

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNIDAD ENSENADA**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA INALÁMBRICA CON  
DETECCIÓN DIRECTA Y ESTUDIO DE LA VIABILIDAD PARA EL USO EN LA  
CIUDAD DE ENSENADA, B.C.**


TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA

PRESENTA:  
**NEVAREZ ALCARAZ AMADO**

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2006.

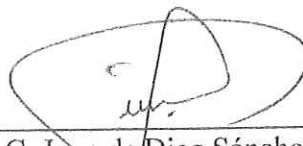
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

TESIS DEFENDIDA POR  
**Amado Nevarez Alcaraz**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



M.C. Ramón Muraoka Espíritu

*Co-Director de tesis*



M.C. Juan de Dios Sánchez López

*Co-Director de tesis*



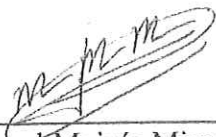
Dr. Oscar Roberto López Bonilla

*Sinodal propietario*



Dr. Rosa Martha López Gutiérrez

*Sinodal propietario*



M.C. Manuel Moisés Miranda Velasco

*Sinodal propietario*

**RESUMEN** de la Tesis de **Amado Nevarez Alcaraz** presentada para la obtención del grado de Ingeniero en Electrónica. Ensenada, Baja California, México. Diciembre de 2006.

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN ÓPTICA INALÁMBRICA CON DETECCIÓN DIRECTA Y ESTUDIO DE LA VIABILIDAD PARA EL USO EN LA CIUDAD DE ENSENADA, B.C.**

En esta tesis se realiza el estudio y diseño de un sistema de comunicación óptica inalámbrica con detección directa, tomando las características climatológicas de la ciudad de Ensenada B.C. México, para su diseño.

Se estudian los principios de las comunicaciones ópticas inalámbricas, las perturbaciones que afectan a un haz láser al propagarse en la atmósfera terrestre, también se desarrolla una metodología para el diseño del sistema y se establecen criterios sobre las condiciones climatológicas en las que podrá operar.

**Palabras clave:** comunicaciones ópticas inalámbricas, detección directa, niebla, visibilidad.

## DEDICATORIA

A mi Dios

Por permanecer conmigo en todo momento.

A mis padres

Que con su apoyo y ejemplo me han enseñado a superar los retos y adversidades que la vida presenta, con cariño, mis padres Amado Nevarez y Sofía Alcaraz.

Y a todos los que con su apoyo y cariño han aportado para que este trabajo se realizara.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Al M.C. Muraoka por su enseñanza en el laboratorio de comunicaciones ópticas, por su orientación en el desarrollo de este trabajo y lo más importante, por la amistad que me ha brindado. Gracias Ramón.

Al M.C. y próximamente Dr. Juan de Dios por aceptar ser mi director y darme consejos que fueron de mucha utilidad en el trabajo. Gracias.

A mis sinodales por sus correcciones que ayudaron a formar este trabajo. Gracias.

A mis compañeros de la generación XXV de Ingeniería en Electrónica.

A mis Padres, por que sin su ayuda no hubiera sido posible este trabajo. Gracias.

A mis hermanos. Gracias

A Mariana, por apoyarme en esta recta final, muchas gracias mi niña.

|   |          |
|---|----------|
| <b>I INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b> |
| I.1 ANTECEDENTES.....   | 2        |
| I.2 JUSTIFICACIÓN .....   | 4        |
| I.3 OBJETIVO GENERAL .....  | 5        |
| I.3.1 Objetivos Específicos.....  | 5        |
| <b>II SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS .....</b>         | <b>6</b> |
| II.1 ESQUEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS .....               | 6        |
| II.1.1 Sistema de detección directa .....                               | 8        |
| II.1.1.1 Principio de funcionamiento.....                               | 9        |
| II.2 PERTURBACIONES Y EFECTOS ATMOSFÉRICOS.....                         | 11       |
| II.2.1 La niebla, nubes, lluvia, nieve y tormentas de arena .....       | 11       |
| II.2.2 Dispersión y absorción.....                                      | 12       |
| II.2.3 Efectos de turbulencia.....                                      | 13       |
| II.2.3.1 Los efectos y causas de la turbulencia .....                   | 13       |
| II.2.4 Línea de vista.....  | 14       |
| II.2.5 Transmisión de señales Infrarrojas a través de la atmósfera..... | 14       |
| II.2.5.1 Ventanas atmosféricas.....                                     | 15       |
| II.2.5.2 Pérdidas geométricas.....                                      | 16       |
| II.2.5.3 Atenuación atmosférica o ley de Beer .....                     | 17       |
| II.2.5.4 Dispersión del haz.....  | 18       |
| II.2.5.4.1 Dispersión Rayleigh .....                                    | 19       |
| II.2.5.4.2 Dispersión Mie.....  | 20       |
| II.2.5.5 Visibilidad .....  | 21       |
| II.2.5.6 Absorción .....  | 22       |
| II.3 VIBRACIÓN EN EDIFICIOS .....                                       | 23       |

**CONTENIDO (continuación)****página**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>III ESTUDIO DE LA VISIBILIDAD PARA LA CIUDAD DE ENSENADA B.C.</b>         | <b>24</b> |
| .....  |           |
| III.1 INTRODUCCIÓN.....  | 24        |
| III.2 COMPORTAMIENTO DE LA VISIBILIDAD EN LA CIUDAD DE ENSENADA .....        | 26        |
| III.2.1 Graficas de visibilidad en el año 2001 .....                         | 26        |
| III.2.2 Graficas de visibilidad en el año 2002.....                          | 32        |
| III.2.3 Graficas de visibilidad en el año 2003 .....                         | 38        |
| III.2.4 Graficas de visibilidad en el año 2004.....                          | 44        |
| III.2.5 Graficas de visibilidad en el año 2005 .....                         | 50        |
| III.3 VISIBILIDAD DEL 2001 AL 2005. ....                                     | 56        |
| <b>IV DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS<br/>INALÁMBRICAS.....</b> | <b>60</b> |
| IV.1 CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DE POTENCIA .....                               | 61        |
| IV.1.1 Parámetros del sistema.....   | 64        |
| IV.1.2 Margen de desvanecimiento .....                                       | 65        |
| IV.1.3 Pérdidas ópticas .....  | 66        |
| IV.1.4 Pérdidas por propagación.....   | 66        |
| IV.1.4.1 Ganancia de la antena transmisora.....                              | 67        |
| IV.1.4.2 Ganancia de la antena receptora .....                               | 68        |
| IV.1.4.3 Pérdidas isotrópicas.....   | 69        |
| IV.1.4.4 Pérdidas por turbulencia.....                                       | 69        |
| IV.1.5 Pérdidas por apuntamiento .....                                       | 71        |
| IV.1.6 Pérdidas atmosféricas.....  | 73        |
| IV.1.7 Pérdidas por colimación.....  | 76        |
| IV.2 MARGEN DE DISPONIBILIDAD .....  | 79        |
| <b>V RESULTADOS.....</b>   | <b>80</b> |

| <b>CONTENIDO (continuación)</b>   | <b>página</b> |
|---|---------------|
| V.1 PARÁMETROS DEL SISTEMA.....   | 80            |
| V.2 MARGEN DE DISPONIBILIDAD PARA DIFERENTES VALORES DE POTENCIA Y<br>DISTANCIA ..... | 82            |
| <b>VI CONCLUSIONES .....</b>  | <b>86</b>     |
| <b>VII TRABAJOS A FUTURO .....</b>  | <b>88</b>     |
| <b>REFERENCIAS.....</b>   | <b>89</b>     |

## LISTA DE FIGURAS

## página

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Esquema básico de un sistema de comunicación.....                                    | 1  |
| Figura 2. Espectro electromagnético.....   | 2  |
| Figura 3. Diagrama a bloques del sistema de comunicaciones inalámbricas.....                   | 6  |
| Figura 4. Receptor óptico.....   | 7  |
| Figura 5. Enlace terrestre.....  | 7  |
| Figura 6. Enlace inter-satelital.....  | 7  |
| Figura 7. Enlace tierra-aire.....  | 8  |
| Figura 8. Diagrama a bloque de un sistema de comunicaciones ópticas con detección directa..... | 9  |
| Figura 9. Fluctuaciones de potencia en el receptor debido a la turbulencia.....                | 13 |
| Figura 10. Ejemplo de visibilidad directa.....   | 14 |
| Figura 11. Ventanas atmosféricas normalizadas.....   | 16 |
| Figura 12. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2001.....               | 26 |
| Figura 13. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2001.....             | 27 |
| Figura 14. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2001.....               | 27 |
| Figura 15. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2001.....               | 28 |
| Figura 16. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2001.....                | 28 |
| Figura 17. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2001.....               | 29 |
| Figura 18. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2001.....               | 29 |
| Figura 19. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2001.....              | 30 |
| Figura 20. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2001.....          | 30 |
| Figura 21. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2001.....             | 31 |
| Figura 22. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2001.....           | 31 |
| Figura 23. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2001.....           | 32 |
| Figura 24. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2002.....               | 32 |
| Figura 25. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2002.....             | 33 |
| Figura 26. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2002.....               | 33 |

**LISTA DE FIGURAS (continuación)****página**

|  |    |
|--|----|
| Figura 27. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2002. ....      | 34 |
| Figura 28. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2002. ....       | 34 |
| Figura 29. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2002. ....      | 35 |
| Figura 30. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2002. ....      | 35 |
| Figura 31. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2002. ....     | 36 |
| Figura 32. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2002. .... | 36 |
| Figura 33. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2002. ....    | 37 |
| Figura 34. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2002. ....  | 37 |
| Figura 35. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2002. ....  | 38 |
| Figura 36. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2003. ....      | 38 |
| Figura 37. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2003. ....    | 39 |
| Figura 38. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2003. ....      | 39 |
| Figura 39. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2003. ....      | 40 |
| Figura 40. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2003. ....       | 40 |
| Figura 41. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2003. ....      | 41 |
| Figura 42. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2003. ....      | 41 |
| Figura 43. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2003. ....     | 42 |
| Figura 44. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2003. .... | 42 |
| Figura 45. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2003. ....    | 43 |
| Figura 46. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2003. ....  | 43 |
| Figura 47. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2003. ....  | 44 |
| Figura 48. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2004. ....      | 44 |
| Figura 49. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2004. ....    | 45 |
| Figura 50. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2004. ....      | 45 |
| Figura 51. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2004. ....      | 46 |
| Figura 52. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2004. ....       | 46 |
| Figura 53. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2004. ....      | 47 |

**LISTA DE FIGURAS (continuación)****página**

|  |    |
|--|----|
| Figura 54. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2004. ....                                  | 47 |
| Figura 55. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2004. ....                                 | 48 |
| Figura 56. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2004.....                              | 48 |
| Figura 57. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2004.....                                 | 49 |
| Figura 58. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2004.....                               | 49 |
| Figura 59. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2004. ....                              | 50 |
| Figura 60. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2005.....                                   | 50 |
| Figura 61. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2005 .....                                | 51 |
| Figura 62. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2005.....                                   | 51 |
| Figura 63. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2005. ....                                  | 52 |
| Figura 64. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2005.....                                    | 52 |
| Figura 65. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2005.....                                   | 53 |
| Figura 66. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2005. ....                                  | 53 |
| Figura 67. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2005. ....                                 | 54 |
| Figura 68. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2005.....                              | 54 |
| Figura 69. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2005.....                                 | 55 |
| Figura 70. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2005.....                               | 55 |
| Figura 71. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2005. ....                              | 56 |
| Figura 72. Número de días con visibilidad menor a 2 Km (periodo 2001-2005).....                                    | 57 |
| Figura 73. Promedio de días que presentan visibilidad menor a 2 Km. ....   | 58 |
| Figura 74. Promedio contabilizando el total de horas expresado en días. ....                                       | 58 |
| Figura 75. Componentes del presupuesto de potencia para un sistema de comunicaciones<br>ópticas inalámbricas. .... | 61 |
| Figura 76. Representación gráfica del presupuesto de potencia.....   | 63 |
| Figura 77. Atenuación atmosférica con visibilidad de 200m a 2Km @ 1550nm.....                                      | 75 |
| Figura 78. Margen de disponibilidad del sistema de comunicaciones ópticas.....                                     | 81 |

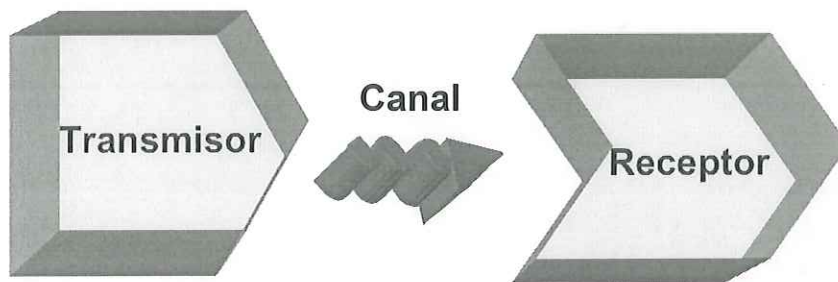
| <b>LISTA DE FIGURAS (continuación)</b>   | <b>página</b> |
|--|---------------|
| Figura 79. El margen mínimo de potencia para poder afirmar que el enlace se podrá establecer. ....     | 82            |
| Figura 80. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 1 Km. ....  | 83            |
| Figura 81. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 800 m. .... | 84            |
| Figura 82. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 600 m. .... | 84            |
| Figura 83. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 400 m. .... | 85            |
| Figura 84. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 200 m. .... | 85            |
| Figura 85. Promedio de días con niebla en la ciudad de Ensenada (2001-2005). ....                      | 86            |
| Figura 86. Margen de disponibilidad a una distancia de enlace de 1 Km para la ciudad de Ensenada. .... | 87            |

**LISTA DE TABLAS****página**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Código internacional de visibilidad para condiciones climatológicas y de precipitación.....          | 25 |
| Tabla 2. Parámetros para el diseño del sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas. .                      | 65 |
| Tabla 3. Resultados del diseño y especificaciones para el enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas. .... | 80 |
| Tabla 4. Potencias de transmisión seleccionadas .....   | 83 |
| Tabla 5. Distancias del enlace .....  | 83 |

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de cualquier sistema de comunicaciones es transferir información de un punto a otro. Esta transferencia de información comúnmente es realizada mediante la superposición (modulación) de la información sobre una onda electromagnética (portadora).



**Figura 1. Esquema básico de un sistema de comunicación.**

En los sistemas de radio, la frecuencia de portadora es seleccionada de una porción del espectro electromagnético para Radio Frecuencia (RF). Las microondas o sistemas milimétricos toman su frecuencia de portadora de la porción que le corresponde en el espectro electromagnético. En los sistemas de comunicaciones ópticas la portadora es seleccionada en el intervalo óptico del espectro electromagnético, el cual incluye el infrarrojo, visible, y frecuencias ultra violetas [Gagliardi y Karp, 1995].

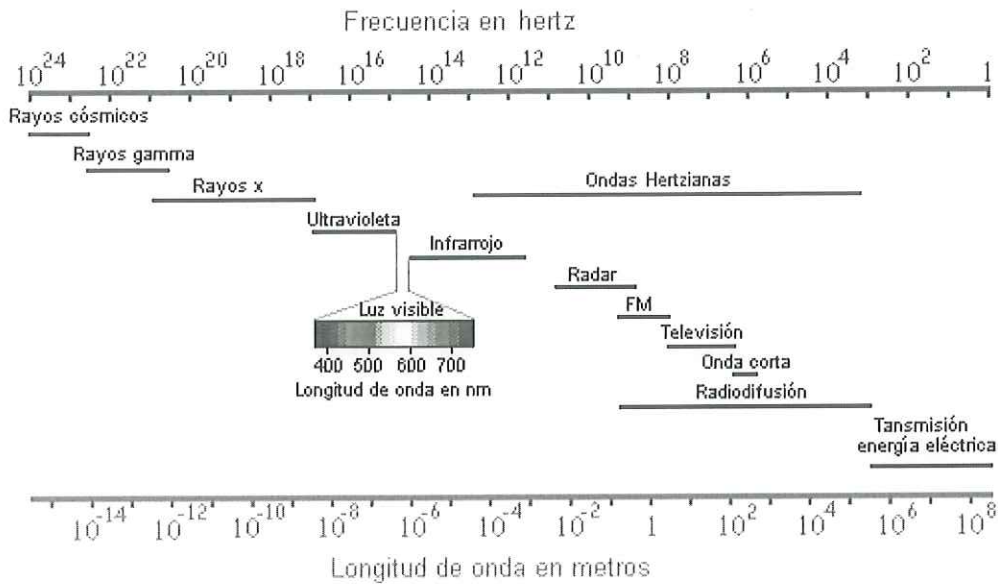


Figura 2. Espectro electromagnético.

## 1.1 Antecedentes

Las comunicaciones ópticas no son algo nuevo, señales de humo y presencia y ausencia de fuego han comunicado información en los pasados siglos [Alexander, 1997].

La revolución en la tecnología de las comunicaciones ópticas tiene su inicio en 1880 cuando Alexandro Graham Bell experimenta con un dispositivo que utilizaba la luz solar reflejada en un espejo para modularla con la voz y en el receptor una foto celda de selenio para remodelar la voy transmitida, este dispositivo solo alcanzaba unos doscientos metros, al cual le llamo fonófono (1880) [Alexander, 1997].

A finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX el estado del arte para las comunicaciones ópticas radicó en enlaces de corto alcance y con la invención del laser en los 60's y el desarrollo de fibra óptica con baja atenuación en los 70'le dio un empuje mayor al desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticas [Alexander, 1997].

Los primeros diseños de sistemas de comunicaciones ópticos inalámbricos fueron desarrollados por la NASA (Nacional Aeronautic and Space Administration) a mediados de los 60 y fueron utilizados en investigación espacial y militar. El primer registro que se tiene de un sistema de comunicaciones ópticas inalámbrico para uso terrestre es en el año 1968 y fue publicado en el diario Nachrichtentechnik (Ingeniería en comunicaciones) en Alemania por el Doctor Erhard Kube [[www.freespaceoptics.org](http://www.freespaceoptics.org)].

Los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricos resurgen por la necesidad de enlaces de alta velocidad a bajo costo, esto quiere decir que en algunos sitios el espectro radioeléctrico estaba saturado y el costo de las licencias es caro.

Estos sistemas utilizan los dispositivos de los sistemas de fibra óptica por lo que solo se tiene que hacer investigación el los efectos de los haces infrarrojo, específicamente 1550nm sobre las perturbaciones atmosféricas, también realizando mejoras para eficientizar los enlaces tales como multi laseres, tracking.

## *1.2 Justificación*

Recientes progresos en las comunicaciones ópticas en el espacio libre con detección directa las hacen aparecer como una alternativa importante a los enlaces radioeléctricos y/o alámbricos convencionales. Esto es debido a su capacidad potencial para operar a altas velocidades de transmisión y requiriendo antenas (ópticas) que son mucho más pequeñas que las de radiofrecuencia para una ganancia de antena dada [Willebrand y Ghuman, 2002]. Adicionalmente, al utilizar los sistemas ópticos inalámbricos puede reducirse el problema actual de saturación del espectro radioeléctrico en las bandas de RF [Mendez y Gagliardi, 2001]. Estos enlaces de comunicación inalámbrica punto-a-punto son conocidos como “Comunicación Láser de Espacio Libre” o “Comunicación Óptica Inalámbrica”, tecnológicamente son más conocidos por su acrónimo en inglés de “Free Space Optics (FSO)”.

Las señales ópticas son de muy alta frecuencia y caen dentro del espectro de servicios inalámbricos no regulados, además de ser casi completamente inmunes a las interferencias de radio o de otras portadoras ópticas [Desurvire, 2004].

Los sistemas de FSO utilizan el espacio libre o atmósfera como medio de comunicaciones, el cual es menos predecible que la fibra óptica debido a perturbaciones atmosféricas tales como la niebla, absorción, dispersión, y a obstrucciones físicas, oscilación de edificios y centelleo [Willebrand y Ghuman, 2002], afectando su disponibilidad y prestaciones.

En este contexto es que se encuentra la realización de este trabajo.

### ***I.3 Objetivo General***

Desarrollar una metodología de diseño de un sistema comunicación óptica inalámbrica, basado en la estadística del fenómeno atmosférico niebla de la ciudad de Ensenada Baja California, México.

#### **I.3.1 Objetivos Específicos**

- Estudio de los principios de las comunicaciones ópticas inalámbricas.
- Investigación de las condiciones climatológicas de la ciudad de Ensenada B.C., en años recientes.
- Diseño de un sistema de comunicaciones ópticas digitales con detección directa empleando el espacio libre como canal de comunicación.
- Establecer el criterio sobre cuales condiciones puede operar un sistema de comunicación óptica inalámbrica en la ciudad de Ensenada

## II SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS

### II.1 Esquema de comunicaciones ópticas inalámbricas

El diagrama a bloques que se presenta en la figura 3, es el de un sistema de comunicaciones inalámbricas. La fuente genera los datos a transmitir. La fuente esta modulada a la salida en una portadora óptica (la frecuencia de portadora es tomada del dominio óptico en el espectro electromagnético). Después es transmitida en forma de un haz de luz a través del canal (espacio libre, atmósfera, etc.). En el receptor el haz de luz que recibe, es colectada y procesado (foto detección) [Gagliardi y Karp, 1995].

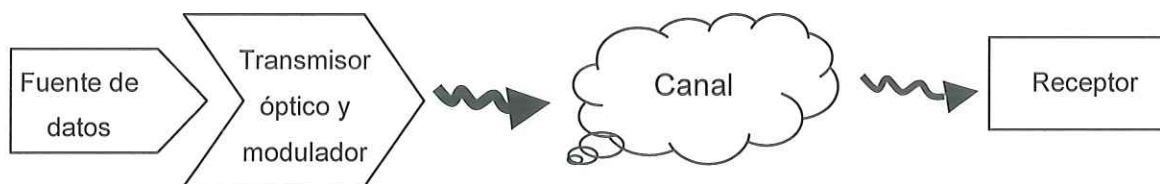
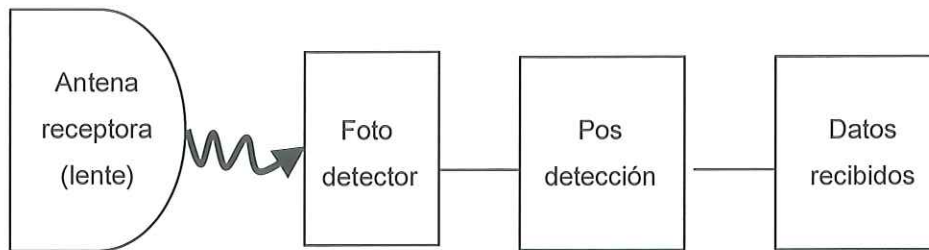


Figura 3. Diagrama a bloques del sistema de comunicaciones inalámbricas.

En la modulación de la información hay algunos esquemas que son utilizados con frecuencia del cual destaca la modulación en intensidad (IM), en la cual la información es usada para modular la portadora óptica.

El receptor colecta el haz que incide en el detector y la procesa para recuperar la información transmitida.

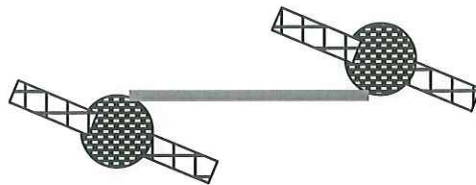


**Figura 4. Receptor óptico.**

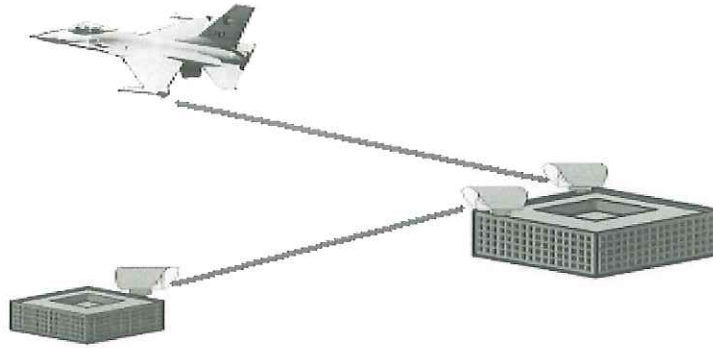
Algunos ejemplos de sistemas de comunicaciones inalámbricas pueden ser: enlaces terrestres (edificio base-edificio base), espaciales (satélite-satélite), tierra-espacio y viceversa (edificio base-satélite y viceversa), tierra-aire (edificio base-aeronave) y aire-aire (aeronave-aeronave).



**Figura 5. Enlace terrestre.**



**Figura 6. Enlace inter-satelital.**



**Figura 7. Enlace tierra-aire.**

### **II.1.1 Sistema de detección directa**

En la actualidad el sistema de comunicación óptica más utilizado es el llamado; modulación en intensidad y detección directa (MI/DD). Un esquema a bloque se observa en la figura 5 la potencia óptica de salida es modulada con la señal eléctrica de los datos de información, la luz viaja a través del canal óptico (fibra óptica o espacio libre). En el receptor, el detector solo responde a los cambios de intensidad de la luz, y de esta sencilla manera se regeneran los datos transmitidos.

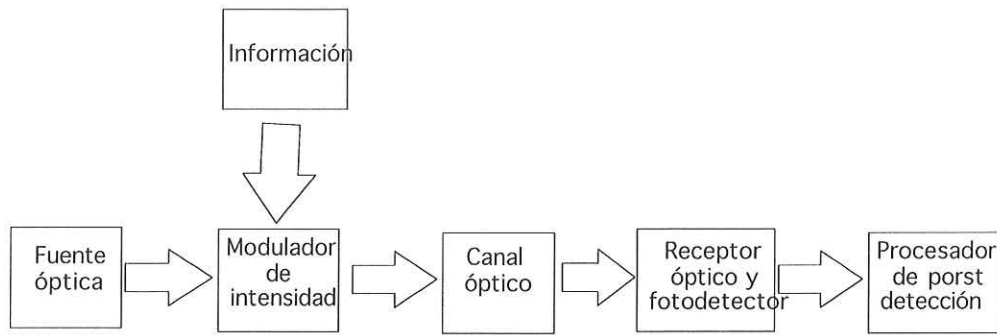


Figura 8. Diagrama a bloque de un sistema de comunicaciones ópticas con detección directa.

### II.1.1.1 Principio de funcionamiento

Por su simplicidad se considera que la señal transmitida es una onda plana definida como:

$$E_s = A_s \cos[\omega_s t + \phi_s(t)] \quad (1)$$

donde:

$E_s$  : campo eléctrico de la señal

$A_s$  : amplitud del campo de la señal óptica

$\omega_s$  : frecuencia de portadora óptica

$\phi_s$  : fase de la señal óptica

En el transmisor de un sistema de MI/DD la señal eléctrica (información) modula en amplitud a la portadora óptica. De este modo la potencia óptica es proporcional al nivel de corriente de la señal.

