Si $H=0$ -> Se analiza el cambio cada 0,5 Hrs.

Si $H > 15$ -> $H=15$

- 6) Se generan gráficos T_{50} vs. Pp. Media Anual que entregan el Tiempo de Saturación para las nueva zonas estudiadas. Se eliminan gráficos que presentan información similar y se obtienen los gráficos N°6 al N°11.

EJEMPLO DE APLICACION DEL MODELO

Con el propósito de explicar mejor el funcionamiento del modelo Lluvia-Infiltración-Drenaje, se presenta una comparación entre la modelación con distribución de lluvia real y con distribución de lluvia teórica. Para esto se aplica el modelo al año 1986 de la estación de Los Angeles y se entregan gráficos que señalan los cambios en la altura de agua de la base:

- El Gráfico II.19 señala la distribución de la lluvia anual en los meses.
- Los Gráficos II.20 y II.21 señalan el nivel de agua en la base para la lluvia de 1986 con la distribución real y con la distribución teórica, respectivamente.
- Los Gráficos II.22 y II.23 señalan el nivel de agua en la base para la lluvia de Abril de 1986 con la distribución real y con la distribución teórica, respectivamente.

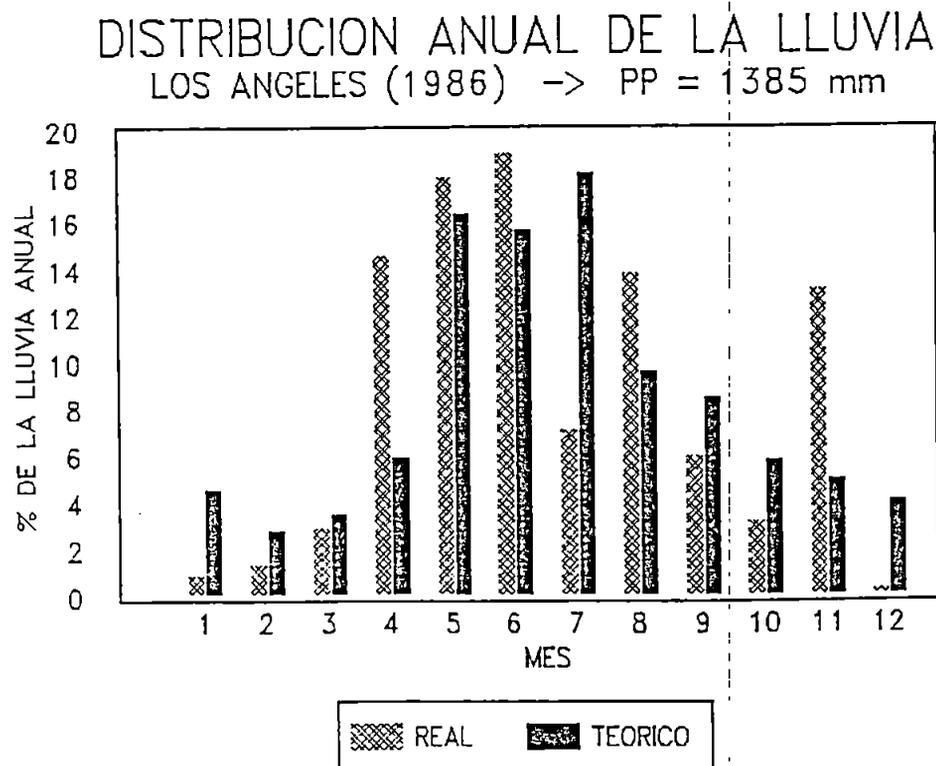


GRAFICO II.19

ESTACION LOS ANGELES - 1986

TIEMPO DE SATURACION REAL = 22, 19 %

T50 = 2 DIAS PP = 1385 mm

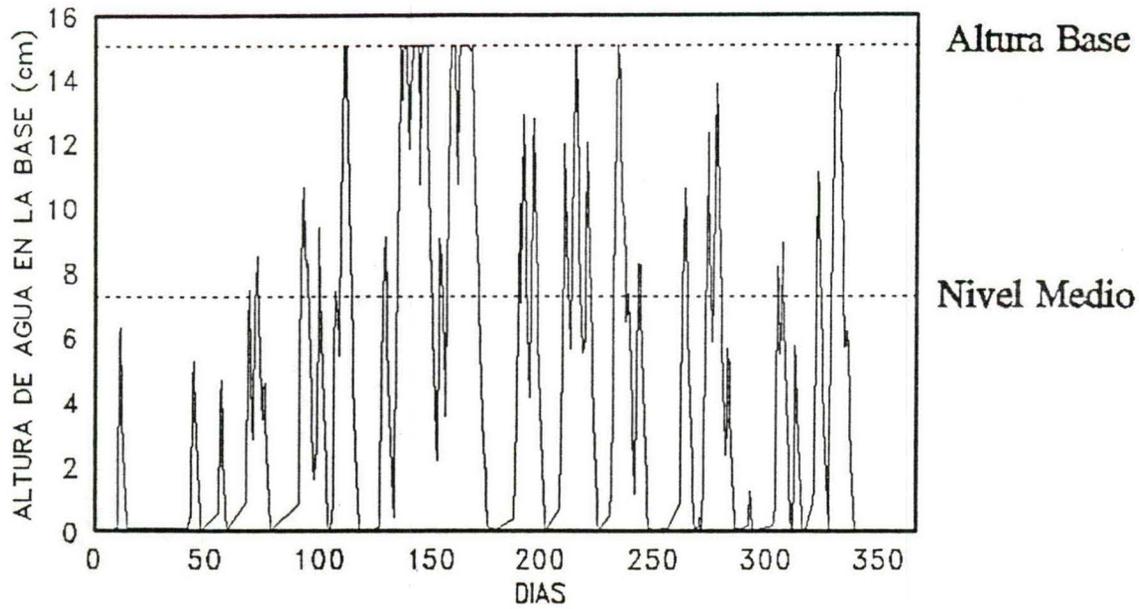