En el receptor, el detector convierte la señal óptica recibida en una señal eléctrica que es proporcional a la intensidad (cuadrado del campo eléctrico) de la señal óptica, produciendo:

$$I_{dd} = E_s^2 = \{A_s \cos[\omega_s t + \phi_s(t)]\}^2 \quad (2)$$

donde:

$I_{dd}$ : Intensidad recibida en el detector.

Aplicando la identidad trigonométrica  $\cos^2 x = \frac{1}{2}(1 + \cos 2x)$  se llega a la siguiente expresión,

$$I_{dd} = E_s^2 = \frac{1}{2} A_s^2 \{1 + \cos[2\omega_s t + 2\phi_s(t)]\} \quad (3)$$

El término  $[2\omega_s t + 2\phi_s(t)]$  es eliminado en el receptor debido a que su frecuencia es el doble de la portadora óptica y está por encima de la capacidad de respuesta del detector, quedando el resultado como:

$$I_{dd} = \frac{1}{2} A_s^2 \quad (4)$$

para el caso digital el uno lógico es  $=\frac{1}{2} A_s^2$  y para el cero lógico es  $= 0$ .

## ***II.2 Perturbaciones y efectos atmosféricos***

### **II.2.1 La niebla, nubes, lluvia, nieve y tormentas de arena**

Las perturbaciones atmosféricas que se pueden presentar y degradar el enlace son: la niebla, nubes bajas, lluvia, nieve y tormentas de arena. [Willebrand y Ghuman, 2002]

La niebla: El mayor reto para el sistema de FSO es la niebla. La niebla es vapor de agua en forma de pequeñas gotas de un diámetro comparable con la longitud de onda del infrarrojo cercano. Estas gotitas son capaces de modificar las características o dificultar por completo el paso del haz de luz, esto debido a una combinación de factores que se dan en la niebla al enviar el haz, y son; absorción, reflexión, y la dispersión. Este último factor es el que más afecta al enlace de FSO.

Nubes bajas: es muy similar a la neblina, y se pueden acompañar de lluvia o nieve.

La lluvia: el impacto es significativamente poco comparado con la niebla debido al radio de las gotas (200  $\mu\text{m}$  – 2000  $\mu\text{m}$ ) el cual es significativamente más grande que la longitud de onda de la fuente de luz de los sistemas de FSO.

Nieve: debido al tamaño de la partícula de nieve comparado con la longitud de onda de operación el impacto de una nevada, tormenta de nieve, se puede comparar

aproximadamente entre lluvia ligera a niebla moderada, con atenuación del enlace de 3 dB/Km a 30 dB/Km. También se puede causar una capa de hielo en la ventana del transceptor.

Tormentas de arena: se presenta en áreas de desierto y es muy raro en la zona urbana.

## **II.2.2 Dispersión y absorción**

La dispersión es el re-direccionamiento o redistribución de la luz lo cual reduce significativamente la intensidad de la misma en el receptor [Willebrand y Ghuman, 2002].

Este efecto es producido por partículas tales como la de la niebla. La cual es la más perjudicial para los sistemas de FSO.

El coeficiente de absorción está en función de la absorción dada por las partículas, y de la densidad de partículas. Existen absorbentes que pueden dividirse en dos clases generales: absorbente molecular (gases) y absorbente aerosol (polvo, humo, gotas de agua) [Willebrand y Ghuman, 2002].

### II.2.3 Efectos de turbulencia

La turbulencia es ocasionada por cambios en el índice de refracción en el medio de propagación y por lo tanto se provoca un cambio en la trayectoria de la luz. A esto se le conoce como centelleo. Esto a su vez ocasiona frente de onda del haz láser [Willebrand y Ghuman, 2002] [Hemmati y Mercherle 2004].

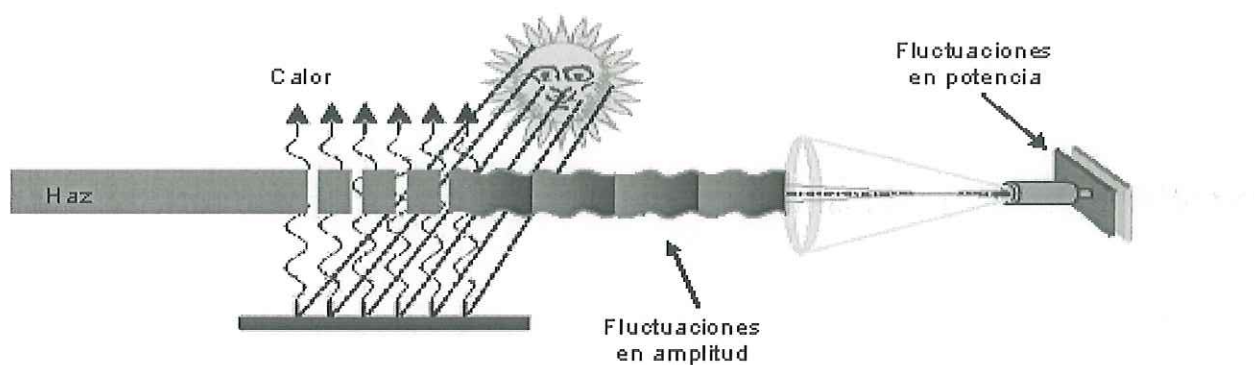


Figura 9. Fluctuaciones de potencia en el receptor debido a la turbulencia.

#### II.2.3.1 Los efectos y causas de la turbulencia

El haz del láser presenta tres efectos bajo turbulencia. Primero el rayo puede ser desviado al azar por el cambio en el índice de refracción de las células de aire. Este fenómeno es conocido como desvío de haz. Segundo, la fase del haz puede variar, produciendo fluctuaciones o centelleo. Tercero, el haz puede esparcirse más de lo que dice la teoría de difracción láser [Willebrand y Ghuman, 2002].

## II.2.4 Línea de vista

Los sistemas de comunicaciones ópticas inalámbricas requieren tener línea de vista (figura 10) “line of sight (LoS)” entre los transceptores. Esto quiere decir que el Transmisor (Tx) y el Receptor (Rx) se puedan ver uno al otro, ya que los haces infrarrojos son extremadamente angostos [Willebrand y Ghuman, 2002].

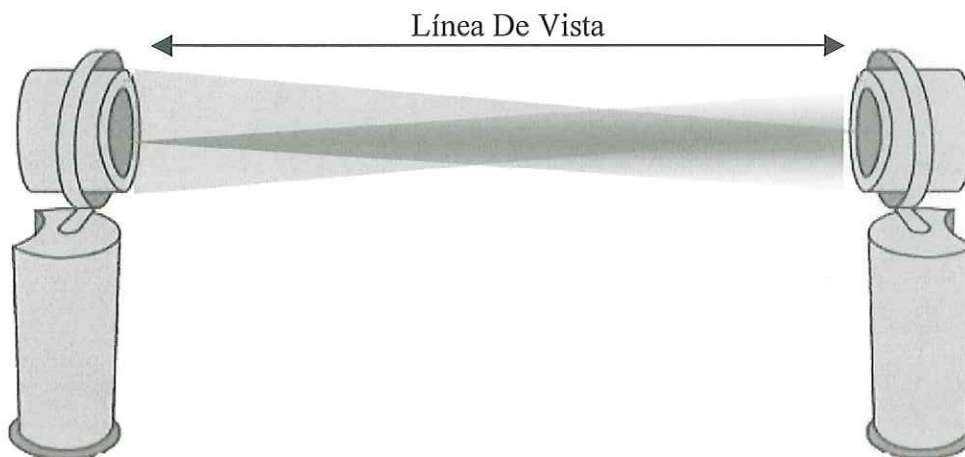


Figura 10. Ejemplo de visibilidad directa.

## II.2.5 Transmisión de señales Infrarrojas a través de la atmósfera

La atmósfera está compuesta por moléculas de oxígeno y nitrógeno aun estando visiblemente clara. Por otra parte el clima puede contribuir con grandes cantidades de vapor de agua; otros componentes pueden existir en regiones con contaminación. Estas

partículas pueden dispersar y absorber los fotones del infrarrojo propagándose en la atmósfera [Willebrand y Ghuman, 2002].

Aunque no es posible cambiar la física de la atmósfera, sí se puede tomar ventajas de las ventanas atmosféricas por la elección de la longitud de onda para reducir al mínimo la atenuación de la señal de la dispersión y absorción.

Los sistemas de FSO utilizan la ventana atmosférica del intervalo espectral IR aprovechando la tecnología de comunicaciones por fibra óptica.

### **II.2.5.1 Ventanas atmosféricas**

Las ventanas atmosféricas comúnmente usadas para comunicaciones ópticas inalámbricas son las del intervalo IR. Las partículas absorbentes más comunes son, de agua, dióxido de carbono y ozono.

Las ventanas existen en  $0.72\mu\text{m}$  y  $1.5\mu\text{m}$ , y otras. La región de  $0.7\mu\text{m}$  a  $2.0\mu\text{m}$  es denominada por la absorción de vapor de agua y la región de  $2.0\mu\text{m}$  a  $4.0\mu\text{m}$  es denominada por la combinación de agua y dióxido de carbono, como se ve en la figura 11 [Willebrand y Ghuman, 2002].

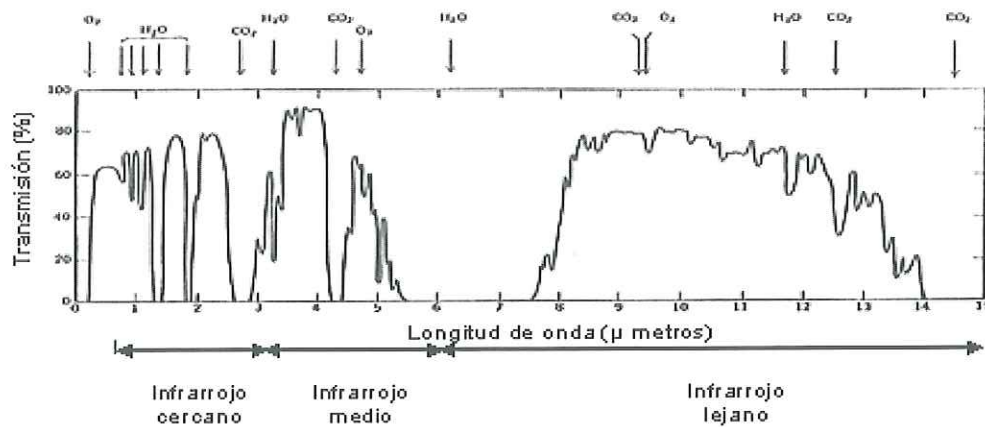


Figura 11. Ventanas atmosféricas normalizadas.

### II.2.5.2 Pérdidas geométricas

Las pérdidas geométricas son las pérdidas que ocurren debido a la divergencia del haz que es emitido del transmisor óptico.

Las pérdidas por trayectoria geométrica para un enlace de FSO dependen del ancho del haz del transmisor óptico ( $\theta$ ), la longitud de trayectoria ( $Z$ ) y el área de apertura del receptor ( $D_r$ ) [Hemmati y Mercherle 2004].

$$L_{geo} = 20 \log \frac{\theta Z}{D_r} \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

donde:

$L_{geo}$ : pérdidas geométricas

$Z$ : distancia (metros)

$\theta$ : divergencia del haz (radianes)

$D_r$ : diámetro del receptor (metros)

### II.2.5.3 Atenuación atmosférica o ley de Beer

La ley de Beer describe la atenuación de la luz viajando a través de la atmósfera debido a la absorción y dispersión.

En general la transmisión  $\tau$  en la atmósfera está en función de  $Z$ , y está expresada en la ley de Beer como [Willebrand y Ghuman, 2002]:

$$L_{atmosférica} = \log \tau \quad (6)$$

$$\frac{I_d}{I_{Tx}} = \tau = e^{(-\gamma Z)} \quad (7)$$

donde:

$\gamma$ : coeficiente de atenuación

$Z$ : distancia

$\frac{I_d}{I_{Tx}}$  es la relación entre la intensidad detectada ( $I_d$ ) y la intensidad de salida ( $I_{Tx}$ ) o

transmitida.

El coeficiente de atenuación es la suma de cuatro parámetros individuales; los coeficientes de dispersión  $\alpha$  de moléculas y aerosol, y coeficiente de absorción  $\beta$  de moléculas y aerosoles, cada uno en función de la longitud de onda [Willebrand y Ghuman, 2002]:

$$\gamma = \alpha_{moléculas} + \alpha_{aerosol} + \beta_{moléculas} + \beta_{aerosol} \quad (8)$$

esta fórmula representa la atenuación total por el coeficiente de atenuación  $\gamma$ , y es el resultado de la superposición de varios procesos de dispersión y absorción.

#### II.2.5.4 Dispersión del haz

La dispersión puede impactar drásticamente en las prestaciones de los sistemas FSO.

Existen varias categorías de dispersión, dependiendo del tamaño característico de la partícula, ( $r$ ), que la luz encuentra en el viaje al receptor. Una descripción se da como [Willebrand y Ghuman, 2002] [Hemmati y Mercherle 2004]:

$$x_0 = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (9)$$

donde:

$x_0$ : dispersión del haz

$\lambda$  : longitud de onda de transmisión

$r$  : radio de la partícula

para  $x_0 \ll 1$  la dispersión es tipo Rayleigh;

para  $x_0 \approx 1$  la dispersión es tipo Mie;

para  $x_0 \gg 1$  la dispersión puede ser tratada con óptica geométrica.

#### ***II.2.5.4.1 Dispersión Rayleigh***

La radiación que incide en los electrones de los átomos o moléculas, induce cargas desequilibradas que los hace oscilar a la frecuencia de la radiación incidente. Los electrones oscilantes irradian la luz en forma de onda dispersa. La ecuación clásica de Rayleigh para dispersión de una sección transversal es [Willebrand y Ghuman, 2002]:

$$\sigma_s = \frac{f e^4 \lambda_0^4}{6 \pi \epsilon_0^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda_0^4} \quad (10)$$

donde  $f$  es la fuerza de oscilación,  $e$  es la carga del electrón,  $\lambda_0$  es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia natural,  $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$ ,  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica,  $c$  es la velocidad de la luz, y  $m$  es la masa del objeto oscilante.

Para los sistemas de FSO funcionando en longitudes de onda grandes de intervalo de infrarrojo cercano, el impacto de la dispersión Rayleigh en la señal de transmisión puede ser ignorado.

### *II.2.5.4.2 Dispersión Mie*

La dispersión Mie ocurre para partículas comparables con el tamaño de la longitud de onda de la luz. Por lo tanto en el intervalo de longitud de onda del infrarrojo cercano, la niebla, bruma y partículas contaminantes (aerosoles) son los causantes al proceso de dispersión Mie.

Teóricamente es complicado, el problema se presenta en comparar la teoría con el experimento. Por que la absorción domina la mayoría del espectro, los datos se deben de tomar en el intervalo de longitud de onda donde se presentan las ventanas atmosféricas, asumiendo que solamente ocurre la dispersión. Además, la distribución de partículas debe conocerse. Para aerosoles, esta distribución depende del lugar, hora, humedad relativa, velocidad del viento, etcétera.

Existe una fórmula empírica para calcular el coeficiente de atenuación debido a la dispersión Mie y está dada como [Willebrand y Ghuman, 2002]:

$$\gamma = \frac{3.91}{\nu} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta} \quad (11)$$

donde:

$\gamma$  : coeficiente de atenuación atmosférica o dispersión Mie

$v$  : visibilidad

$\lambda$  : longitud de onda de transmisión

$\delta$  : distribución del tamaño de partículas de dispersión

donde:

$$\delta = \left[ \begin{array}{ll} 0.585(v)^{\frac{1}{3}} & \text{para } v < 6Km \\ 1.6 & \text{para } v > 50Km \\ 1.3 & \text{para } 6Km < v < 50Km \end{array} \right]$$

El resultado de las observaciones empíricas es que la dispersión Mie es causada por la niebla como fuente principal de la atenuación del haz y este efecto es acentuado conforme la distancia va creciendo [Willebrand y Ghuman, 2002].

### II.2.5.5 Visibilidad

Se define como visibilidad la mayor distancia a la cual un objeto negro de dimensiones adecuadas puede ser visto y reconocido contra el horizonte, cielo o, en caso de observaciones nocturnas pudiera ser visto y reconocido si la iluminación general fuese aumentada a nivel de la luz diurna normal.

En el caso particular de la visibilidad horizontal, es la distancia máxima a la cual un observador puede ver e identificar un objeto situado cerca del plano horizontal sobre el cual él está apoyado [De Alemany, 1986].

### II.2.5.6 Absorción

Los átomos y moléculas son caracterizados por su índice de refracción, parte imaginaria del índice de refracción,  $k$ , es relacionada con el coeficiente de absorción,  $\alpha$ , y se define como [Willebrand y Ghuman, 2002]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad (12)$$

donde:

$\sigma_a$  : es la absorción en sección transversal

$N_a$  : es la concentración de partículas absorbentes

Lo que quiere decir que el coeficiente de absorción esta en función de la absorción dada por las partículas, así como también en función de la densidad de partículas.

### *II.3 Vibración en edificios*

Cuando los enlaces FSO son montados en edificios o en torres, la vibración puede afectar la precisión del alineamiento de los láser. Viento, actividad sísmica, y los cambios de temperatura, pueden causar que los edificios se muevan a lo largo de sus ejes verticales.

Para este problema, se puede usar un haz divergente para minimizar el impacto del movimiento de los edificios y los cambios en las condiciones atmosféricas. Cuando al haz le es permitido divergir, un gran cono óptico llega hasta el receptor minimizando la importancia del alineamiento de las puntas del enlace.

La penalización que se podría tener es que no toda la energía óptica puede ser enfocada sobre el receptor y así el margen del sistema es reducido por la pérdida geométrica del haz divergente.

### III ESTUDIO DE LA VISIBILIDAD PARA LA CIUDAD DE ENSENADA B.C.

#### *III.1 Introducción*

Las condiciones atmosféricas o el clima son un factor muy importante para el diseño y la implementación de un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas.

En este capítulo abordaremos la estadística asociada a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Ensenada, específicamente condiciones de niebla y visibilidad.

La niebla es el fenómeno climatológico que mas afecta a los sistemas de FSO, ya que sus partículas tienen un diámetro comparable a la longitud de onda del infrarrojo. Como se menciona en el capítulo dos la dispersión es el mecanismo de pérdidas predominante en la niebla.

La niebla es difícil de caracterizar físicamente, por lo que se asocia a la visibilidad, para determinar el impacto sobre los sistemas de FSO.

Se considera condición de niebla cuando el rango de visibilidad está entre 0 y 2000 metros. Cuando la visibilidad es mayor de 2000 metros, se le llama bruma.

Estudios hechos al transmitir un láser de longitud de onda de 1550nm sobre la atmósfera a diferentes condiciones de visibilidad han dado la tabla 1 [Willebrand y Ghuman, 2002].

Tabla 1. Código internacional de visibilidad para condiciones climatológicas y de precipitación.

| <i>Condiciones del clima</i> | <i>precipitación</i> | <i>Monto mm/hr</i> | <i>visibilidad</i> | <i>pérdidas dB/Km</i> |
|------------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| Niebla densa                 |                      |                    | 0m, 50m            | -271.65               |
| Niebla espesa                |                      |                    | 200m               | -59.57                |
| Niebla moderada              | Nieve                |                    | 500m               | -20.99                |
| Niebla ligera                | Nieve Lluvia intensa | 100                | 770m               | -12.65                |
| Bruma                        | Nieve Lluvia fuerte  | 25                 | 1Km                | -9.26                 |
|                              |                      |                    | 1.9Km              | -4.22                 |
| Neblina                      | Nieve Lluvia media   | 12.5               | 2Km                | -3.96                 |
|                              |                      |                    | 2.8Km              | -2.58                 |
| Neblina ligera               | Nieve Lluvia ligera  | 2.5                | 4Km                | -1.62                 |
|                              |                      |                    | 5.9Km              | -0.96                 |
| Despejado                    | Nieve Llovizna       | .25                | 10Km               | -0.44                 |
|                              |                      |                    | 18.1Km             | -0.24                 |
| Muy despejado                |                      |                    | 20Km               | -0.22                 |
|                              |                      |                    | 23Km               | -0.19                 |
|                              |                      |                    | 50Km               | -0.06                 |

### III.2 Comportamiento de la visibilidad en la ciudad de Ensenada

El sistema de FSO tiene que ser diseñado de acuerdo al comportamiento del clima de la ciudad de Ensenada B.C., se buscaron datos sobre el comportamiento de la visibilidad durante los pasados 5 años (2001, 2002, 2003, 2004 y 2005), de la información recopilada se hicieron gráficos para tener una mejor apreciación de los datos.

Las figuras que a continuación se presentan muestran las visibilidades máximas y mínimas que se presentaron en la ciudad de Ensenada en el transcurso de tiempo ya mencionado [Laboratorio de Pronóstico Meteorológico, Departamento de Oceanografía Física del CICESE].

#### III.2.1 Graficas de visibilidad en el año 2001

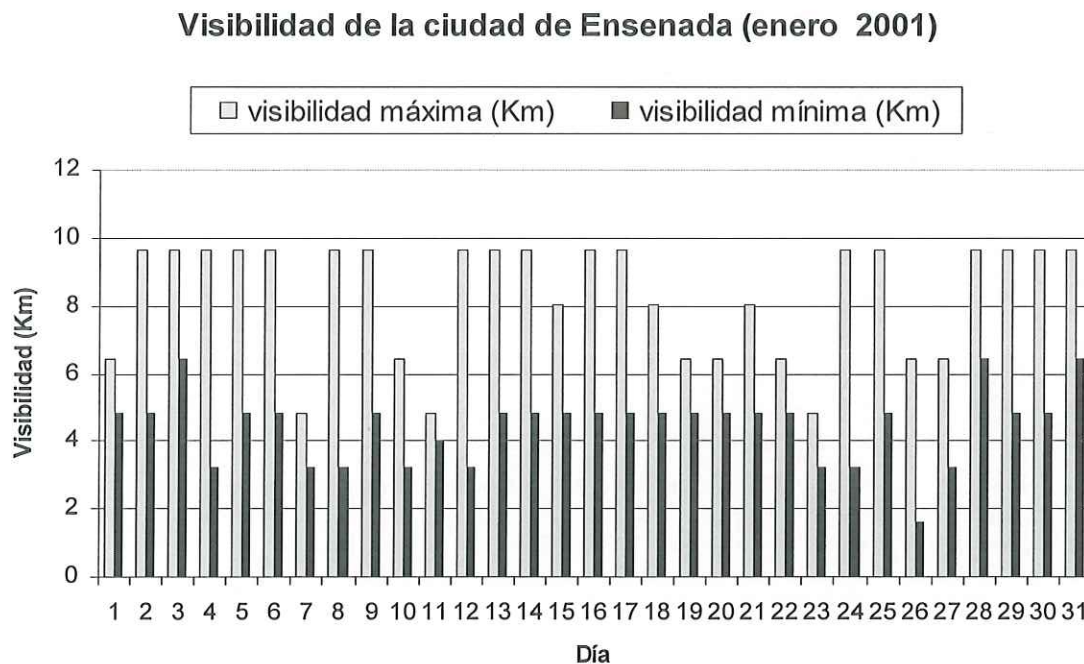


Figura 12. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (febrero 2001)

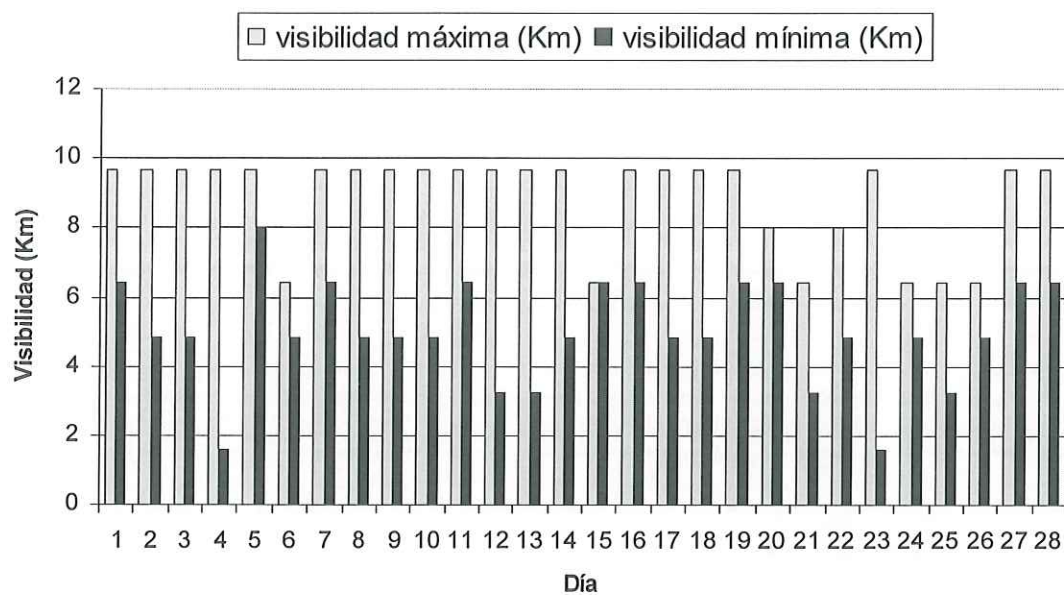


Figura 13. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (marzo 2001)