GRAFICO II.20

TPO. DE SATURACION TEORICO = 24, 24 %

T50 = 2 DIAS PP = 1385 mm

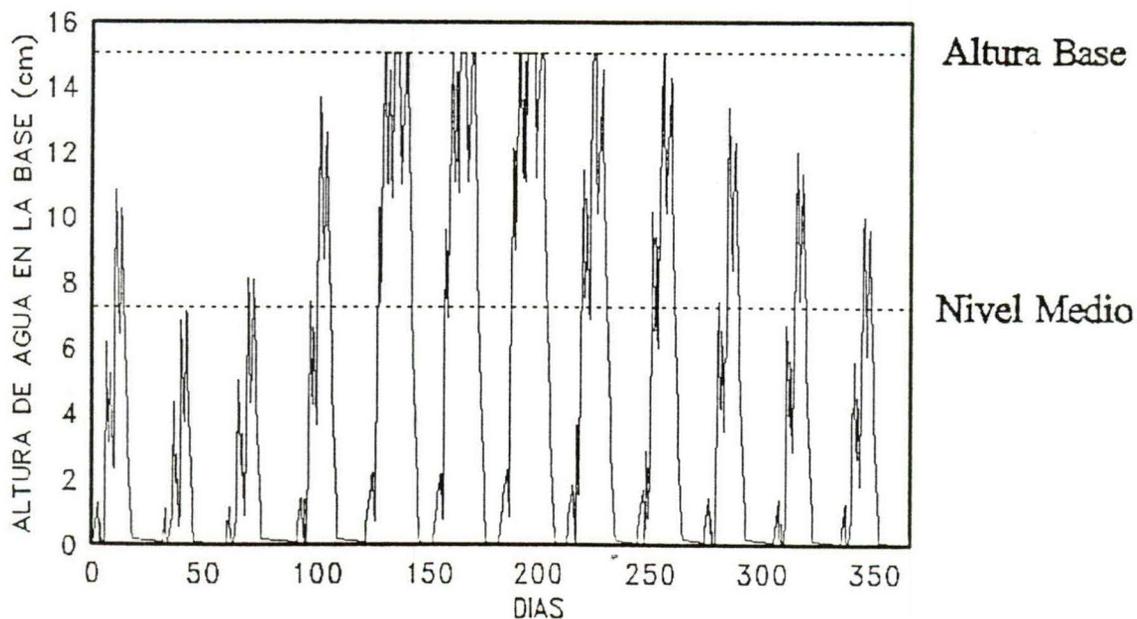


GRAFICO II.21

ESTACION LOS ANGELES - ABRIL 1986

MES DE ABRIL (REAL)
 LOS ANGELES (1986) → PP = 201, 4 mm

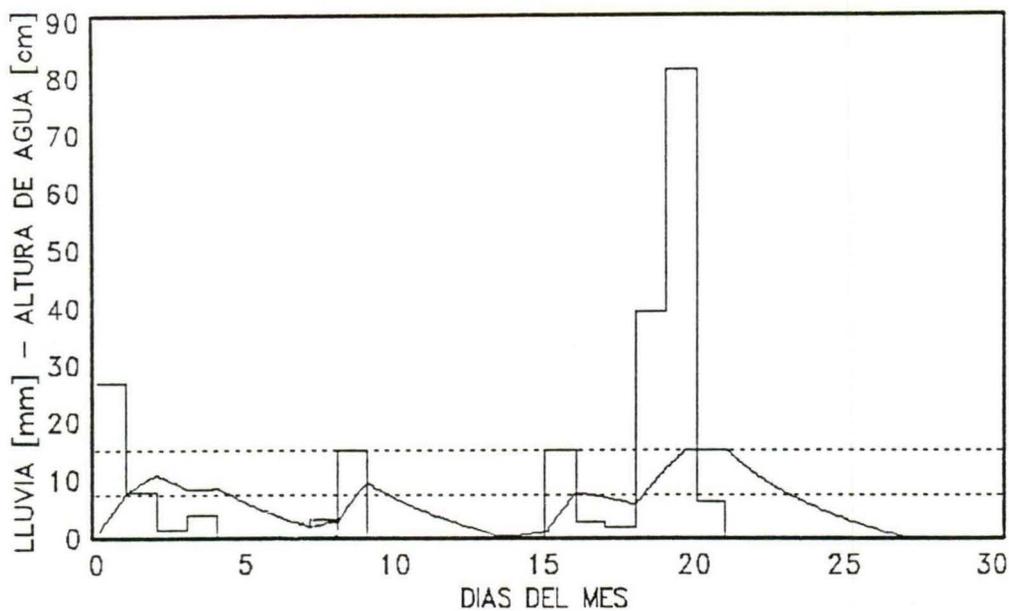


GRAFICO II.22

MES DE ABRIL (TEORICO)
 LOS ANGELES (1986) → PP = 81, 7 mm

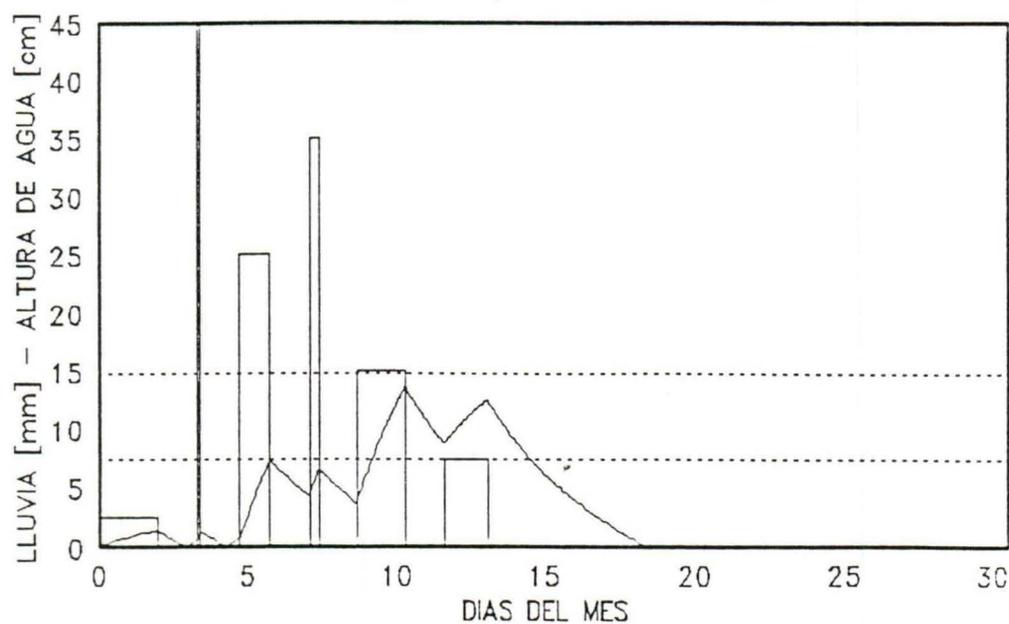


GRAFICO II.23

ANEXO III

INFLUENCIA DEL COEFICIENTE DE DRENAJE EN LOS ESPESORES DE DISEÑO

- Efectos de la variación de la infiltración y permeabilidad de las bases y sub-rasante
- Relación entre el coeficiente de drenaje y los ejes equivalentes admisibles