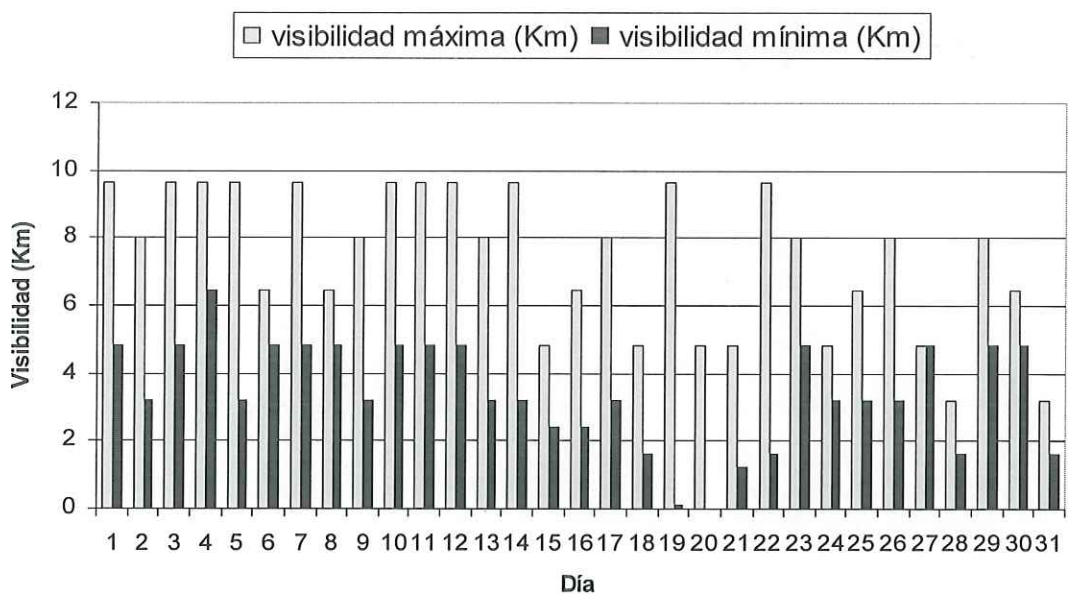


Figura 14. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (abril 2001)

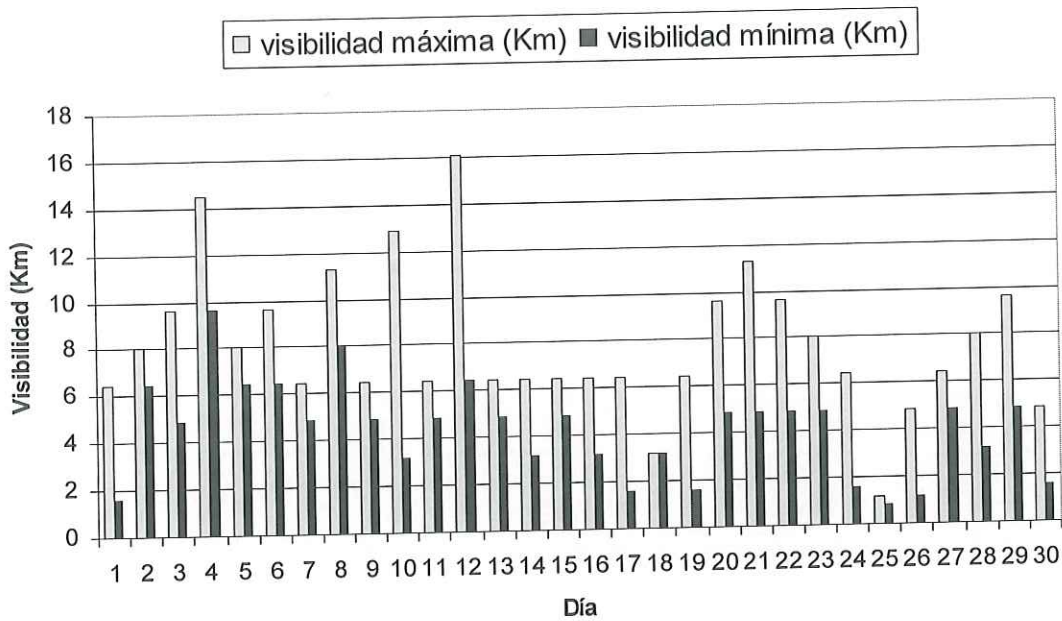


Figura 15. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (mayo 2001)

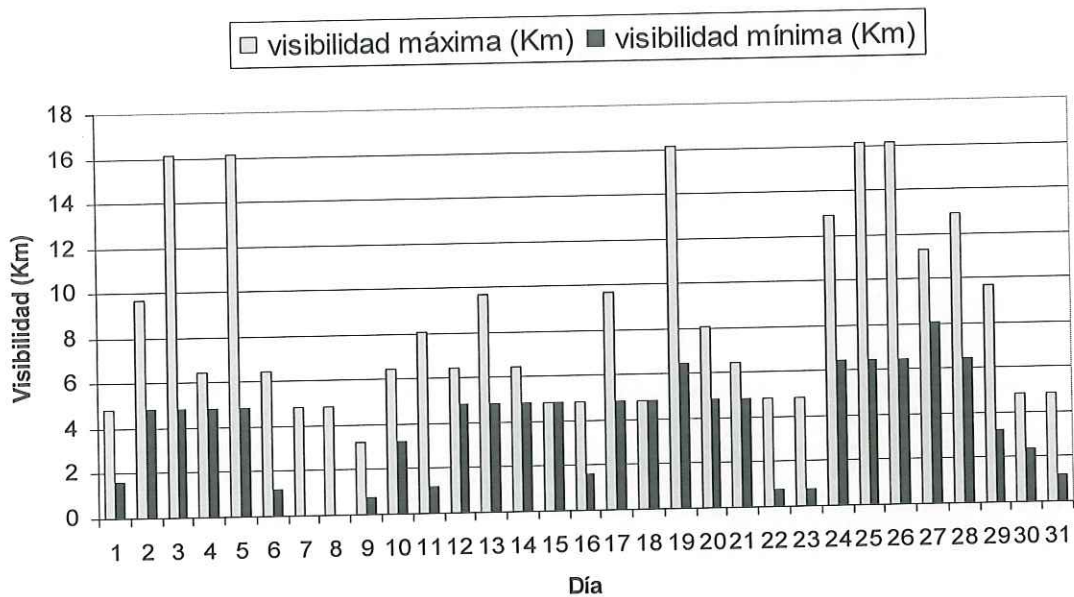


Figura 16. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (junio 2001)

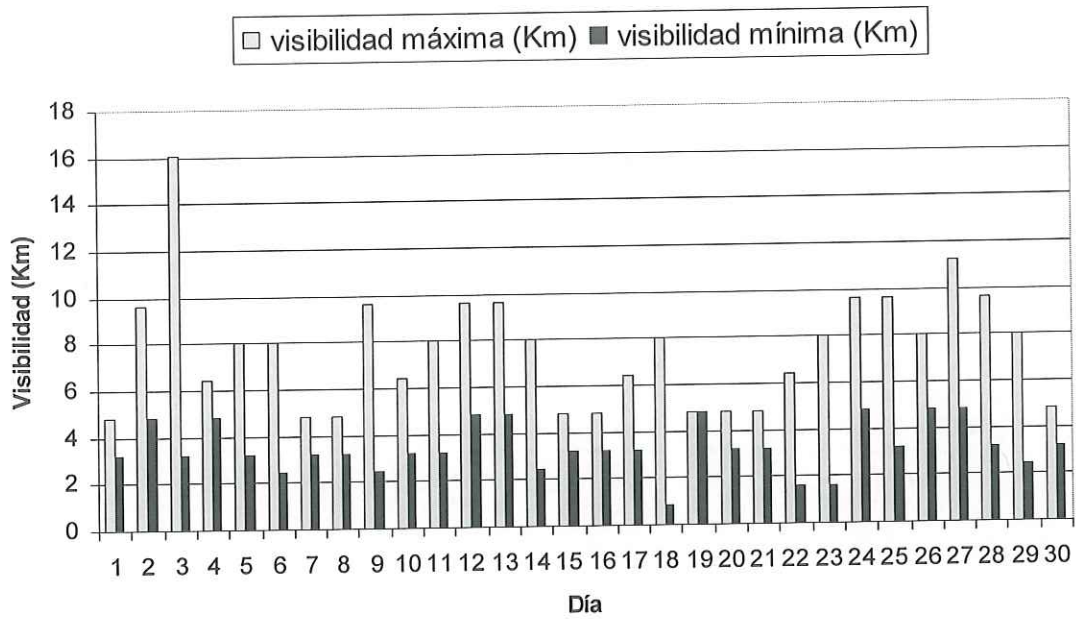


Figura 17. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (julio 2001)

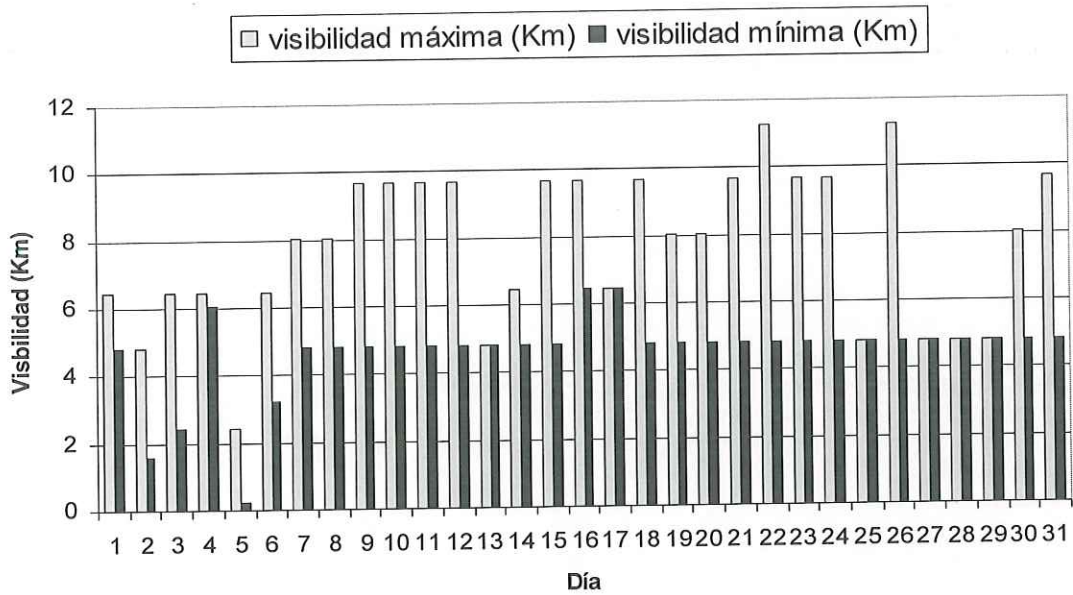


Figura 18. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (agosto 2001)

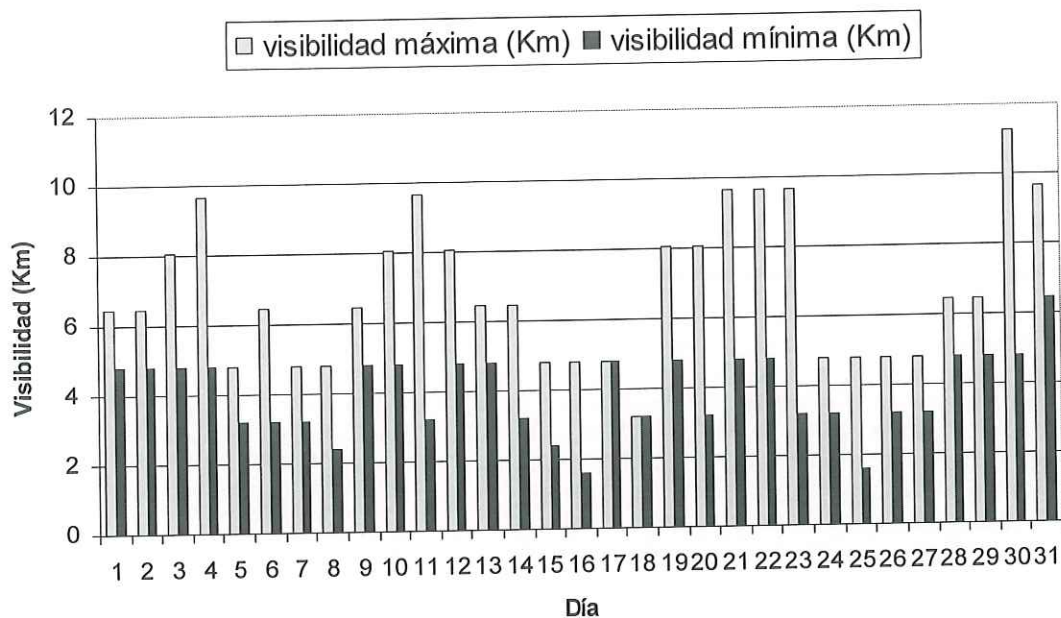


Figura 19. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (septiembre 2001)

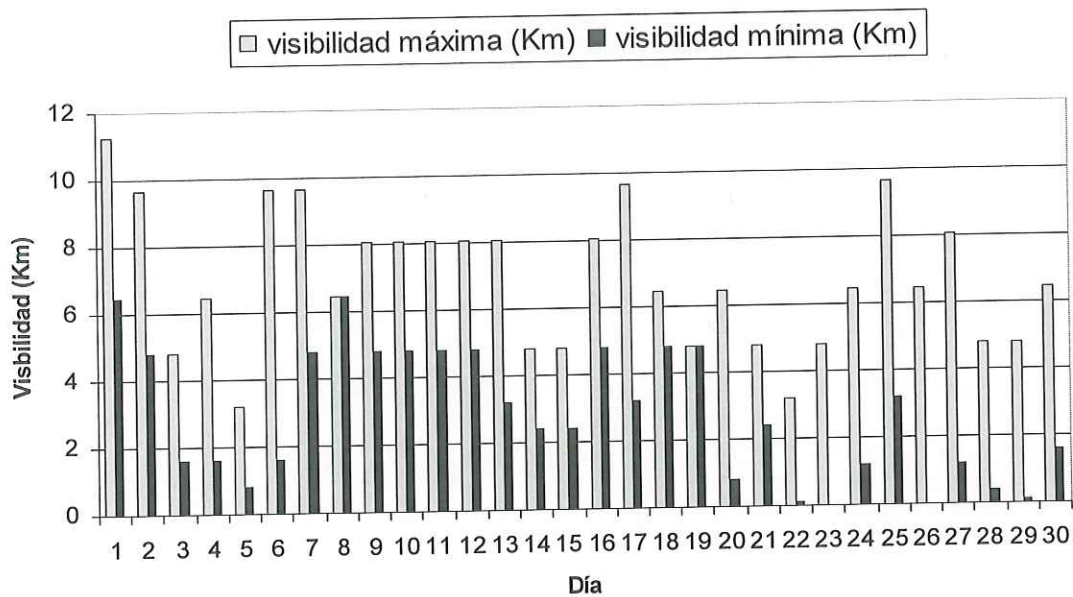


Figura 20. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (octubre 2001)

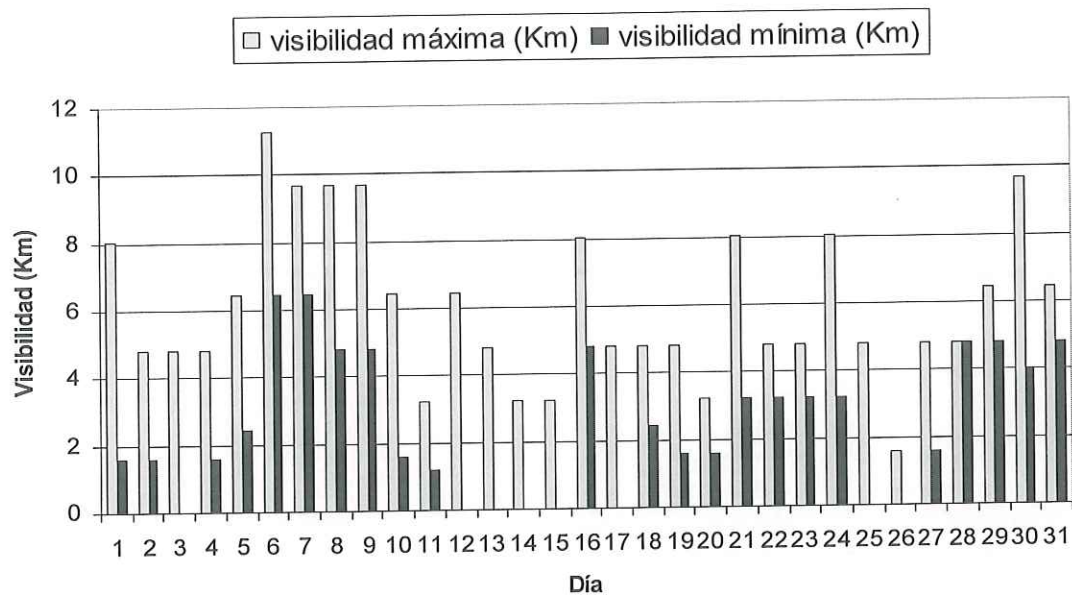


Figura 21. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (noviembre 2001)

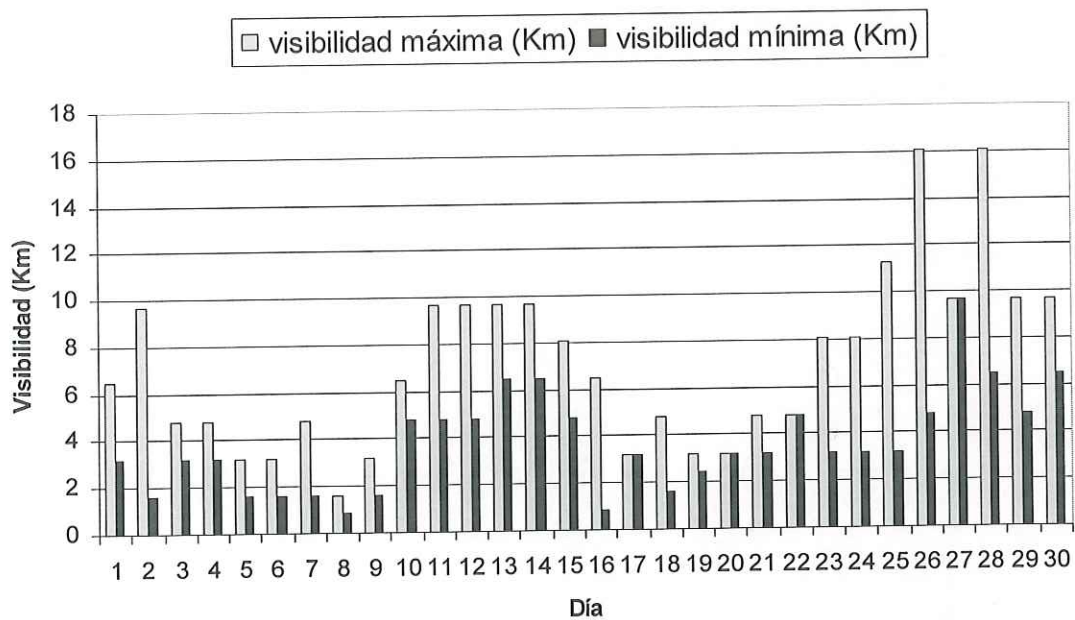


Figura 22. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2001.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (diciembre 2001)

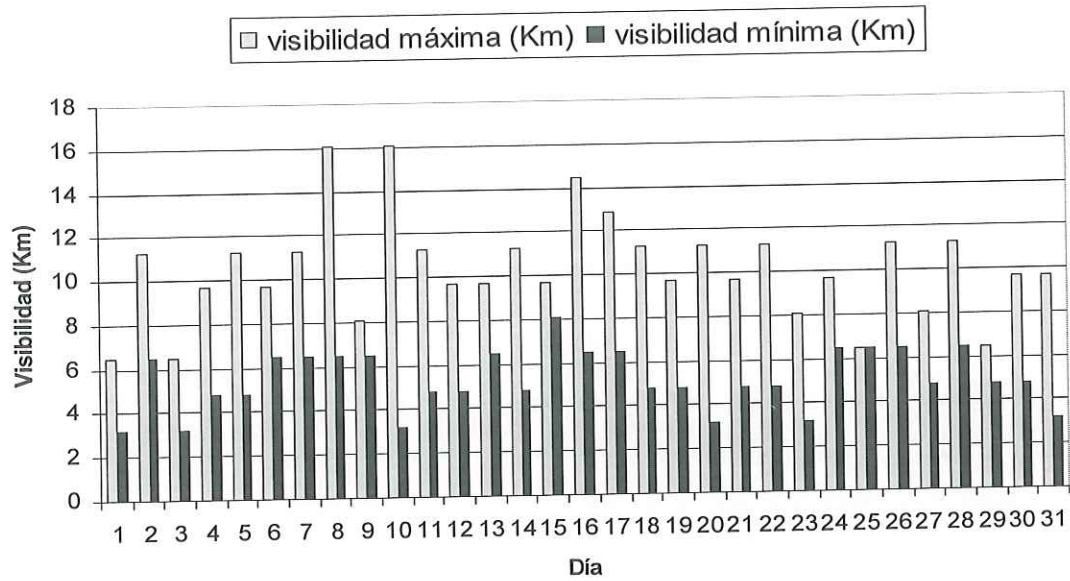


Figura 23. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2001.

### III.2.2 Graficas de visibilidad en el año 2002

#### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (enero 2002)

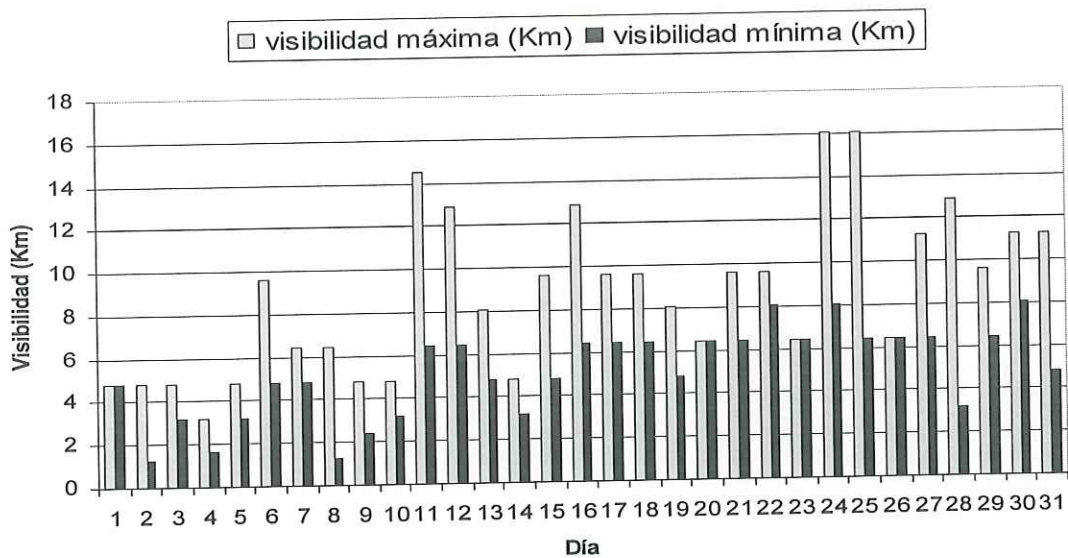


Figura 24. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (febrero 2002)

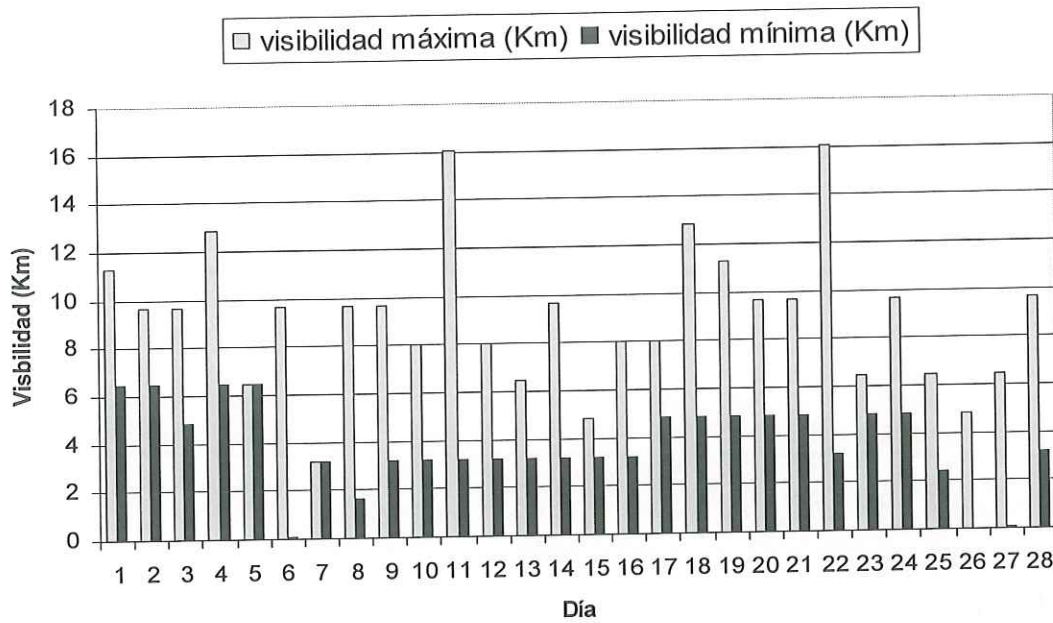


Figura 25. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (marzo 2002)

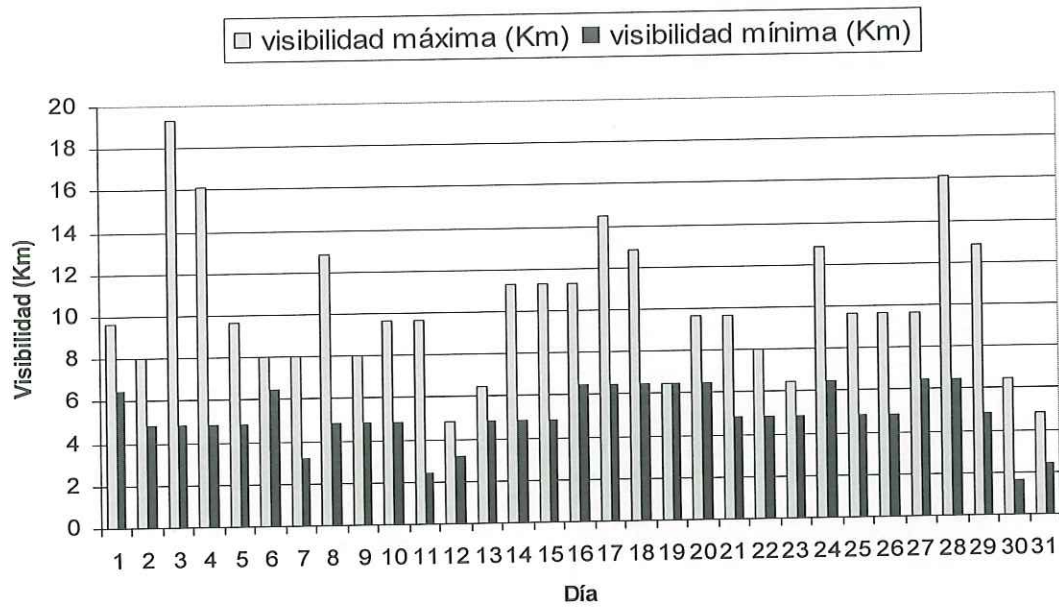


Figura 26. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (abril 2002)