EFFECTOS DE LA VARIACION DE LA INFILTRACION Y PERMEABILIDADES DE LAS BASES Y SUBRASANTES EN LA DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE DRENAJE

Para analizar el error que se pudiera producir en la estimación del Coeficiente de Drenaje ante variaciones de la infiltración y permeabilidad, se tabularon los valores de dichos coeficientes para distintas Calidades de Drenaje (del Gráfico N° 1 se obtiene la variación en las permeabilidades que permiten diferentes Calidades de Drenaje); diferentes precipitaciones medias anuales y distintos valores de infiltración (Tablas III.1 y III.2).

Del análisis de las Tablas III.1 y III.2 se concluye lo siguiente:

- * La tasa de infiltración y la magnitud de las precipitaciones no tienen ninguna influencia en el Coeficiente de Drenaje, para calidad de drenaje "excelente" (2 horas) y "muy malo" (1 mes).
- * Para drenaje "malo" (1 semana) sólo influyen tasas de infiltración bajas y precipitaciones inferiores a 1.000 mm anuales.
- * Existen fuertes variaciones del coeficiente de drenaje cuando este es "bueno". Resultan determinantes tanto la tasa de infiltración que se adopte como la precipitación anual que caracteriza la zona del proyecto.

COEFICIENTE DE DRENAJE -> m

| | | TIEMPO DE DRENAJE -> T50 | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|--------------------------|------|------|------|---------|------|------|------|----------|------|------|------|---------|------|------|------|
| | | 2 HORAS | | | | 1 DIA | | | | 1 SEMANA | | | | 1 MES | | | |
| | | PP [mm] | | | | PP [mm] | | | | PP [mm] | | | | PP [mm] | | | |
| | | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 |
| INFILTRACION [mm/dia] | 5 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 0,95 | 0,81 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| | 10 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,34 | 1,23 | 1,14 | 1,10 | 0,84 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| | 15 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,23 | 1,12 | 1,07 | 1,03 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| | 20 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,19 | 1,10 | 1,05 | 1,01 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| | 30 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,16 | 1,08 | 1,03 | 1,00 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| | 45 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,15 | 1,08 | 1,03 | 1,00 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |

NOTA: SE USO LA DISTRIBUCION DE LLUVIAS CORRESPONDIENTE A LAS REGIONES VII, VIII Y IX.

TABLA III.1

ANALISIS DE SENSIBILIDAD PARA PAVIMENTO RIGIDO

COEFICIENTE DE DRENAJE -> Cd

| | | TIEMPO DE DRENAJE -> T50 | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|----|--------------------------|------|------|------|---------|------|------|------|----------|------|------|------|---------|------|------|------|
| | | 2 HORAS | | | | 1 DIA | | | | 1 SEMANA | | | | 1 MES | | | |
| | | PP [mm] | | | | PP [mm] | | | | PP [mm] | | | | PP [mm] | | | |
| | | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 | 500 | 1000 | 1500 | 2000 |
| INFILTRACION [mm/dia] | 5 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 0,98 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 10 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,20 | 1,14 | 1,09 | 1,07 | 0,92 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 15 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,14 | 1,08 | 1,05 | 1,02 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 20 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,12 | 1,07 | 1,03 | 1,01 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 30 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,10 | 1,05 | 1,02 | 1,00 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |
| | 45 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 1,10 | 1,05 | 1,02 | 1,00 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 |

NOTA: SE USO LA DISTRIBUCION DE LLUVIAS CORRESPONDIENTE A LAS REGIONES VII, VIII Y IX.

TABLA III.2

- RELACION ENTRE EL COEFICIENTE DE DRENAJE Y LOS EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES.

a. Influencia del Parámetro "m_i" en el Diseño (Pavimentos Flexibles)

El coeficiente de drenaje, tal como se define en la Ref. 1, afecta directamente al producto del coeficiente estructural por el espesor de la capa ($a_i * D_i$), de las capas no tratadas, es decir, bases y sub-bases. El método no considera ninguna influencia del drenaje sobre las capas asfálticas.

En el Gráfico III.1 se presenta parametrizando para diversos valores del CBR (MR), la variación del número estructural (SN) requerido según el método en función de los EE solicitantes.

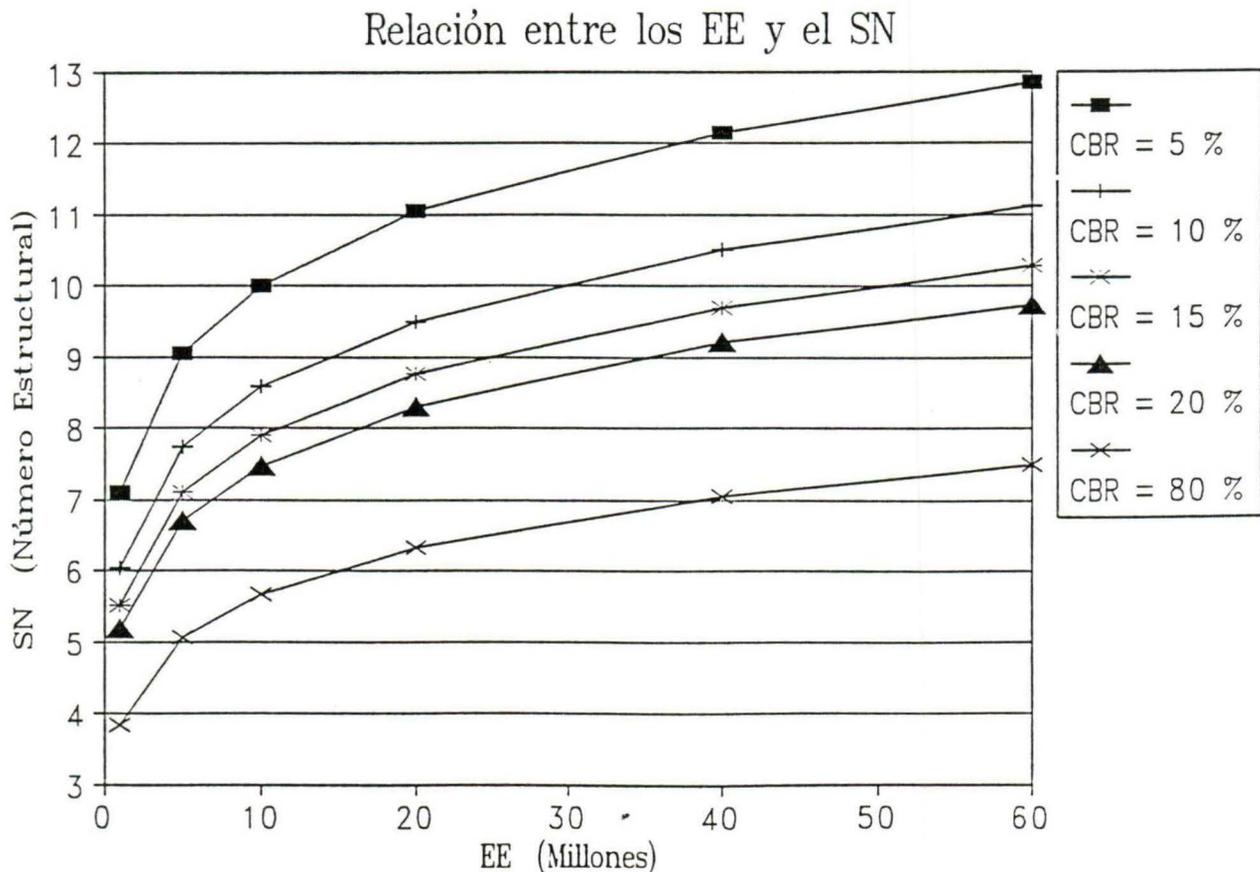


GRAFICO III.1. Número Estructural vs Ejes equivalentes (EE)

Normalmente en el país, se especifica bajo las capas asfálticas, como mínimo, una base con un CBR $> 80\%$. Como el método requiere comprobar que el SN parcial que exista sobre cada capa estructural se ajuste a lo que señala la ecuación, la curva EE vs SN para CBR = 80% es, en la práctica, el aporte mínimo de las capas asfálticas, y sólo el saldo debe ser cubierto por los aportes de bases y sub-bases. Es sobre esa parte del SN donde influye el coeficiente de drenaje, el que de acuerdo con la Tabla N° 2, puede variar entre 0,4 y 1,4, en las condiciones extremas, es decir, 3,5 veces.