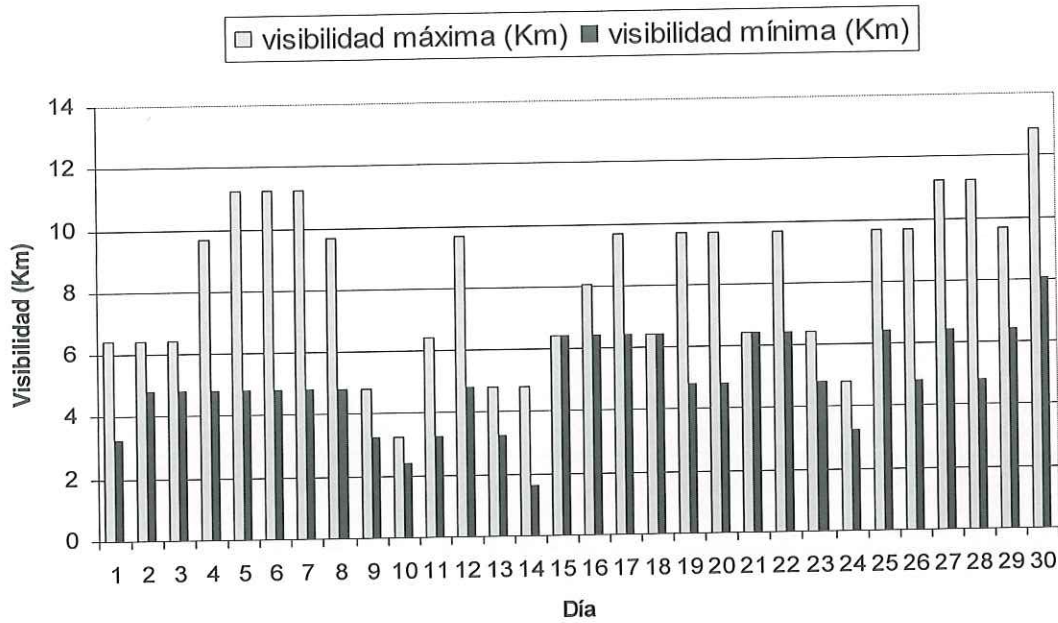


Figura 27. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (mayo 2002)

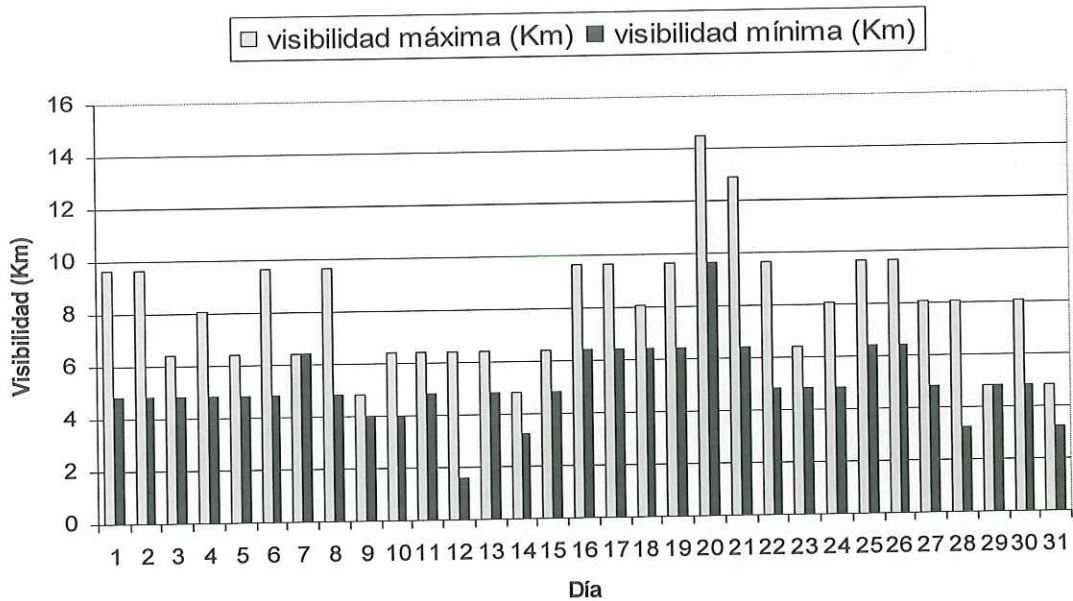


Figura 28. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (junio 2002)

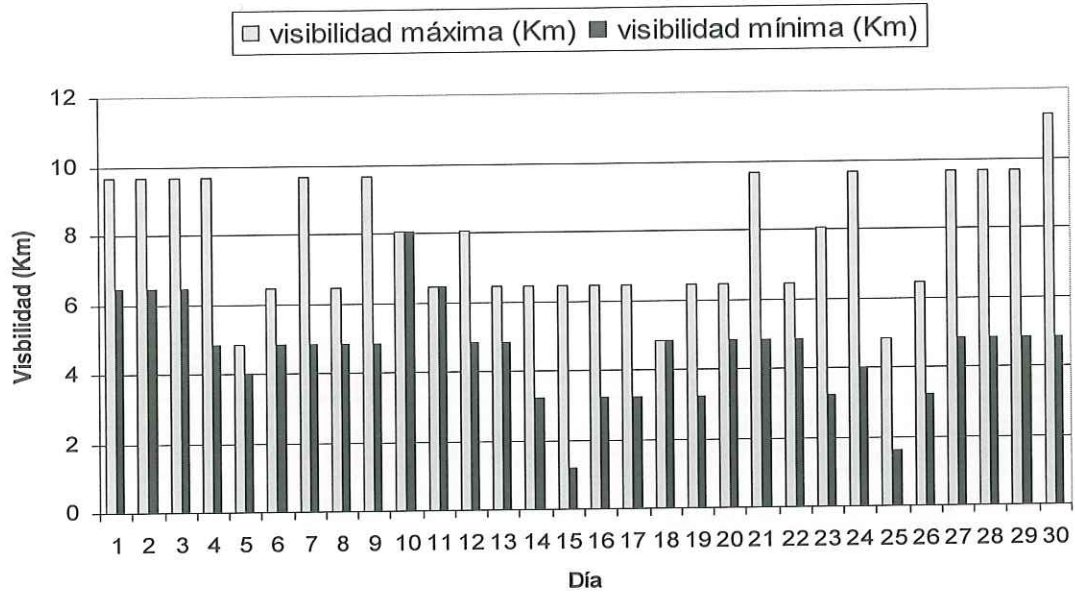


Figura 29. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (julio 2002)

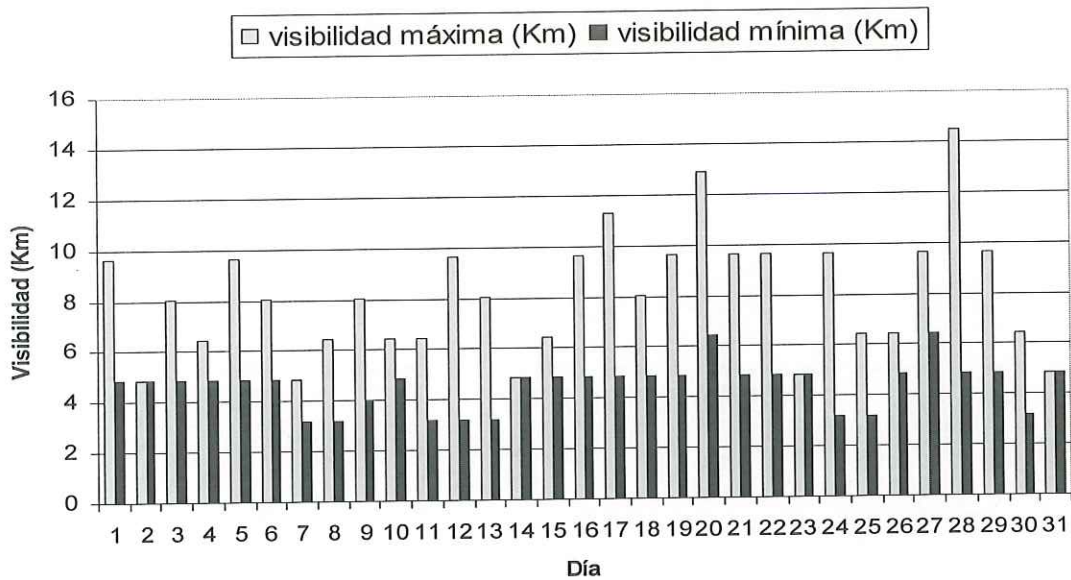


Figura 30. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (agosto 2002)

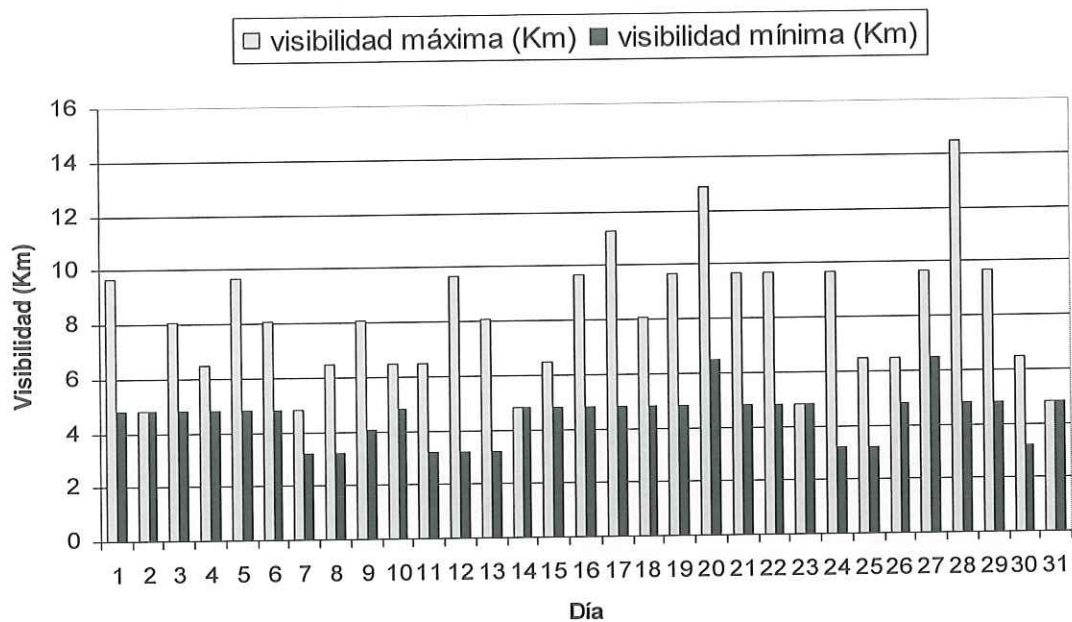


Figura 31. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (septiembre 2002)

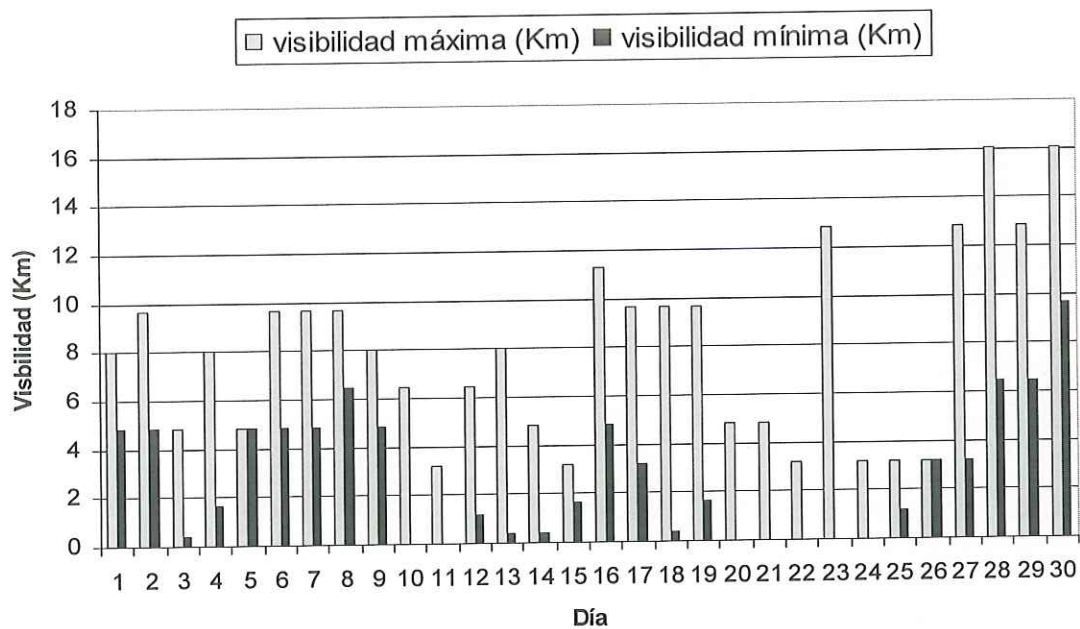


Figura 32. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (octubre 2002)

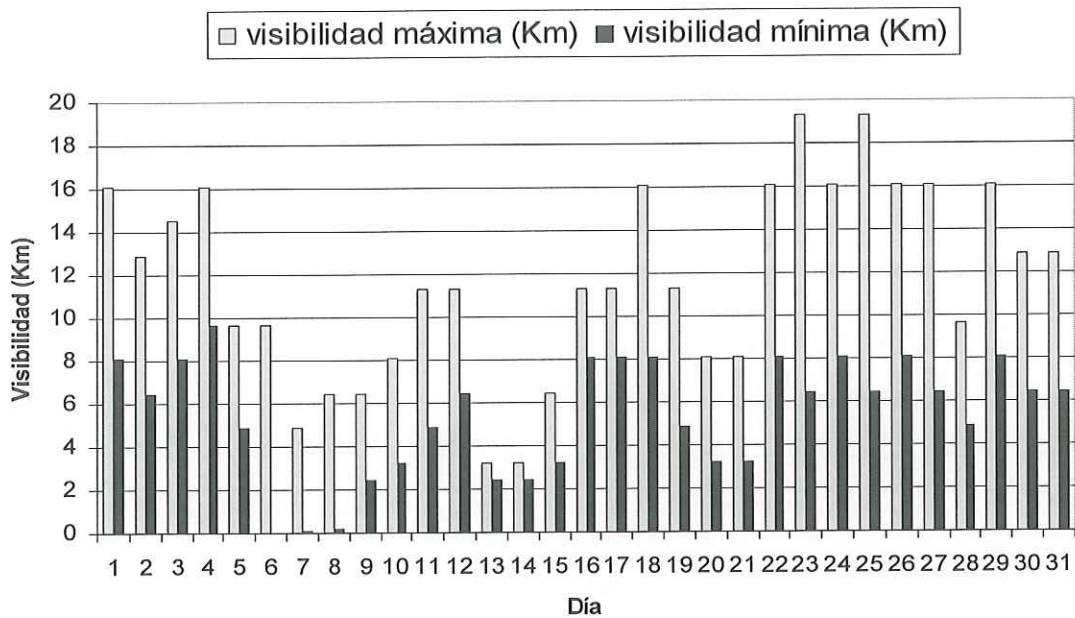


Figura 33. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2002.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (noviembre 2002)

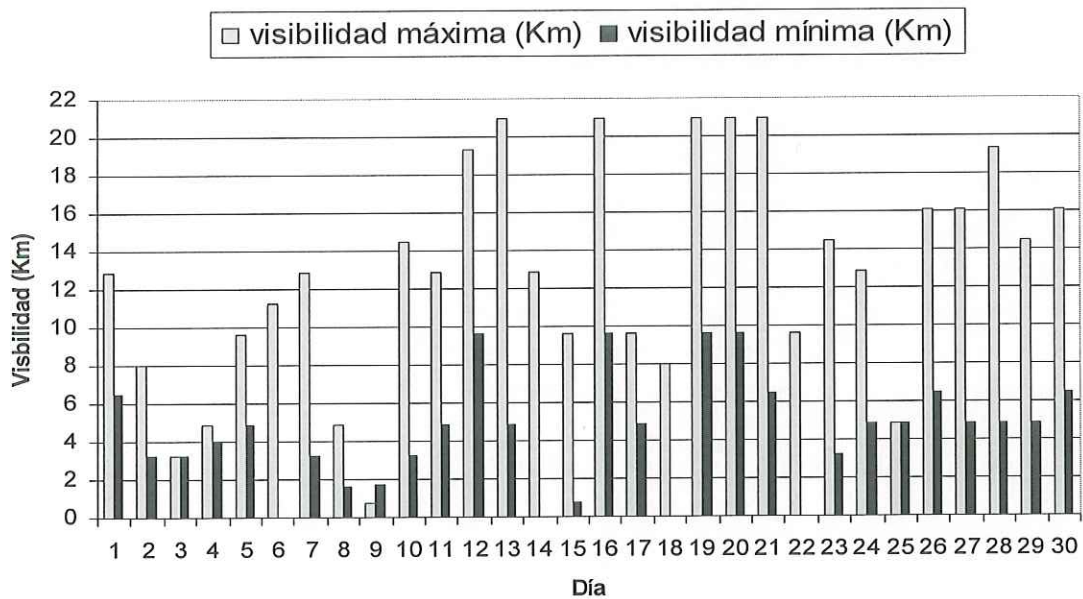


Figura 34. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2002.

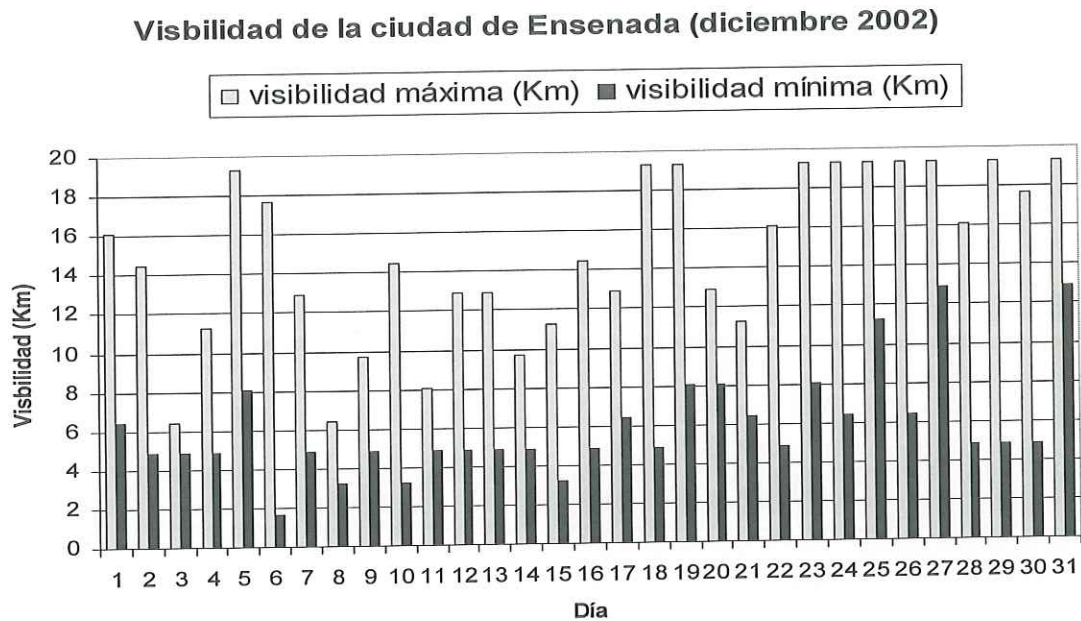


Figura 35. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2002.

### III.2.3 Graficas de visibilidad en el año 2003

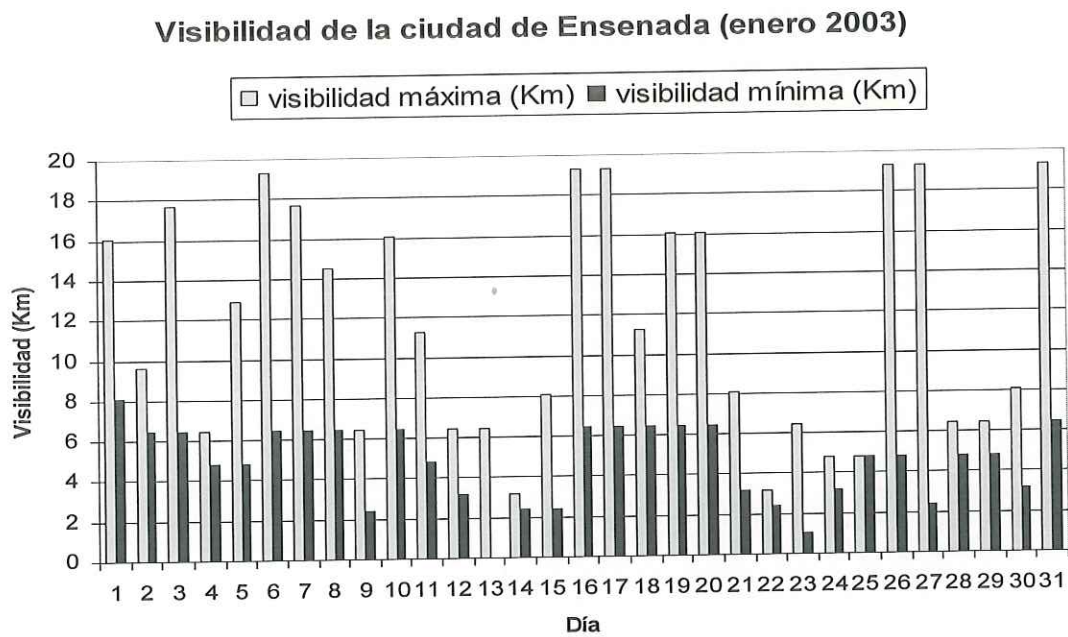


Figura 36. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (febrero 2003)

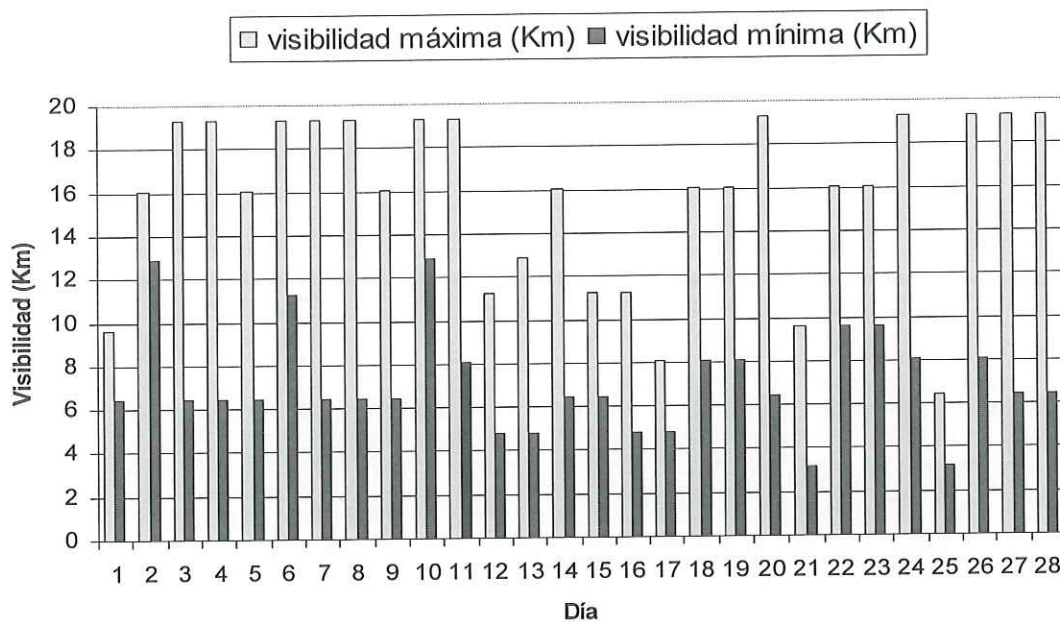


Figura 37. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (marzo 2003)

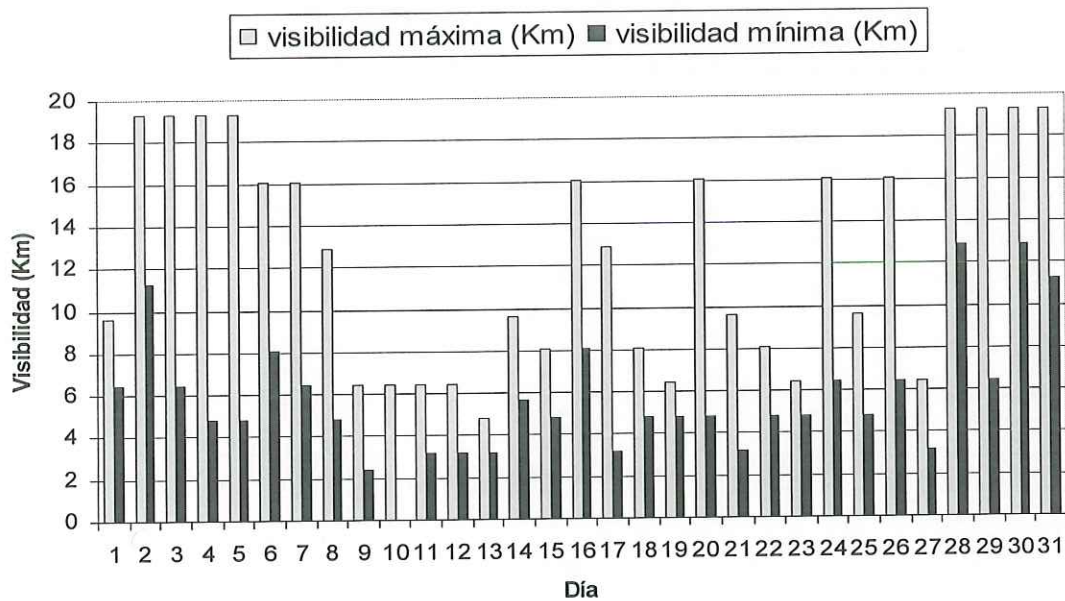


Figura 38. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (abril 2003)