En consecuencia:

- * Normalmente el coeficiente de drenaje no tiene influencia en los espesores de las capas asfálticas.
- * Influye fuertemente en los espesores de las bases y sub-bases, pudiendo en los casos extremos, modificar el coeficiente estructural de 1 a 3,5.

b. Influencia del Parámetro " C_d " en el Diseño (Pavimentos Rígidos)

El Coeficiente de Drenaje influye directamente sobre el espesor del hormigón, teniendo influencia en la resistencia a la flexotracción del hormigón.

Como el C_d puede variar entre los valores 0,8 y 1,2, interesa analizar la variación de los EE de diseño en función de la variación del C_d , para distintos espesores típicos de pavimento. Para ello se confeccionó el Gráfico III.2, utilizando un módulo de reacción de la sub-rasante, $k = 50$ MPa/m, resistencia media a la flexotracción de 5 MPa, módulo de elasticidad del hormigón de 28.000 MPa, coeficiente de transmisión de cargas, $J = 3,8$, bermas no pavimentadas y losas de 4,5 m. de largo. Luego, se graficaron las mismas curvas del Gráfico III.2, pero con la variación relativa de los EE en el eje de la ordenada; se obtuvo que la variación relativa de los EE en función del C_d es independiente del espesor del hormigón (Gráfico III.3).