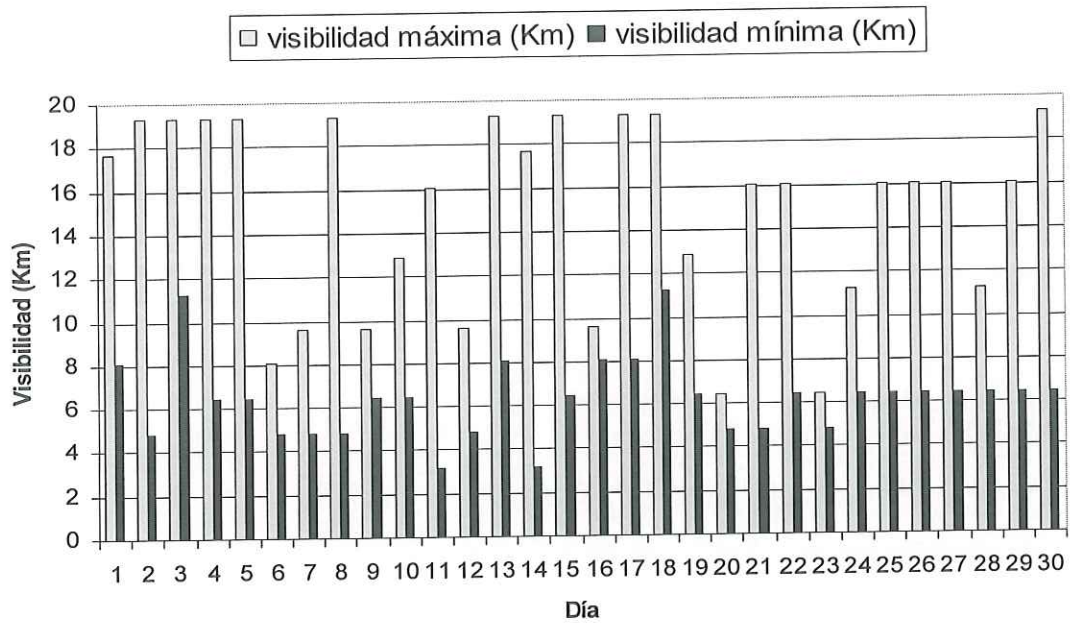


Figura 39. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (mayo 2003)

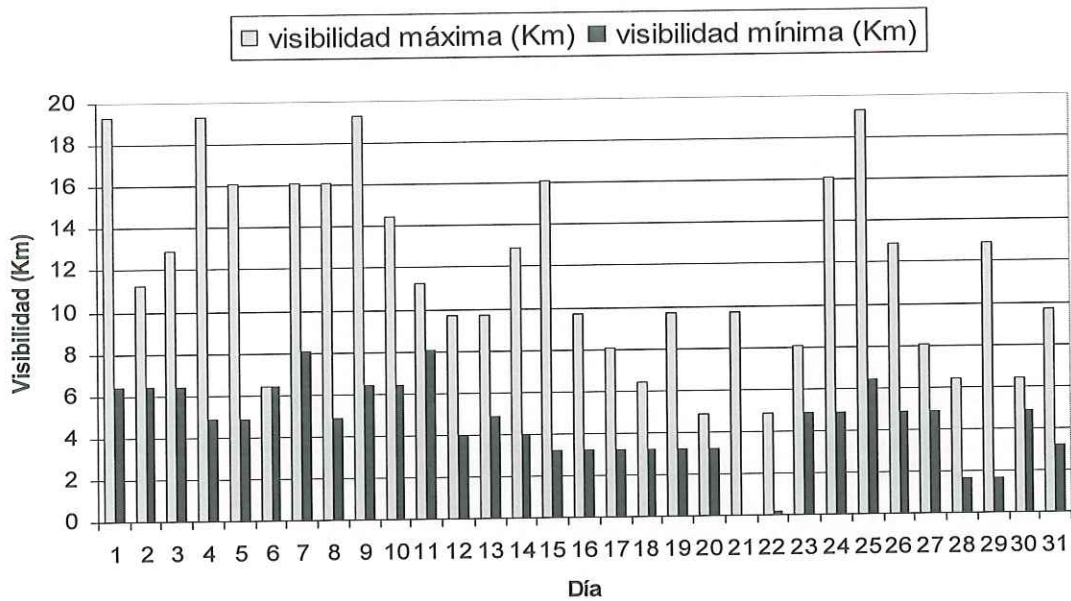


Figura 40. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (junio 2003)

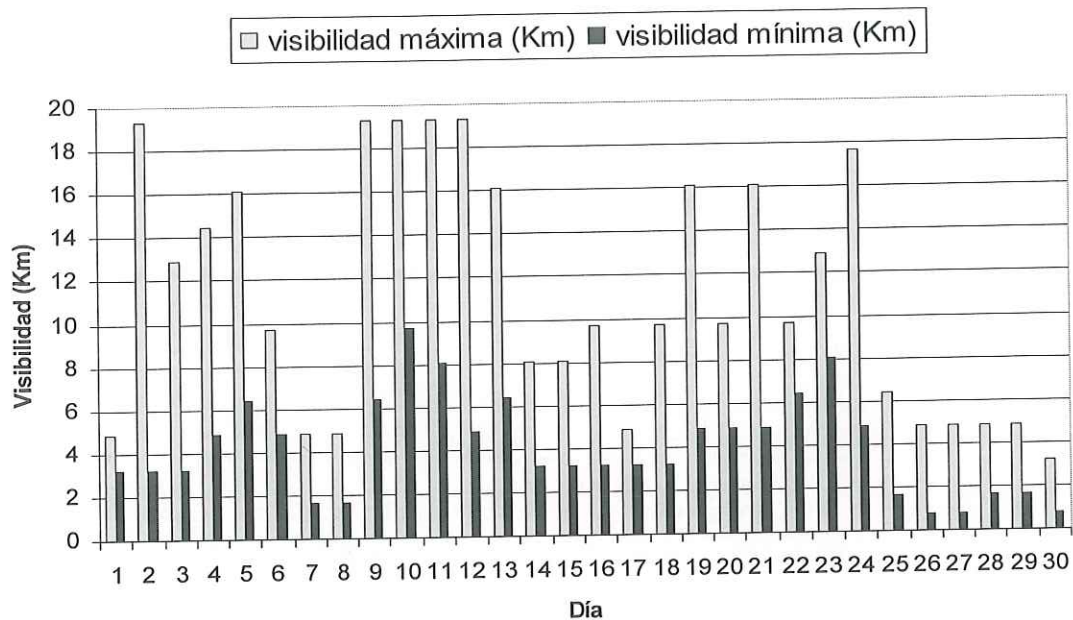


Figura 41. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (julio 2003)

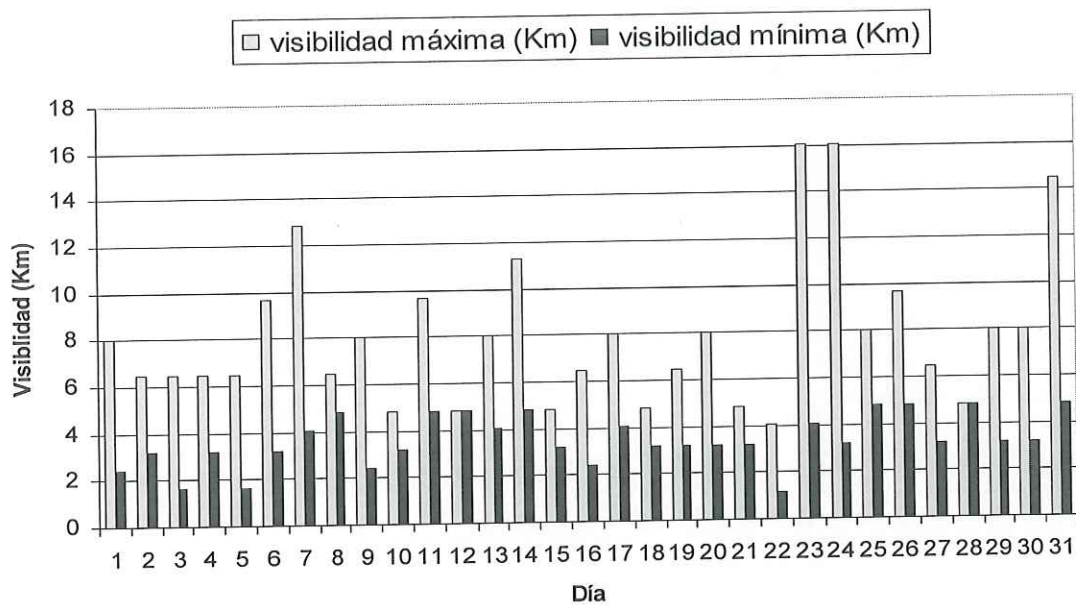


Figura 42. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (agosto 2003)

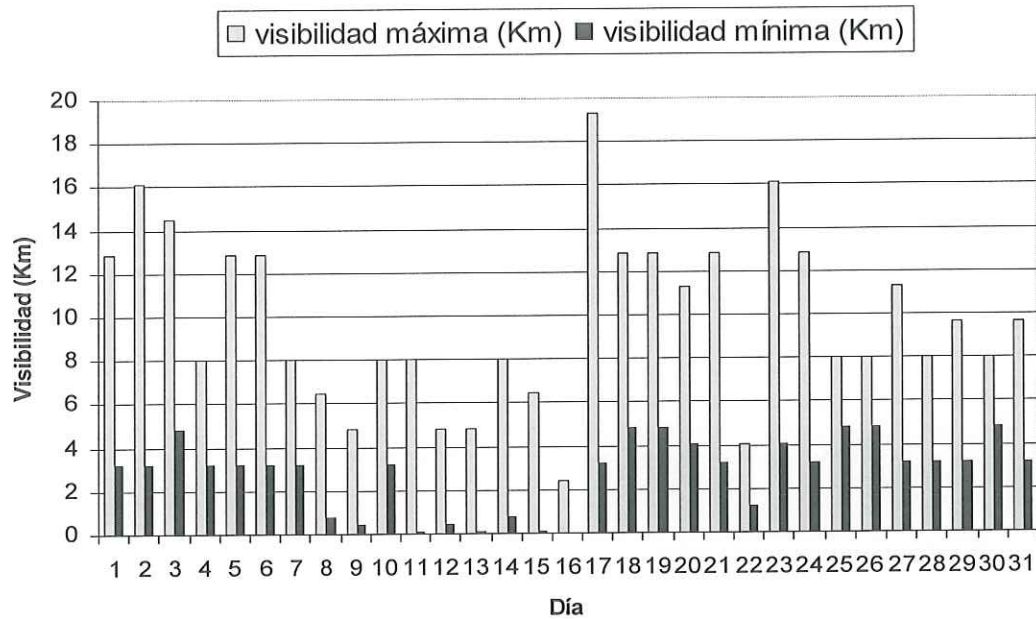


Figura 43. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (septiembre 2003)

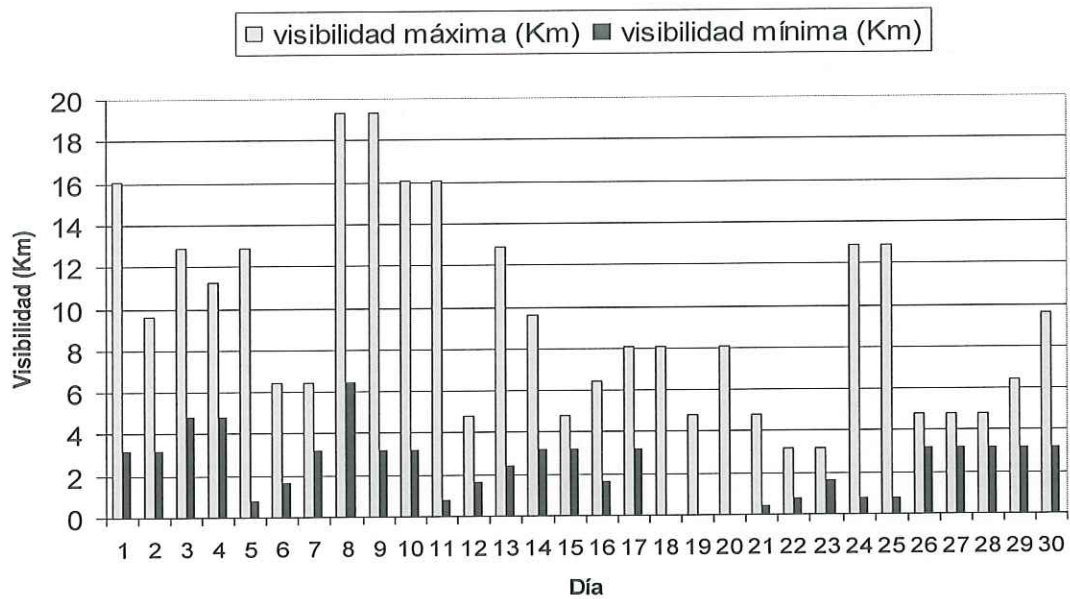


Figura 44. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (octubre 2003)

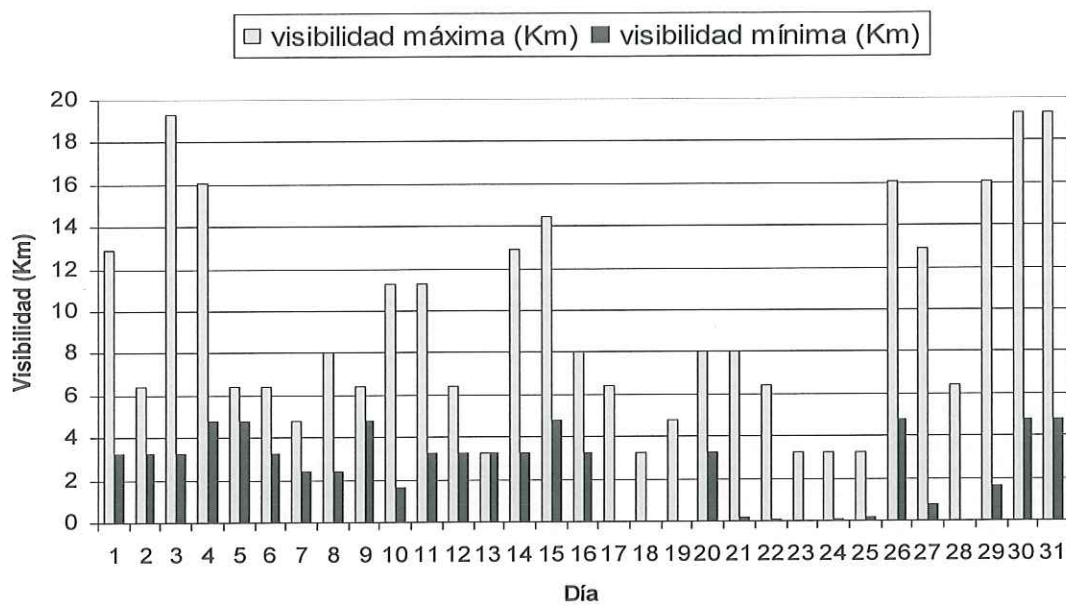


Figura 45. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2003.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (noviembre 2003)

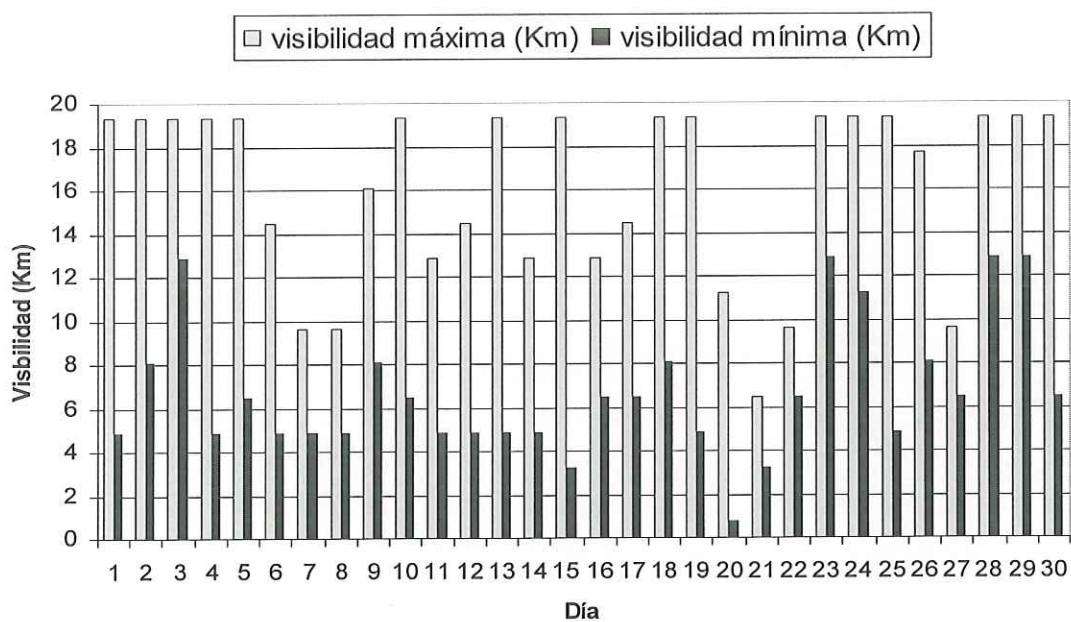


Figura 46. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2003.

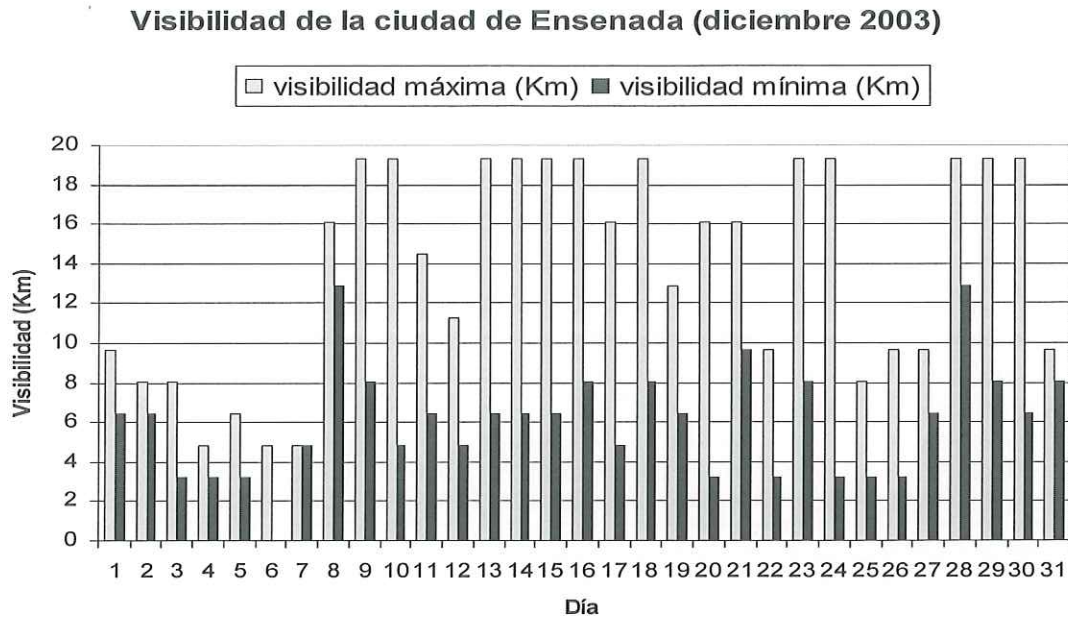


Figura 47. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2003.

### III.2.4 Graficas de visibilidad en el año 2004

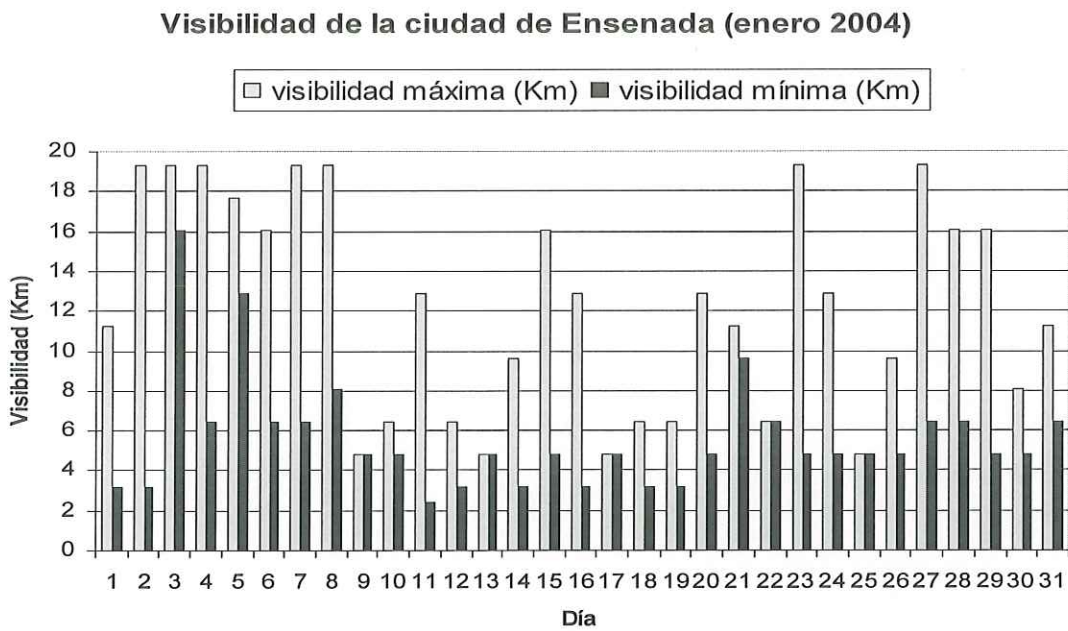


Figura 48. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (febrero 2004)

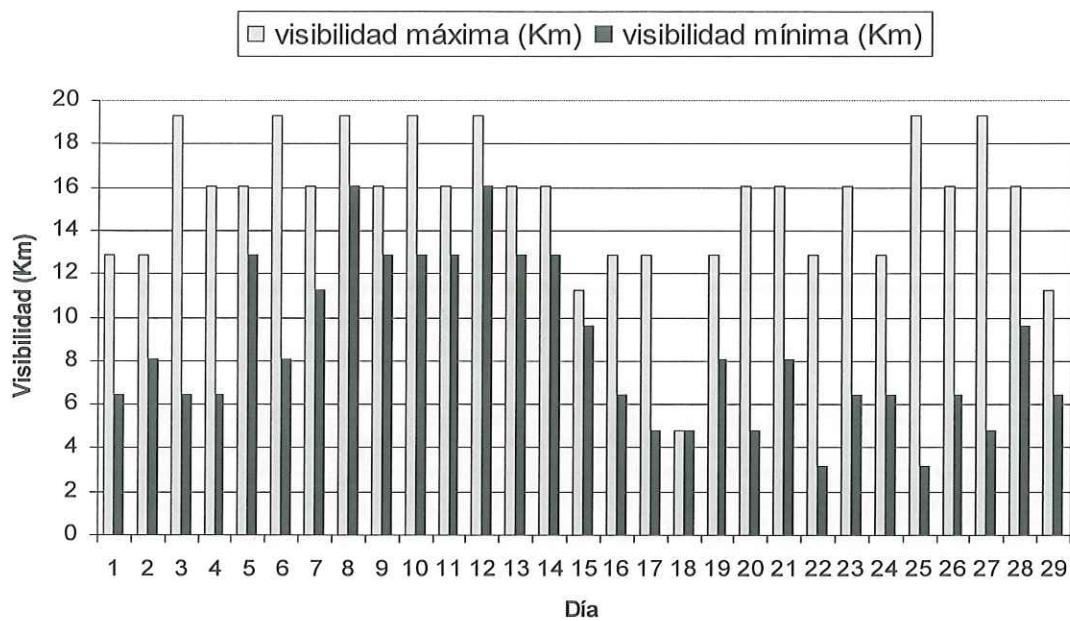


Figura 49. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (marzo 2004)

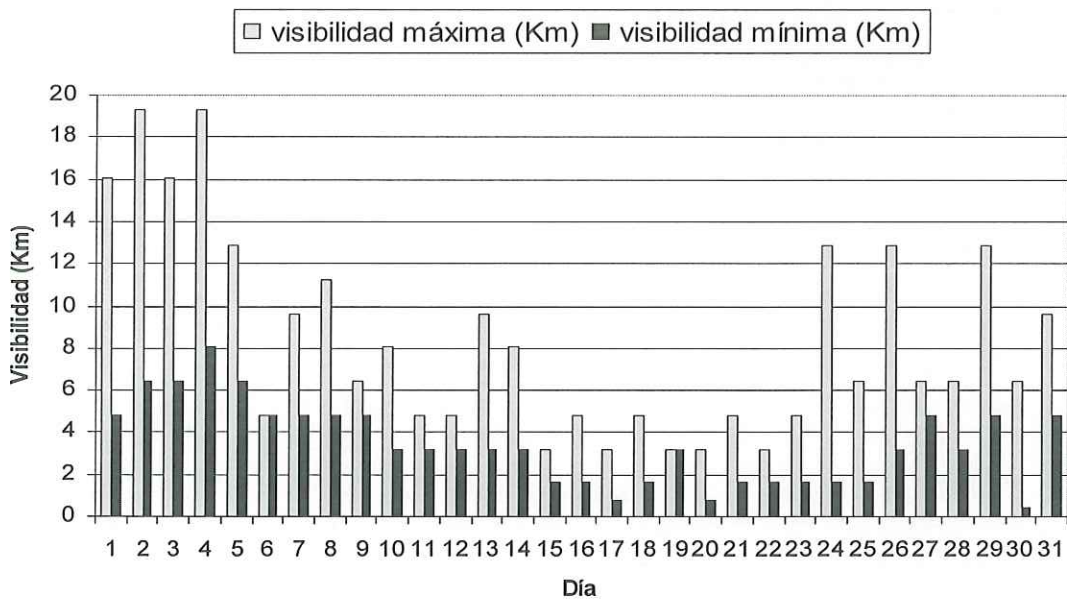


Figura 50. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (abril 2004)