RELACION EE vs. Cd PARA DISTINTOS ESPESORES DE PAVIMENTO

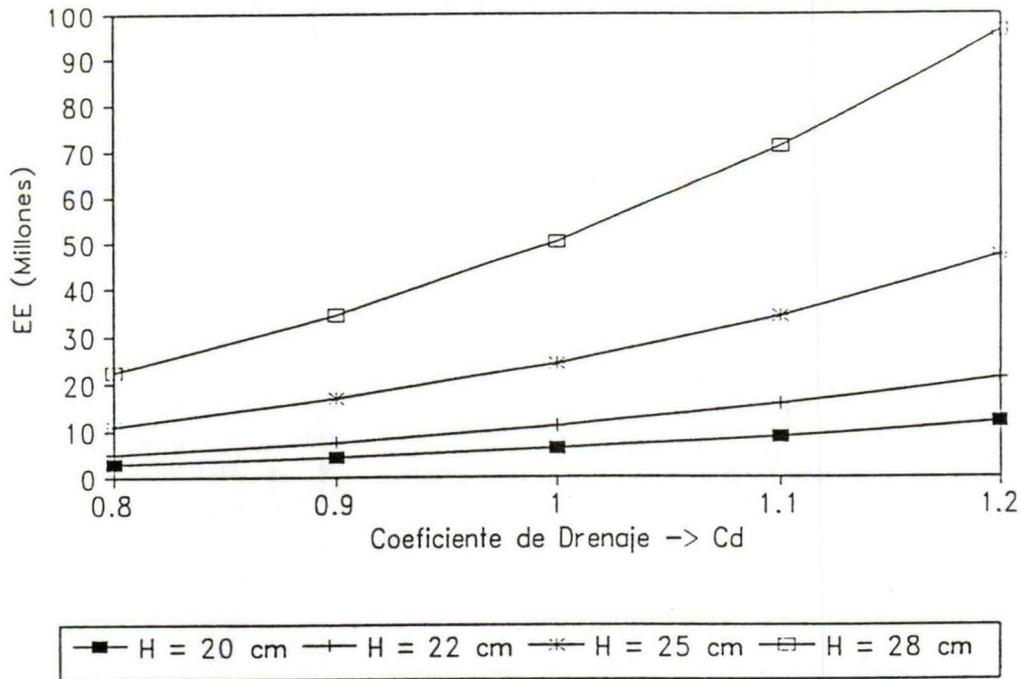


GRAFICO III.2

EFFECTO DE LA VARIACION DEL Cd EN LOS EJES EQUIVALENTES ADMISIBLES

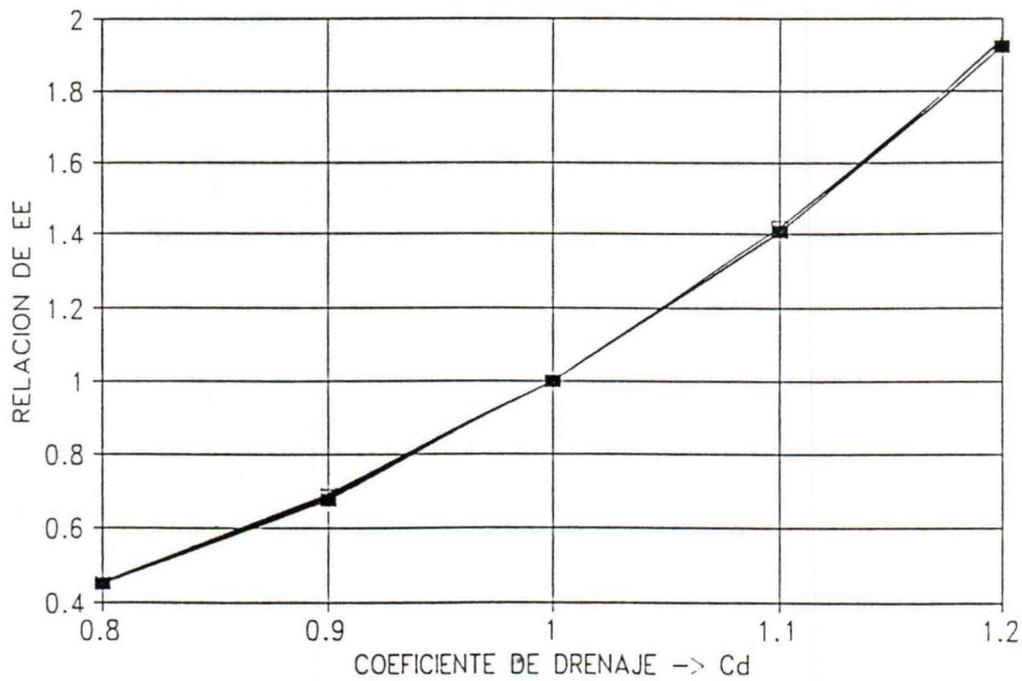


GRAFICO III.3

REFERENCIAS

- 1.- **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures** (1993). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- 2.- Curso Internacional '**Diseño de Pavimentos Según Método AASHTO, 1993**'. Federal Highway Administration - Instituto Panamericano de Carreteras.
- 3.- García, Amalia (1986). **Estudio de la Infiltración de Aguas-Lluvias en una Estructura de Pavimento**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil.
- 4.- Juárez B. y A. Rico (1965). **Mecánica de Suelos**. México.
- 5.- Bear, J. (1979). **Hydraulics of Groundwater**. Mc Graw Hill.
- 6.- **Symposium on Permeability of Soils** (1954). ASTM Special Technical Publication, 163.
- 7.- Faraggi, V. y J. Quezada (1991). Drenaje de las Capas No Tratadas en las Calzadas Asfálticas. **6º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto**. Santiago, Chile.
- 8.- Mc Enroe, B. (1994). Drainability of Granular Bases for Highway Pavements. **Transportation Research Board**.
- 9.- **Especificaciones y Métodos de Muestreo y Ensaye de la Dirección de Vialidad** (1986). Santiago, Chile.
- 10.- **Balance Hídrico de Chile** (1987). MOP - DGA. Santiago, Chile.
- 11.- Seeds, S. y G. Hicks (1991). **Development of Drainage Coefficientts for the 1986 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Transportation Research Record, 1307, pp 256-267.

06363

625.8
CCHC
C172 dr
CA



Cámara Chilena de la Cons-
AUTOR tución

Disenabilidad y Tiempo
TITULO de Satucción...

| Fecha | NOMBRE | Firma |
|---------|-------------------|-------|
| 18-2-77 | Walter Chiriacoff | |
| | | |
| | | |



Autor.: CCHC.

Título: Disenabilidad y Tiempo...

Nº top.: 06363