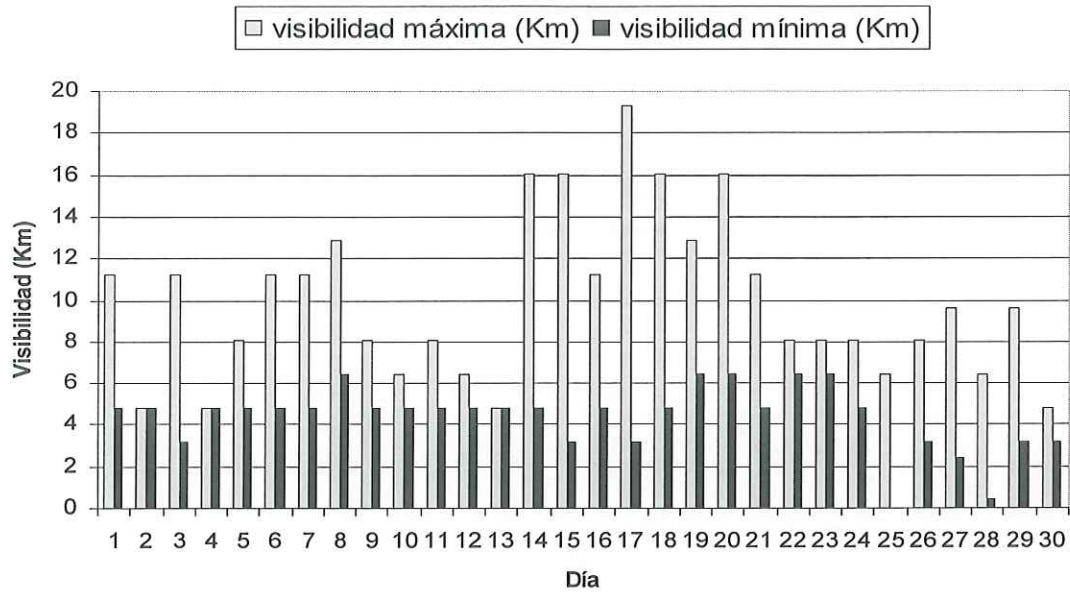


Figura 51. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (mayo 2004)

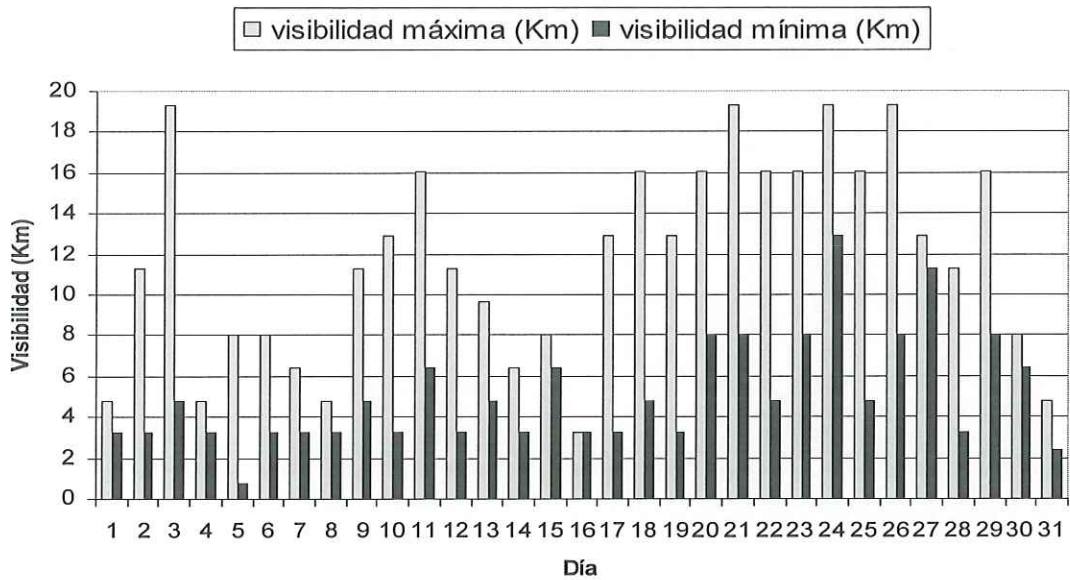


Figura 52. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (junio 2004)

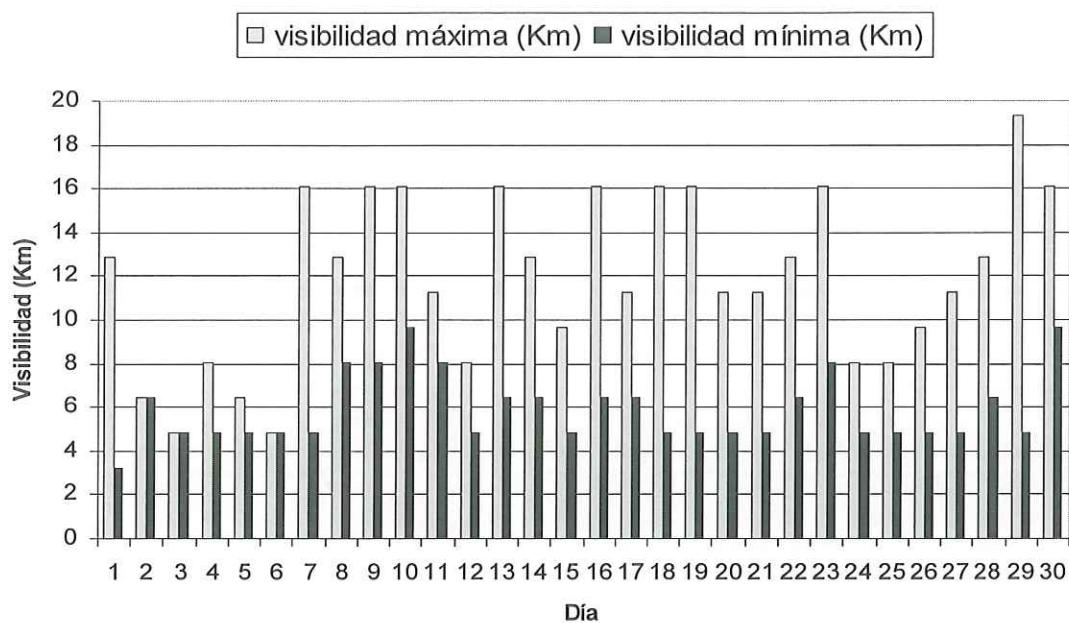


Figura 53. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (julio 2004)

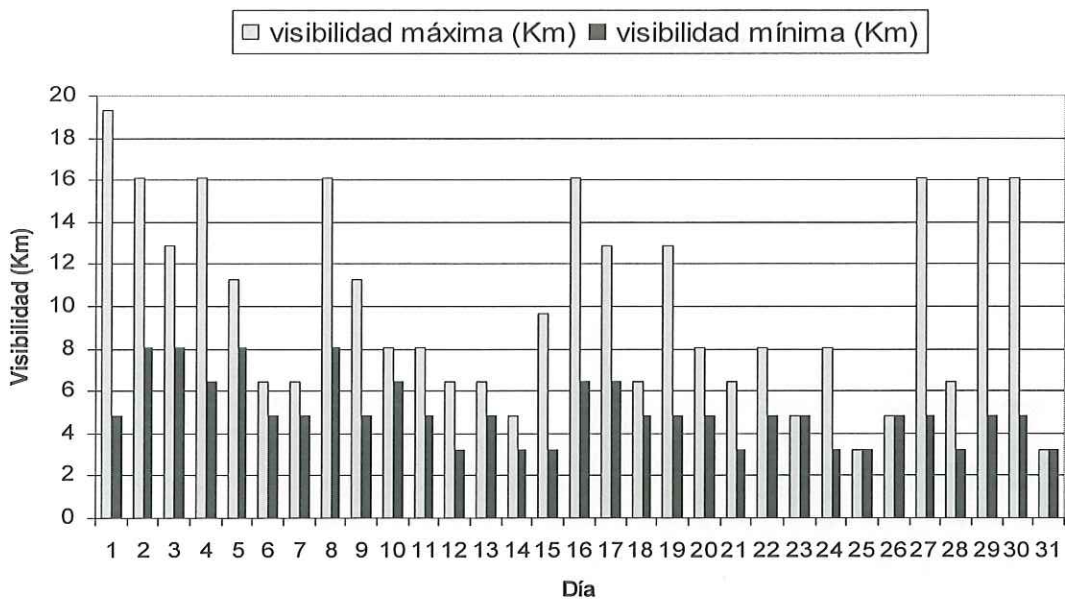


Figura 54. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (agosto 2004)

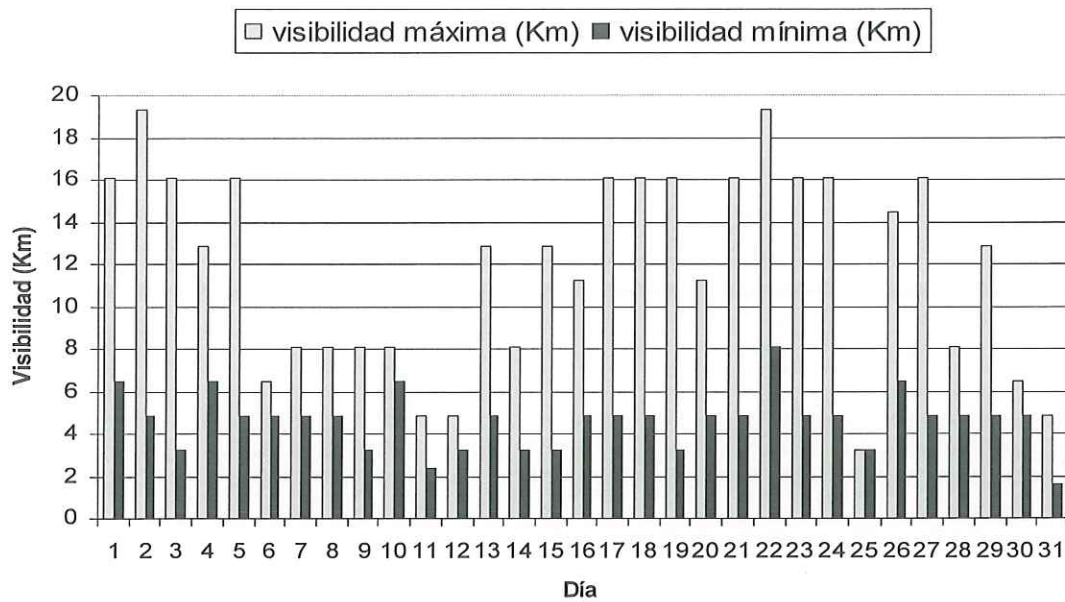


Figura 55. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2004.

### Visibilidad de la ciudad Ensenada (septiembre 2004)

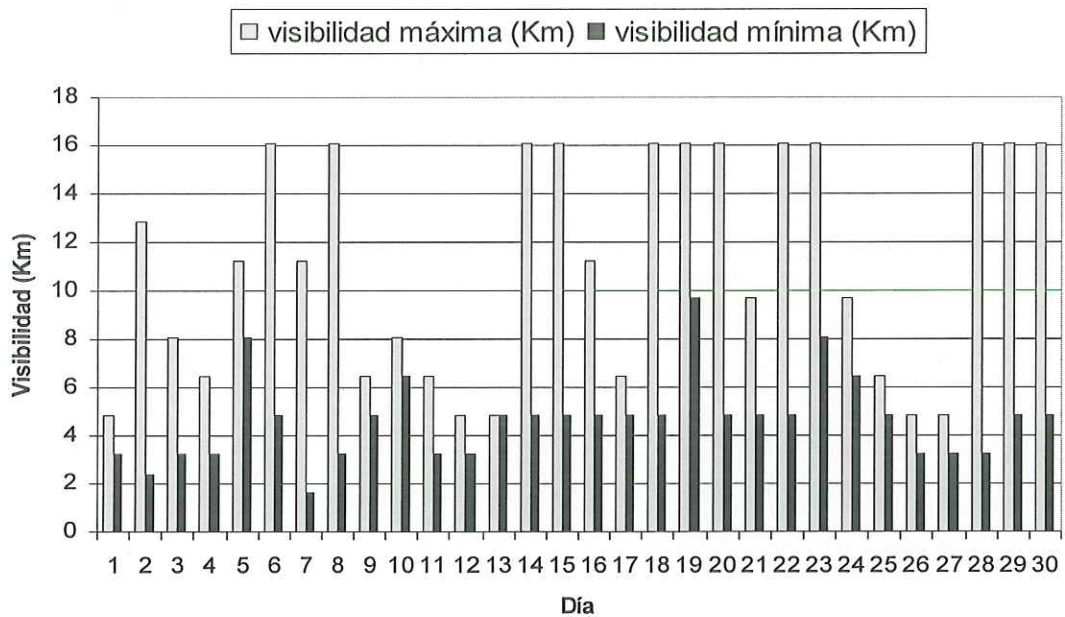


Figura 56. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2004.

### visibilidad de la ciudad de Ensenada (octubre 2004)

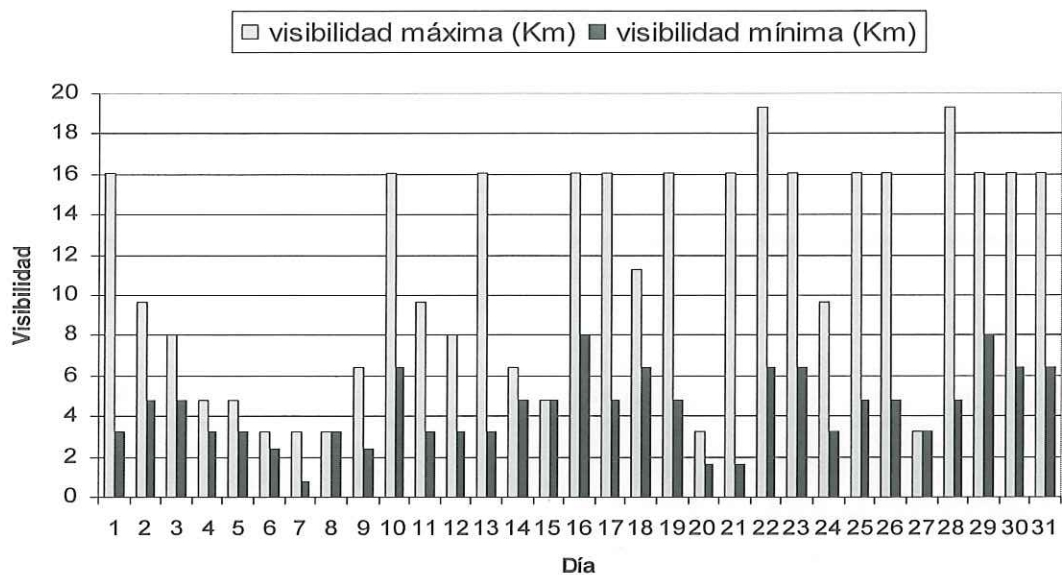


Figura 57. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (noviembre 2004)

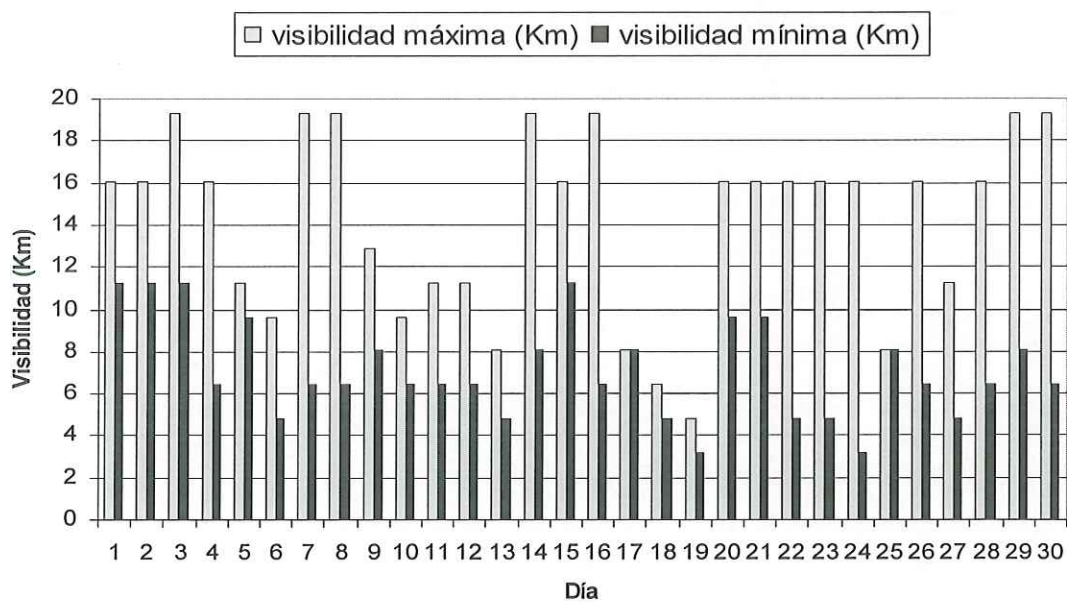


Figura 58. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2004.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (diciembre 2004)

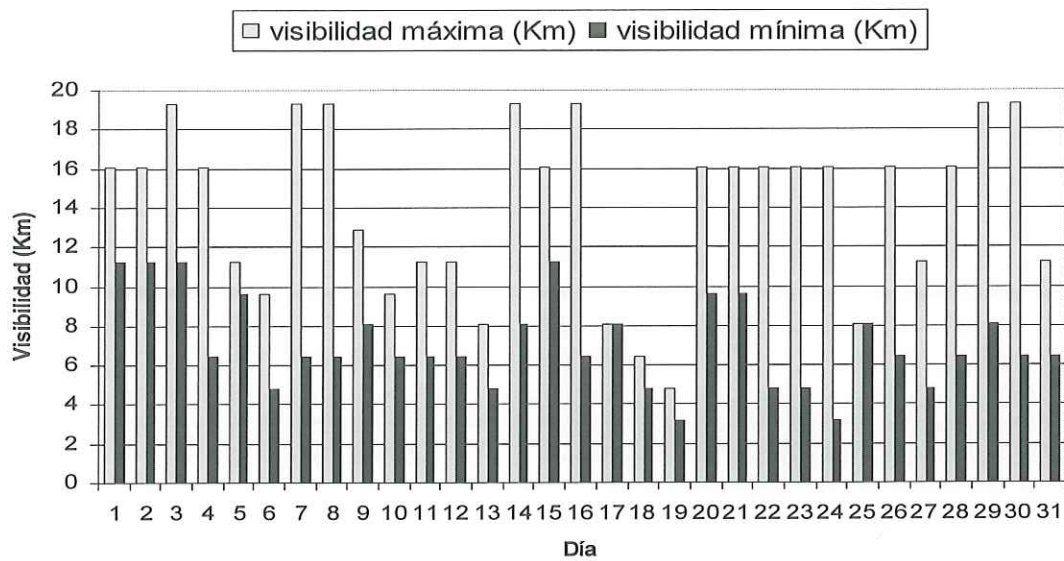


Figura 59. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2004.

### III.2.5 Graficas de visibilidad en el año 2005

#### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (enero 2005)

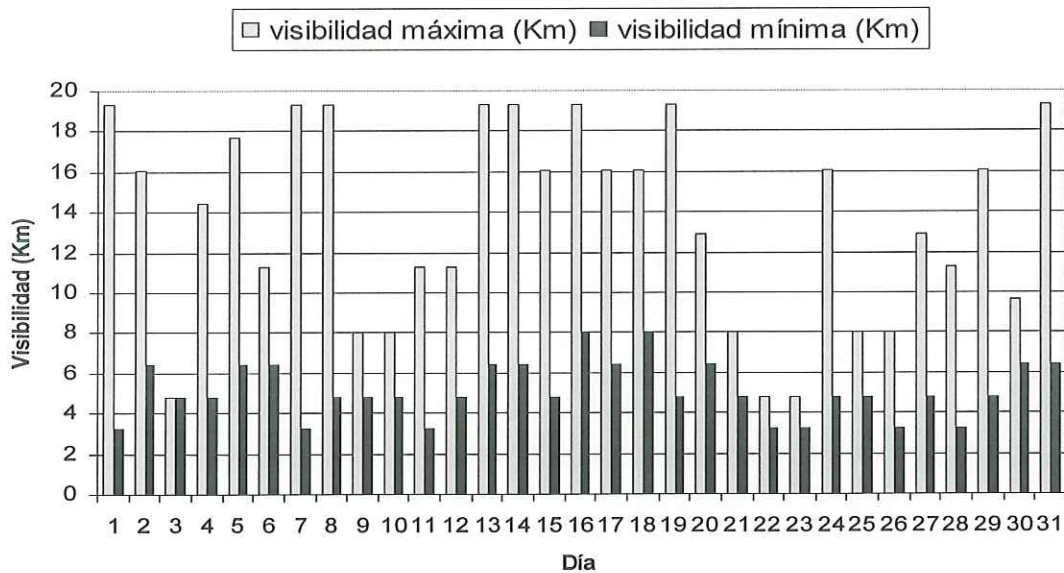


Figura 60. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de enero año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (febrero 2005)

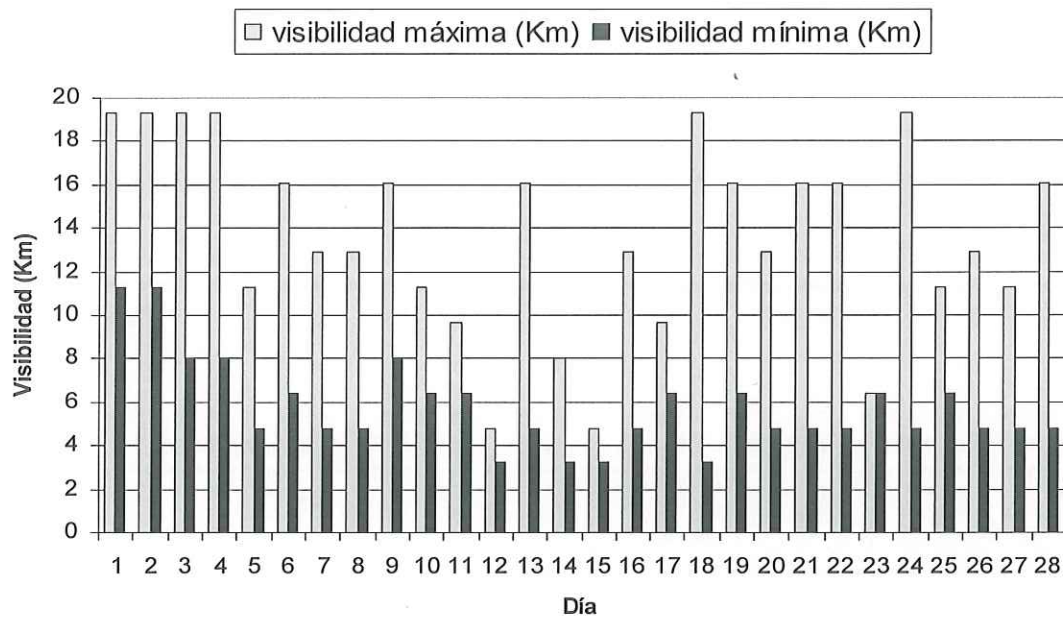


Figura 61. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de febrero año 2005

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (marzo 2005)

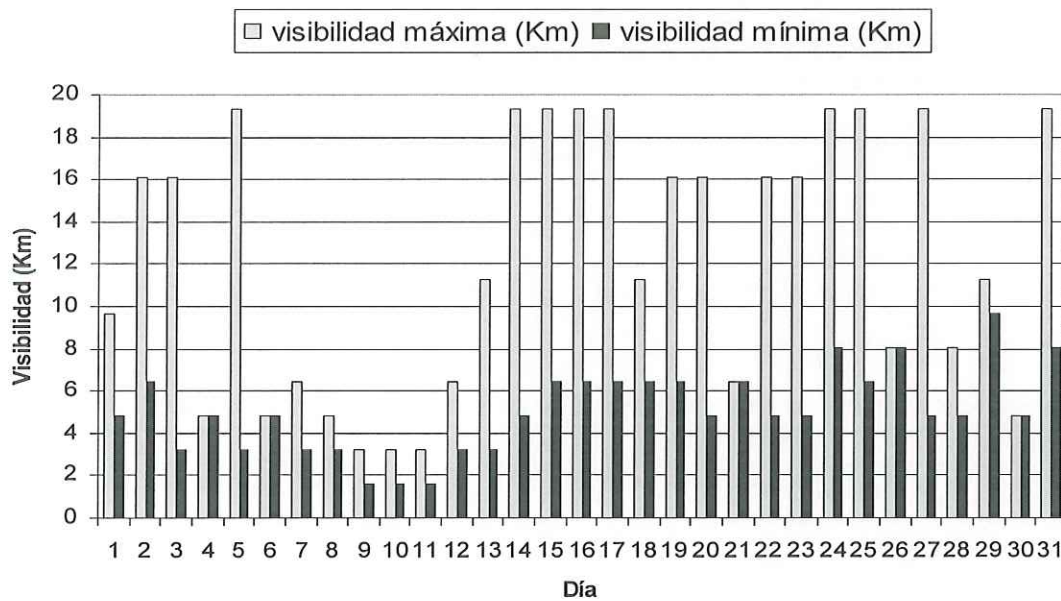


Figura 62. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de marzo año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (abril 2005)

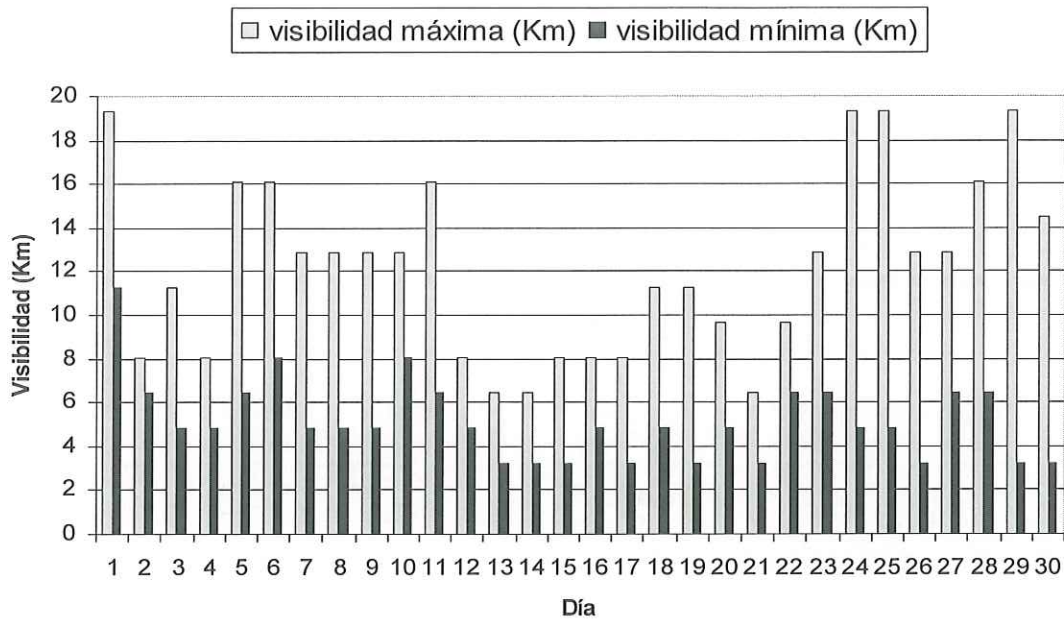


Figura 63. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de abril año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (mayo 2005)

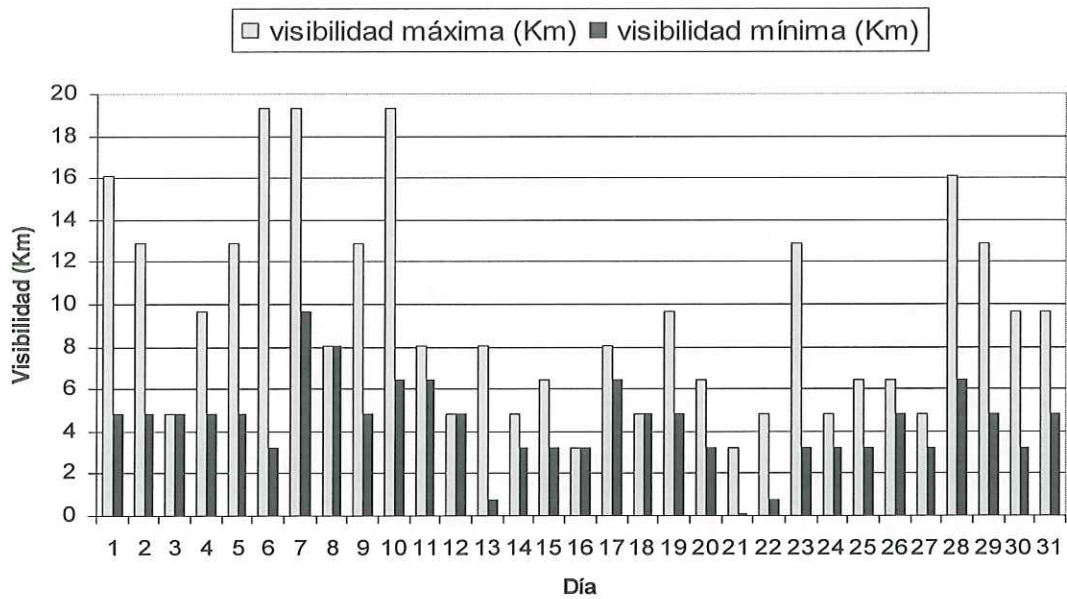


Figura 64. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de mayo año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (junio 2005)

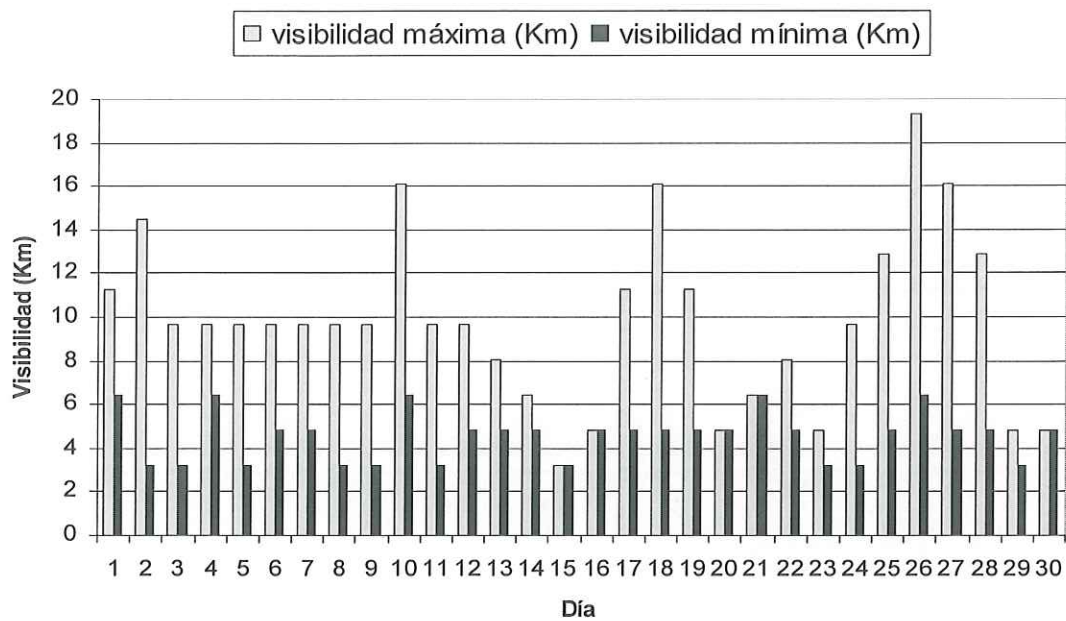


Figura 65. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de junio año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (julio 2005)

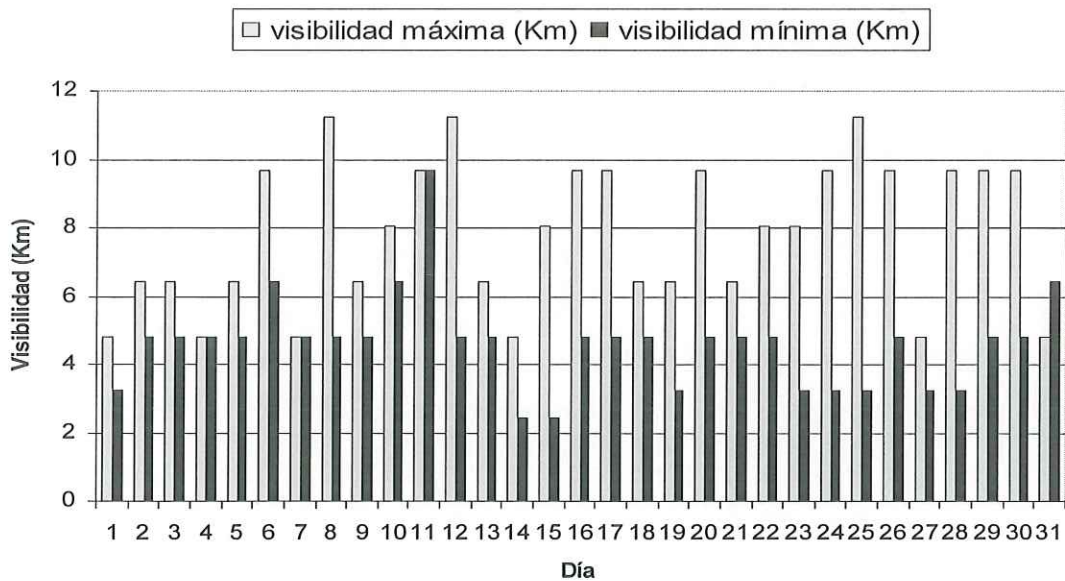


Figura 66. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de julio año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (agosto 2005)

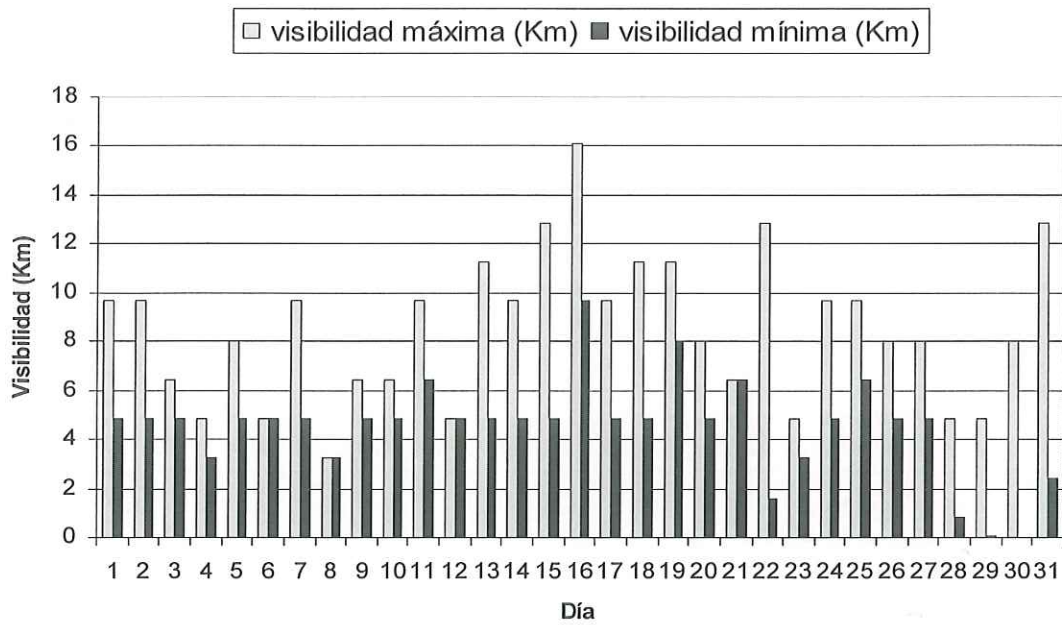


Figura 67. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de agosto año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (septiembre 2005)

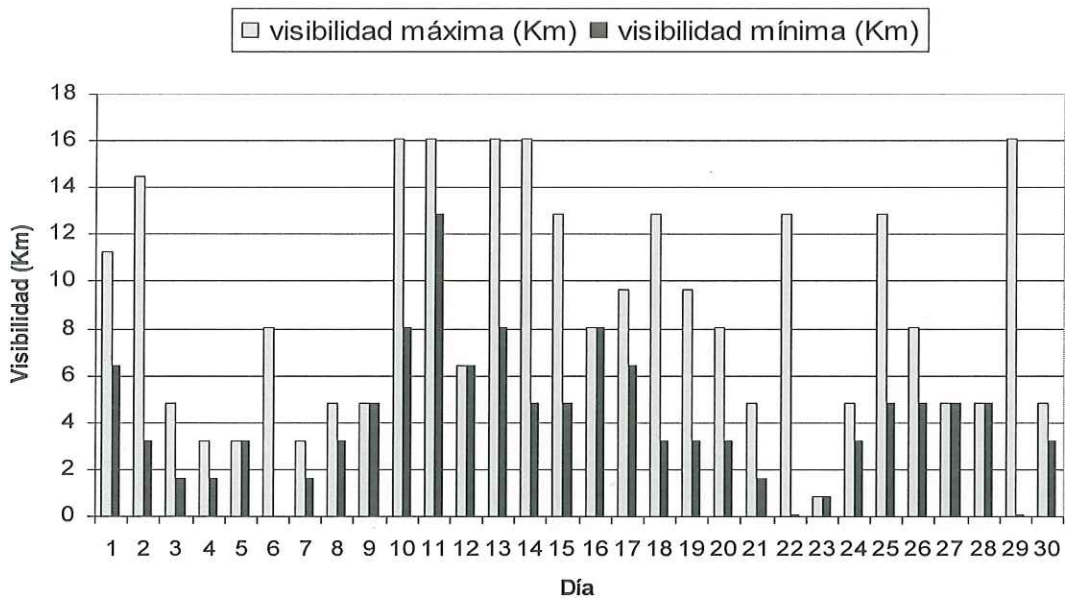


Figura 68. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de septiembre año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (octubre 2005)

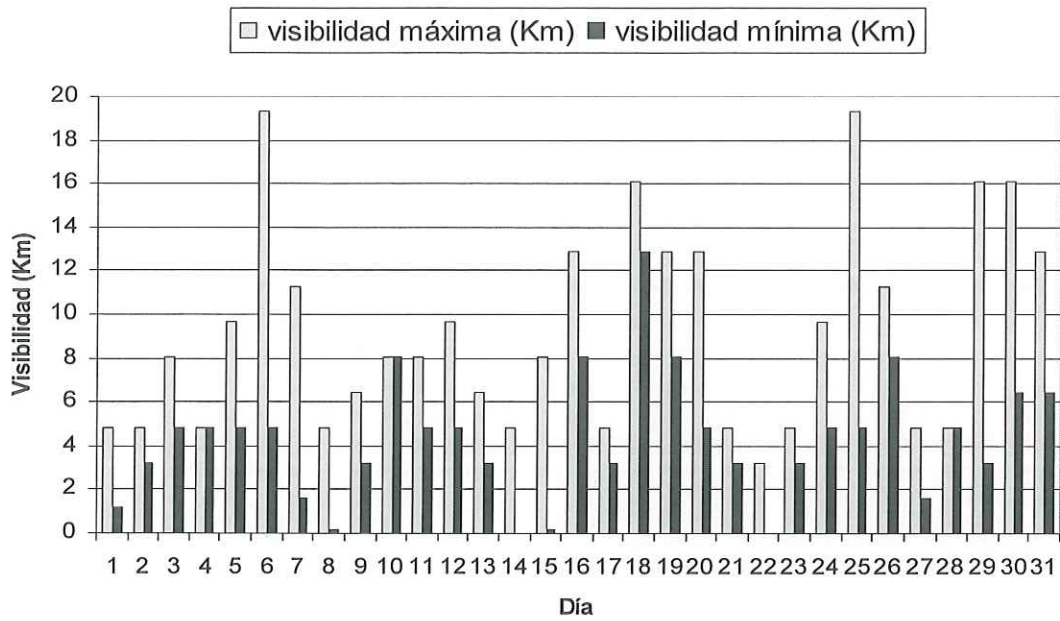


Figura 69. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de octubre año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (noviembre 2005)

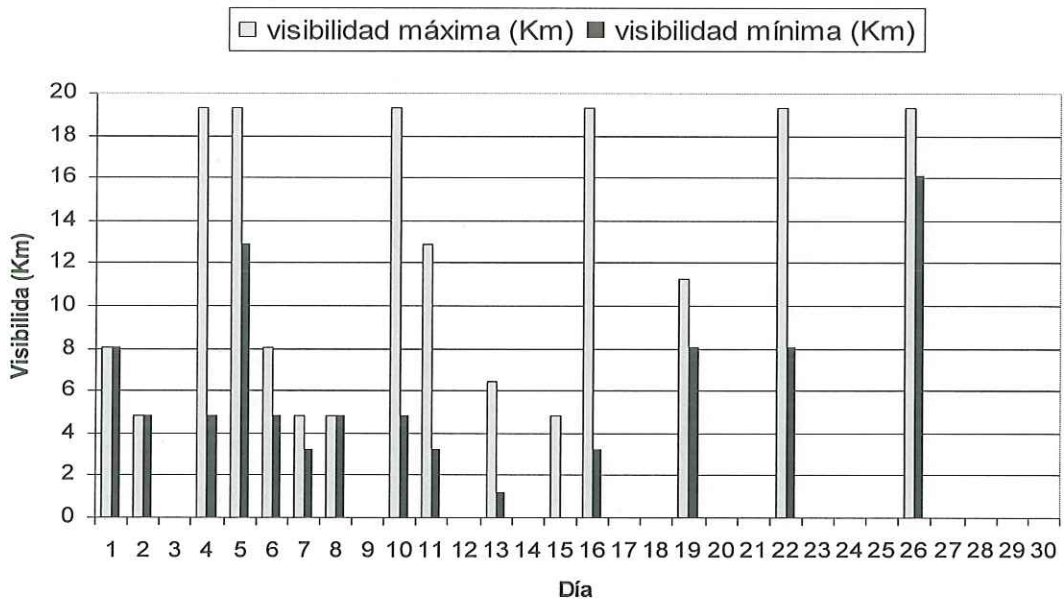


Figura 70. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de noviembre año 2005.

### Visibilidad de la ciudad de Ensenada (diciembre 2005)

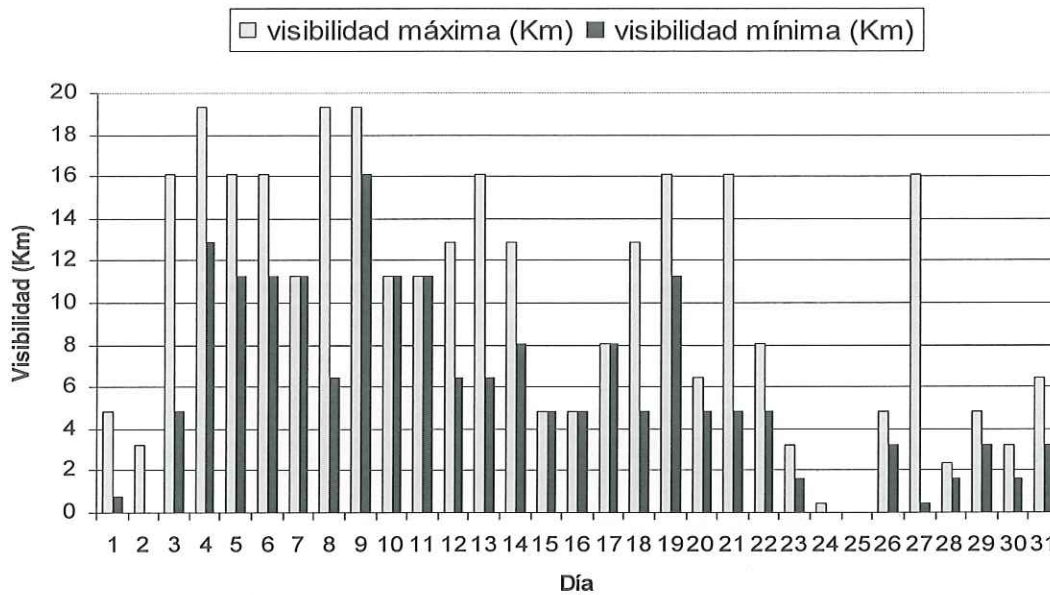


Figura 71. Visibilidad de la ciudad de Ensenada en el mes de diciembre año 2005.

### III.3 Visibilidad del 2001 al 2005.

En la figura 72 se observan los eventos de niebla 2001-2005, y se puede ver que se presenta con mayor frecuencia en los meses de septiembre y octubre, hasta 16 días con condición de niebla [Laboratorio de Pronóstico Meteorológico, Departamento de Oceanografía Física del CICESE].

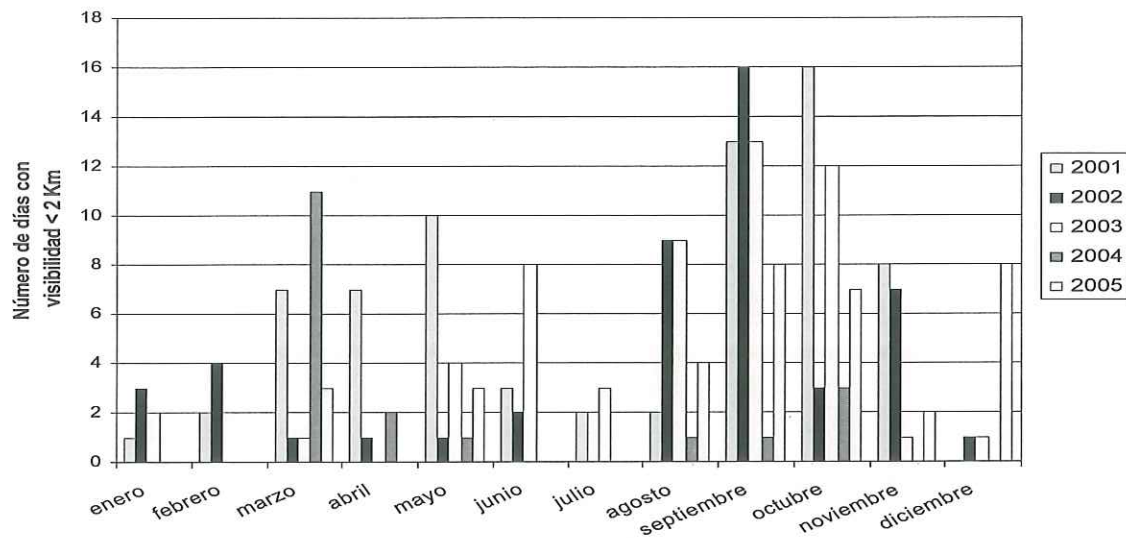


Figura 72. Número de días con visibilidad menor a 2 Km (periodo 2001-2005).

Con una menor presencia de condiciones de niebla se encuentran los meses de marzo, abril, mayo, junio, agosto y noviembre teniendo entre 11 y 7 días bajo esta condición.

Y en el último grupo que presentó la menor cantidad de eventos de niebla esta conformado por los meses de enero, febrero, julio y diciembre teniendo de 4 a 2 días bajo esta condición.

Para los días que presentan condición de niebla la atenuación puede ser de  $3.9 \frac{dB}{Km}$  hasta

$$271.95 \frac{dB}{Km} \text{ [Willebrand y Ghuman, 2002].}$$

Para notar con mayor claridad la distribución de los meses con mayor, mediana y menor cantidad de días con niebla, se hizo un promedio de los cinco años en la figura 73.

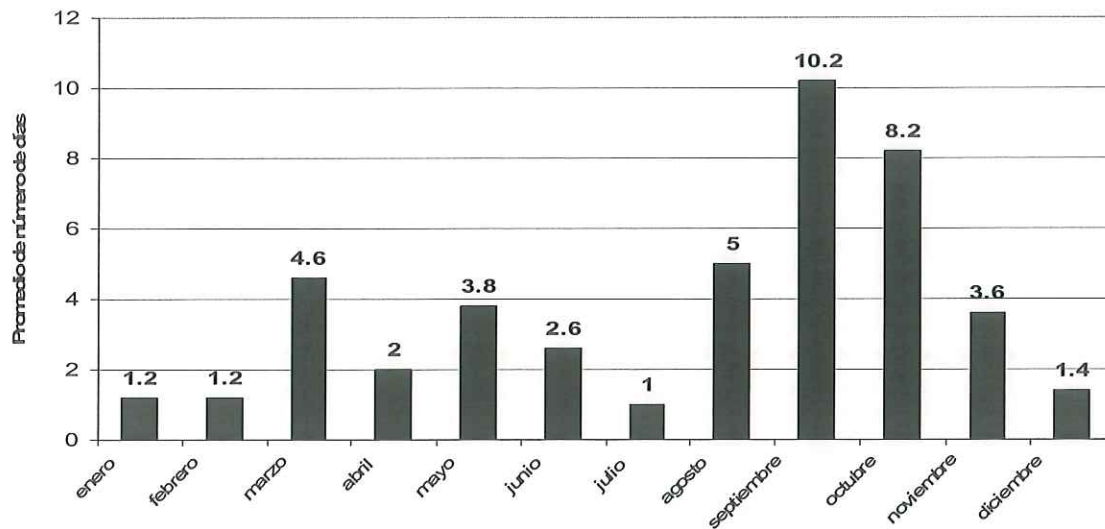


Figura 73. Promedio de días que presentan visibilidad menor a 2 Km.

Cabe aclarar que la condición de niebla no permanece durante las 24 horas del día, al realizar una investigación más profunda sobre las condiciones de niebla, esto quiere decir que se solicitó la información del número de horas de niebla en cada uno de estos días, el resultado final se muestra en la figura 74.

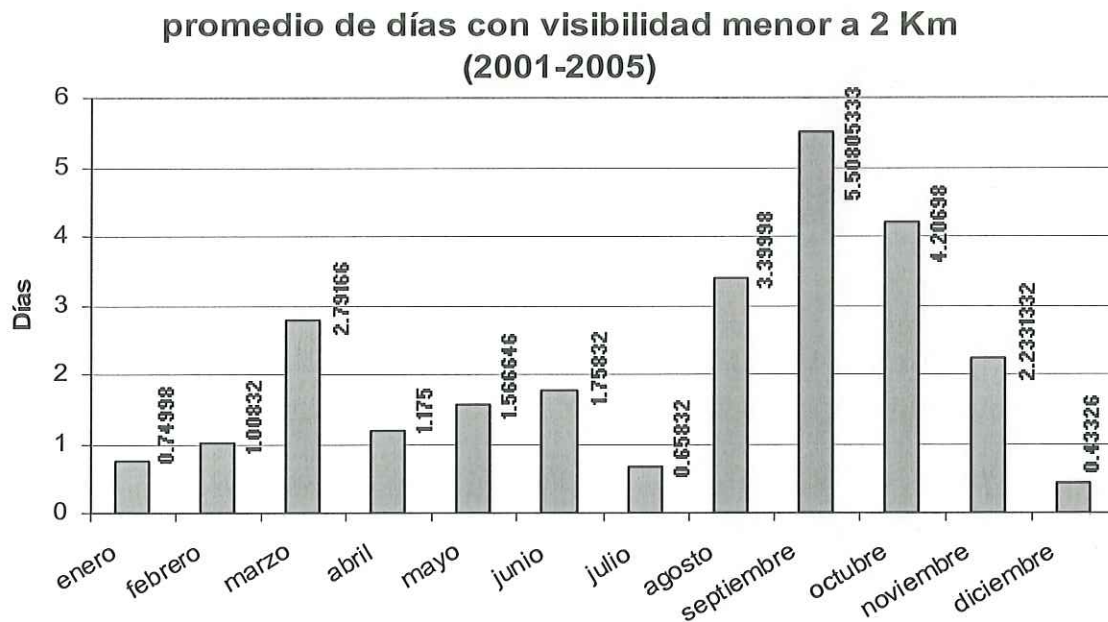


Figura 74. Promedio contabilizando el total de horas expresado en días.

Como se dijo, los periodos de niebla no duran todo el día sino que solo duran algunas horas y el tiempo restante permanece sin ella. Esto lleva a pensar, basados en la estadística que hemos realizado [Laboratorio de Pronóstico Meteorológico, Departamento de Oceanografía Física del CICESE], que mínimo un 90% del mes, que mayor tiempo presenta condición de niebla, va a ser con condiciones favorables para establecer el enlace de FSO.

Esto último hace que el sistema de FSO sea viable para la ciudad.

Si se llegara a dar una condición de niebla donde el enlace de FSO no pudiera llevarse a cabo, se podría implementar un sistema de respaldo por radiofrecuencia para que al momento de que la visibilidad no permita al sistema establecer la comunicación, este respaldo entre en funcionamiento y así no perder comunicación.

La penalización que se tendría del sistema de respaldo sería que la velocidad de transmisión decaería y no sería igual a la velocidad que se transmite por el sistema óptico.

## IV DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS INALÁMBRICAS

Lo que a continuación trataremos, es el diseño de un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas con modulación en intensidad y detección directa para la ciudad de Ensenada B.C.

El receptor tiene una sensibilidad mínima de potencia para una tasa de transmisión dada, y la tarea que se tiene para el diseño del sistema, es de asegurarse que la potencia transmitida, al pasar los diferentes factores que degradan la señal, permanezca por encima de la mínima sensibilidad del receptor, para garantizar la operación del enlace.

Para cuantificar estos factores que hacen decaer la señal, tenemos que construir un presupuesto de potencia para el sistema de FSO, contabilizar el total de pérdidas y ganancias, y después comparar si la potencia en el receptor está por encima de la que requiere el circuito de detección de señal. Al exceso de potencia que queda entre el nivel cuantificado y el mínimo de sensibilidad, es llamado margen de disponibilidad.

Los principales parámetros en un presupuesto de potencia para un sistema de FSO son: potencia de transmisión, ganancia de transmisión de la antena, pérdidas ópticas del transmisor, pérdidas por propagación, pérdidas en el canal por dispersión y absorción, pérdidas por apuntamiento, ganancia en la antena receptora, pérdidas ópticas en el receptor y sensibilidad en el receptor, como se ve en la figura 75.

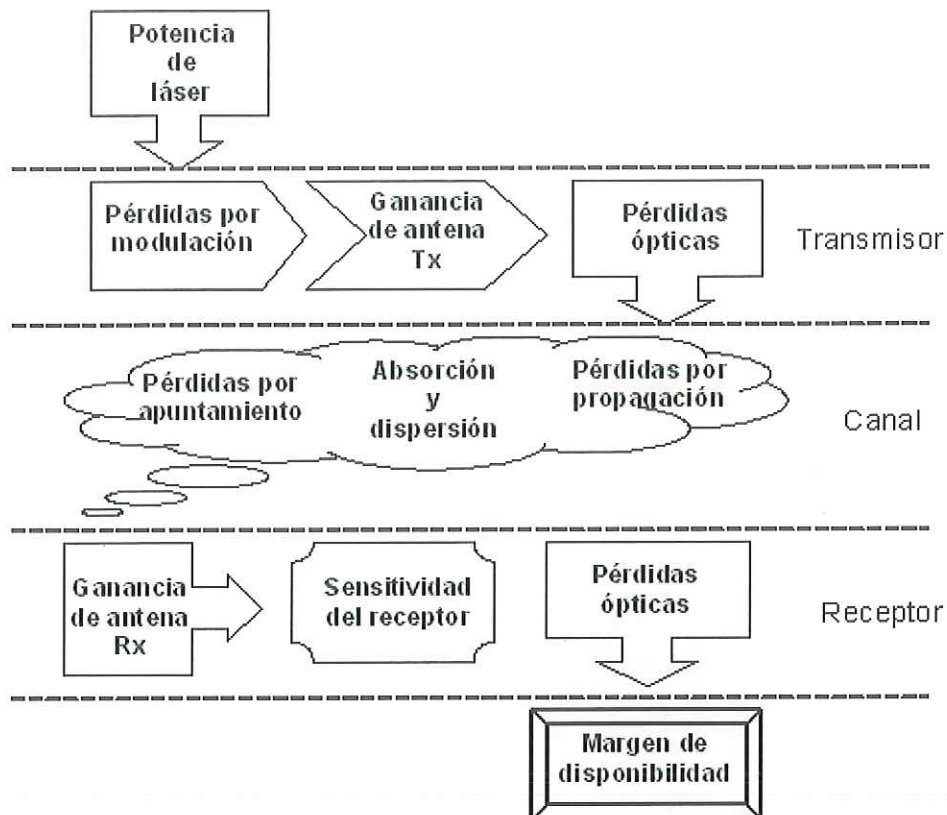


Figura 75. Componentes del presupuesto de potencia para un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas.

#### *IV.1 Cálculo del presupuesto de potencia*

A continuación trataremos el cálculo del presupuesto de potencia, para poder establecer el margen de disponibilidad del sistema. Como se expuso, al principio del capítulo, lo que

tenemos que hacer es contabilizar el total de pérdidas y ganancias, por lo que la ecuación resultante para el margen de disponibilidad (M) es:

$$M = L_T - L_{\text{ópticas}} - L_{\text{propagación}} - L_{\text{apuntamiento}} - L_{\text{atmosféricas}} - L_{\text{colimación}} - M_s \quad (13)$$

donde:

$L_T$  : Margen de desvanecimiento

$L_{\text{ópticas}}$  : Pérdidas ópticas

$L_{\text{propagación}}$  : Pérdidas por propagación

$L_{\text{apuntamiento}}$  : Pérdidas por apuntamiento

$L_{\text{atmosféricas}}$  : Pérdidas atmosféricas

$L_{\text{colimación}}$  : Pérdidas por colimación

$M_s$  : Margen del sistema

La representación gráfica del presupuesto de potencia se ve en la figura 76. El eje X representa la distancia de propagación, usualmente no se dibuja a escala. El eje Y corresponde a la cantidad de potencia presente en el enlace. La última línea corresponde a la sensibilidad del foto-detector.

### Representación gráfica del presupuesto de potencia

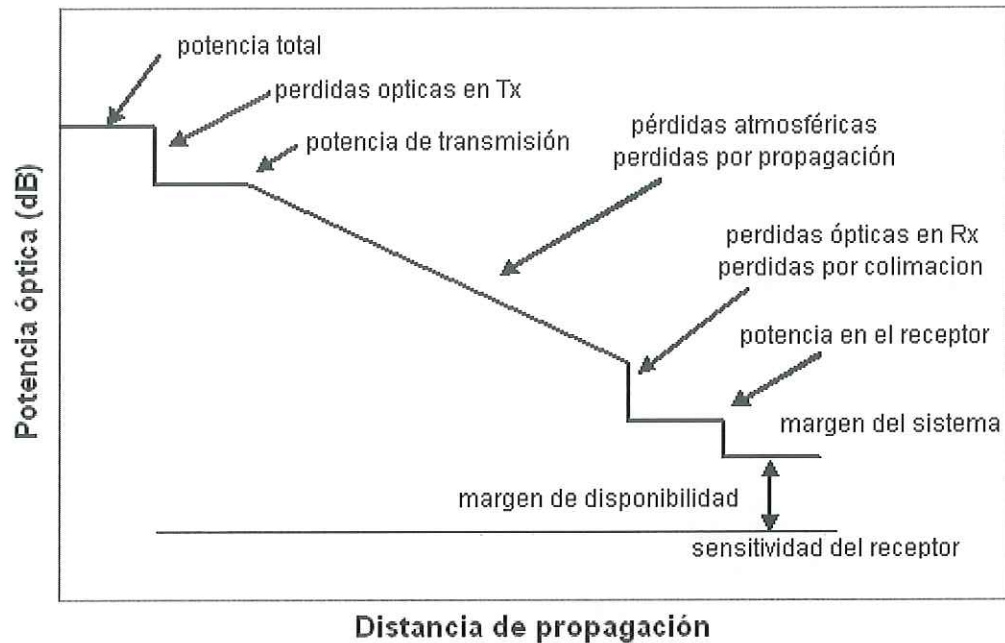


Figura 76. Representación gráfica del presupuesto de potencia.

Un presupuesto de potencia proporciona ciertos resultados sobre cómo será el desempeño y de dónde pueden ser consideradas coacciones para el funcionamiento del sistema.

La estadística del hidrometeoro niebla en la ciudad de Ensenada B.C. es parte fundamental en este diseño ya que nos está dando el comportamiento del canal por el cual se busca realizar el enlace de comunicación. Esta información se observa en el capítulo anterior.

### IV.1.1 Parámetros del sistema

Los parámetros para el diseño del sistema son: distancia del enlace, longitud de onda, diámetro de las antenas receptora y transmisora, potencia a transmitir y sensibilidad del receptor.

La longitud de onda seleccionada es 1550nm por ser segura a la visión humana, de acuerdo a la ventana atmosférica para esa longitud de onda y para tomar la tecnología de los sistemas de fibra óptica.

La distancia seleccionada, es de 1Km, por las características de una Red óptica inalámbrica (WON) Red de área local inalámbrica (WLAN) y el enlace de última milla.

La potencia óptica de transmisión es seleccionada por que es un nivel dentro del estándar IEC 60825-1, enmienda 2, y por su rango de seguridad para la vista con clasificación 1M.

El criterio para la selección de las antenas fue:

- Que el diámetro de la lente sea pequeño.
- Que estuviera disponible.
- Que fueran ligeros.

La sensibilidad de un detector de InGaAs con un ancho de banda hasta 5GHz, con rango de longitud de onda de 900nm-1650nm es de -20dBm.

Los parámetros para el diseño del sistema se encuentran en la siguiente tabla.

**Tabla 2. Parámetros para el diseño del sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas.**

| Parámetro  | Valor                   |
|--|-------------------------|
| Longitud de onda : $\lambda$                           | $1550 \text{ nm}$       |
| Distancia de enlace : $Z$                              | $1 \text{ Km}$          |
| Diámetro del lente (antena) transmisor : $D_{LenteTx}$ | $1'' = 2.54 \text{ cm}$ |
| Diámetro del lente (antena) receptor : $D_{LenteRx}$   | $3'' = 7.62 \text{ cm}$ |
| Potencia del transmisor : $P_{Tx}$                     | $+27 \text{ dBm}$       |
| Sensitividad del receptor : $P_{Rx}$                   | $-20 \text{ dBm}$       |

#### IV.1.2 Margen de desvanecimiento

En el margen de desvanecimiento se toma la potencia del transmisor y la del receptor para estimar el rango total de posibles pérdidas y esta dado por:

$$L_T = P_{Tx} - P_{Rx} \quad (14)$$

incorporando los valores queda:

$$L_T = 27 \text{ dBm} - (-20 \text{ dBm}) = 47 \text{ dB}$$

### IV.1.3 Pérdidas ópticas

Las pérdidas ópticas representan tanto reflexiones como pérdidas por absorción de la lente, ellos pueden ser calculados como:

$$L_{\text{ópticas}} = -20N \log_{10}(T_f) \quad (15)$$

donde:

$L_{\text{ópticas}}$  : Pérdidas ópticas

$T_f$  : coeficiente de transmisión de Fresnel.

$N$ : numero de elementos ópticos.

$$L_{\text{ópticas}} = -20(2) \log_{10}(0.75) = 4.997549 \text{ dB}$$

### IV.1.4 Pérdidas por propagación

Las pérdidas de propagación en el vacío pueden ser calculadas de la difracción de la apertura del emisor y el área de la antena de receptora, determinando la diferencia entre las pérdidas de propagación para una fuente isotrópica a una distancia  $Z$  y las ganancias de las

antenas (Antenas del transmisor y receptor). En el canal atmosférico hay una penalización adicional debido al ensanchamiento de rayo por la turbulencia.

$$L_{Pr\text{ opagación}} = -(G_{Tx} - L_{Isotropicas} - L_{Turbulencia} + G_{Rx}) \quad (16)$$

donde:

$G_{Tx}$  : Ganancia de la antena transmisora

$L_{Isotropicas}$  : Pérdidas isotrópicas

$L_{Turbulencia}$  : Pérdidas por turbulencia

$G_{Rx}$  : Ganancia de la antena receptora

#### IV.1.4.1 Ganancia de la antena transmisora

El haz difractado de la antena transmisora se aproxima a una forma Gaussiana. Esto es igual para el haz láser y muy parecido a un haz Airy, por lo que es conveniente escribir la ganancia de la antena transmisora  $G_{Tx}$  como función de la divergencia que sufre el haz.

$$G_{Tx} = 10 \log_{10} \left( \frac{2}{\Omega_0} \right)^2 \quad (17)$$

donde:

$$\Omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi D_{\text{antenaTx}}} \quad (18)$$

$$\Omega_0 = \frac{2(1550nm)}{\pi (0.024m)} = 3.884884 \times 10^{-5}$$

sustituyendo (18) en (17):

$$G_{Tx} = 10 \log_{10} \left( \frac{2}{3.884884 \times 10^{-5}} \right)^2 = 94.2330388 \text{ dB}$$

#### IV.1.4.2 Ganancia de la antena receptora

Como el campo de apertura del área activa del receptor  $A_r$  puede ser aproximado a una onda plana, la ganancia en la antena receptora está dada por [Santamaría, 1994]:

$$G_{Rx} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \right) \quad (19)$$

$$G_{Rx} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi (0.0762m)}{(1550nm)^2} \right) = 116.00501439 \text{ dB}$$

#### IV.1.4.3 Pérdidas isotrópicas

Las pérdidas isotrópicas están dadas por:

$$L_{isotrópicas} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi Z}{\lambda} \right)^2 \quad (20)$$

donde  $Z$  es la distancia, entonces:

$$L_{isotrópicas} = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi(1000m)}{1550nm} \right)^2 = 198.177563317 \text{ dB}$$

#### IV.1.4.4 Pérdidas por turbulencia

Las pérdidas por turbulencia siguen estadísticas Gaussianas, lo cual introduce atenuación en la propagación del haz y están dadas por:

$$L_{turbulencia} = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{\Omega_0}{\Omega_{turbulencia}} \right)^2 \right] \quad (21)$$

donde  $\Omega_{turbulencia}$  está dada por [Santamaría, 1994]:

$$\Omega_{\text{turbulencia}} = \frac{\lambda}{\pi\rho_b} \quad (22)$$

donde:

$\rho_b$  es el radio de coherencia de largo alcance.

Para distancias relativamente cortas, la distorsión del frente de onda debido a la turbulencia del medio, no tiene variaciones considerables, por lo que la apertura del haz es casi la misma, se considera el radio de coherencia en el eje  $R_0$  para aproximar la dimensión del valor de  $\rho_b$ .

Entonces  $\rho_b \approx R_0$

$$\Omega_0 = \frac{\lambda}{2\pi R_0} \quad (23)$$

despejando  $R_0$

$$R_0 = \frac{\lambda}{2\pi\Omega_0} \quad (24)$$

$$\rho_b \approx R_0 = \frac{1550\text{nm}}{2\pi(3.884884 \times 10^{-5})} = .00635 \text{ m}$$

sustituyendo en (22), resulta:

$$\Omega_{\text{turbulencia}} = \frac{1550nm}{\pi(0.00635)} = 7.769768 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

este resultado se sustituye en (21) y obtenemos:

$$L_{\text{turbulencia}} = 10 \log_{10} \left[ 1 + \left( \frac{3.884884 \times 10^{-5}}{7.769768 \times 10^{-5}} \right)^2 \right] = 0.96910013 \text{ dB}$$

y para obtener las pérdidas por propagación se hace la sustitución de los resultados en (16):

$$L_{\text{propagación}} = -(94.2330388 - 198.177563317 - 0.96910013 + 11600501439) = -11.049 \text{ dB}$$

#### IV.1.5 Pérdidas por apuntamiento

Las pérdidas por apuntamiento están dadas por:

$$L_{\text{apuntamiento}} = 4.3229 \left( \frac{\phi_e}{\Omega_0} \right)^2 \quad (25)$$

ángulo límite  $\phi_e$ , para que los rayos incidan sobre el receptor [Santamaría, 1994], este ángulo debe ser la mitad del ancho del haz transmitido, por lo tanto

$$\phi_e = \frac{\theta_b}{2} \quad (26)$$

donde

$\theta_b$  : ángulo del haz limitado por la difracción del transmisor y está dado por:

$$\theta_b \cong \frac{\lambda}{D_{antenaTx}} \quad (27)$$

$$\theta_b \cong \frac{1550nm}{0.0254m} = 61.02362\mu rad$$

sustituyendo el resultado en (26):

$$\phi_e = \frac{61.02362\mu rad}{2} = 30.51181\mu rad$$

sustituyendo en (25), resulta:

$$L_{\text{apuntamiento}} = 4.3229 \left( \frac{30.51181 \mu\text{rad}}{3.884884 \times 10^{-5}} \right)^2 = 2.666582476 \text{ dB}$$

#### IV.1.6 Pérdidas atmosféricas

Retomando del capítulo III, la transmisión  $\tau$  en la atmósfera está en función de la distancia  $Z$ , y está expresada en la ley de *Beer* (6) y (7) como:

$$L_{\text{atmosféricas}} = 10 \log_{10} \tau$$

$$\frac{I_d}{I_{Tx}} = \tau = e^{-\gamma Z}$$

$\frac{I_d}{I_{Tx}}$  es la relación entre la intensidad detectada y la intensidad de salida o transmitida y  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación por dispersión *Mie*, es el factor dominante en el coeficiente de atenuación, debido a que las partículas que provocan la dispersión tienen un tamaño semejante a la longitud de onda del haz infrarrojo.

El coeficiente de atenuación por dispersión *Mie* (11) queda como:

$$\gamma = \frac{3.91}{v} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta}$$

donde:

$\gamma$  : Coeficiente de atenuación atmosférica o dispersión *Mie*

$v$ : Visibilidad

$\lambda$  : Longitud de onda de transmisión

$\delta$  : Distribución del tamaño de partículas de dispersión

$$\delta = \left\{ \begin{array}{ll} 0.585(v)^{\frac{1}{3}} & \text{para } v < 6Km \\ 1.3 & \text{para } 6Km < v < 50Km \\ 1.6 & \text{para } v < 50Km \end{array} \right\}$$

Para el cálculo de la atenuación atmosférica se tomaron valores de visibilidad de 200m hasta 2000m, ya que en este rango se representan condiciones climatológicas desde niebla espesa hasta bruma. La longitud de onda seleccionada previamente para el diseño de este sistema es la que usaremos para los cálculos (1550nm).

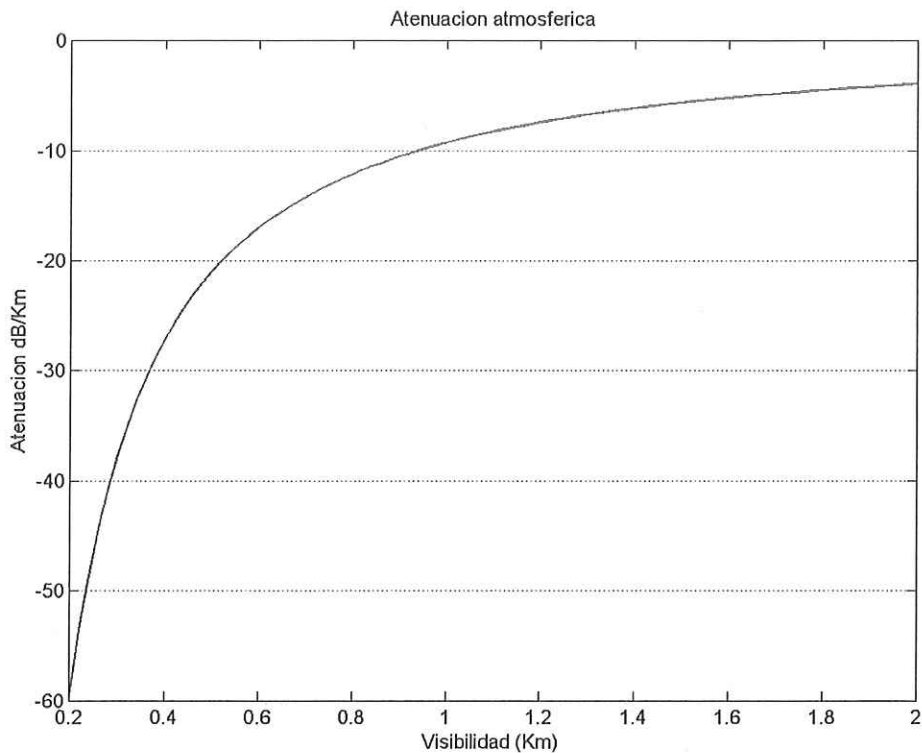


Figura 77. Atenuación atmosférica con visibilidad de 200m a 2Km @ 1550nm.

El resultado de las pérdidas atmosféricas se aprecia con claridad en la Figura 77, donde el eje 'x' representa a la visibilidad y está dada en kilómetros. El eje 'y' corresponde a la atenuación y está dada en  $\frac{dB}{Km}$ . Lo que aquí podemos ver, es como la atenuación

atmosférica, para visibilidad menor a 2Km y mayor a 1Km, aumenta progresivamente. Pero al descender la visibilidad por debajo de 1Km la atenuación crece en forma abrupta.

Para los demás casos donde las condiciones de visibilidad son mayores a 2Km se ve como la atenuación, según el comportamiento de la curva, ira descendiendo poco a poco tendiendo a  $0 \frac{dB}{Km}$ .

#### IV.1.7 Pérdidas por colimación

Las pérdidas por colimación se deben a la radiación del haz que es enfocado por la antena receptora fuera del detector debido al tamaño o la posición del punto enfocado [Santamaría, 1994].

$$L_{\text{colimación}} = -10 \log_{10} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{fov}{\Omega_c}\right)^2} \right] \quad (28)$$

$$fov = \frac{\pi}{4} \left( \frac{d}{f_c} \right)^2 = \frac{Ad}{f_c^2}$$

(29)

$$fov = \frac{\pi}{4} \left( \frac{0.004m}{0.06m} \right)^2 = 3.4906585 \text{ mrad}$$

$$\Omega_c^2 = \left( \frac{\lambda}{\pi p_f} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{2p_f}{D_{\text{antenaRx}}} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{p_f}{D_{\text{antenaRx}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (30)$$

donde:

$\Omega_c$  : ancho angular Gaussiano de la intensidad de largo alcance

$p_f$  : radio de coherencia del haz colimado

$$p_f = \frac{\textit{centroide}}{2} \quad (31)$$

$$\textit{centroide} = \frac{1.27(\lambda)(f_c)}{\textit{apertura del diámetro del fotodetector}} \quad (32)$$

$$\textit{centroide} = \frac{1.27(1550\textit{nm})(0.06\textit{m})}{0.003} = 3.937 \times 10^{-5}$$

tomando el resultado y sustituyéndolo en (31)

$$p_f = \frac{3.937 \times 10^{-5}}{2} = 1.9685 \times 10^{-5}$$

sustituyendo (31) en (30), queda:

$$\Omega_c^2 = \left( \frac{1550nm}{\pi(1.9685 \times 10^{-5})} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{2(1.9685 \times 10^{-5})}{0.0762m} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{1.9685 \times 10^{-5}}{0.0762m} \right)^2 \right] = .0249628598$$

tomando los resultados de las ecuaciones (29) y (30) y sustituyéndolos en (28), resulta:

$$L_{colimación} = -10 \log_{10} \left[ 1 - e^{-\left( \frac{0.0034906585}{0.0249628598} \right)^2} \right] = 17.13013 \text{ dB}$$

### *IV.2 Margen de disponibilidad*

Teniendo el resultado de todas las ganancias y las pérdidas podremos estimar nuestro presupuesto de potencia, por lo tanto sustituyendo en la ecuación 13 el margen de disponibilidad queda:

$$M = 47dB - 94.2330388dB - (-11.049)dB - 2.666582476dB - L_{atmosféricas} - 17.13013dB - M_s$$

Considerando el margen del sistema  $M_s$  para compensar la degradación de los componentes y otros factores que afecten al sistema, le agregamos 3dB y queda:

$$M = 47dB - 94.2330388dB - (-11.049)dB - 2.666582476dB - L_{atmosféricas} - 17.13013dB - 3dB$$

En el capítulo V se observan los resultados obtenidos del diseño.

## V RESULTADOS

En el capítulo anterior se vio la metodología de diseño para un enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas.

Enseguida se ven valores resultantes del diseño en forma de tabla y diferentes curvas para apreciar el margen de disponibilidad con diferentes características del sistema: específicamente la potencia óptica y visibilidad.

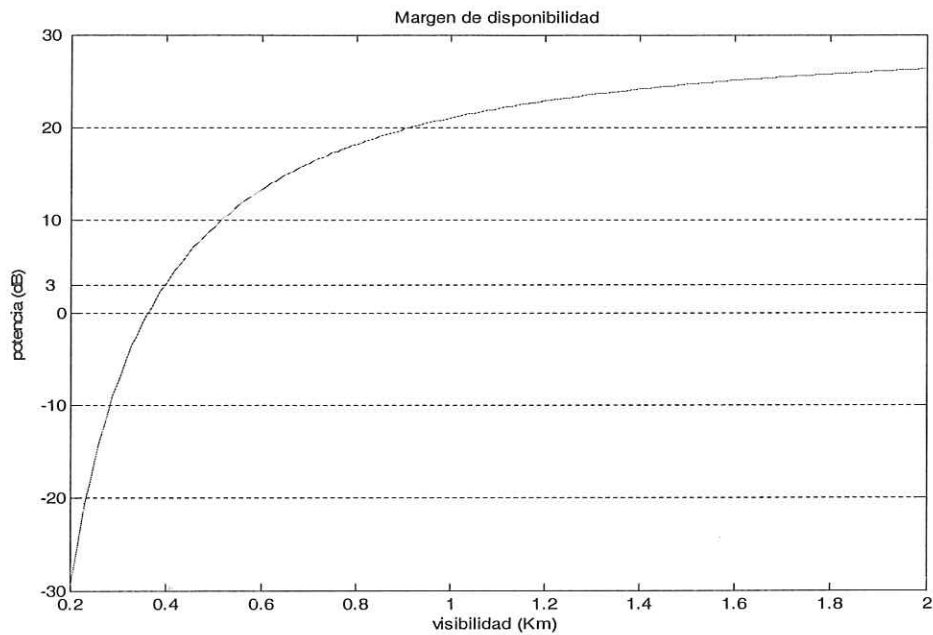
### V.1 Parámetros del sistema

En la tabla 3 se resumen los resultados calculados y parámetros del sistema para el enlace de comunicación óptica inalámbrica.

**Tabla 3. Resultados del diseño y especificaciones para el enlace de comunicaciones ópticas inalámbricas.**

|                        |                            |                    |               |
|------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|
| Parámetros del sistema | Distancia                  | $Z$                | 1 Km          |
|                        | Longitud de onda           | $\lambda$          | 1550 nm       |
|                        | Diámetro de la lente Tx    | $D_{lente Tx}$     | 1" = 2.54 cm  |
|                        | Diámetro de la lente Rx    | $D_{lente Rx}$     | 3" = 7.62 cm  |
|                        | Potencia de Tx             | $P_{Tx}$           | 27 dBm        |
|                        | Sensitividad del detector  | $P_{sens}$         | -20 dBm       |
|                        | Diámetro del láser         |                    | 3 mm          |
|                        | Diámetro del foto-detector |                    | 4 mm          |
|                        | Margen de desvanecimiento  | $L_T$              | 47 dB         |
| Ganancia de antena     | Ganancia de antena Tx      | $G_{Tx}$           | 94.23303 dB   |
|                        | Ganancia de antena Rx      | $G_{Rx}$           | 116.005014 dB |
| Pérdidas               | Perdidas ópticas           | $L_{ópticas}$      | 4.997549 dB   |
|                        | Perdidas por propagación   | $L_{propagación}$  | 11.049 dB     |
|                        | Perdidas por apuntamiento  | $L_{apuntamiento}$ | 2.66658 dB    |
|                        | Perdidas atmosféricas      | $L_{atmosféricas}$ | Ver figura 77 |
|                        | Perdidas por colimación    | $L_{colimación}$   | 17.13013 dB   |
|                        | Margen del sistema         | $M_s$              | 3 dB          |
|                        | Margen de disponibilidad   | $M$                | Ver figura 78 |

En la figura 78 y 79 se observa en el resultado, para los parámetros establecidos en el diseño del sistema, es que el sistema va a garantizar su funcionamiento hasta a visibilidad de 500m ya que su margen se mantiene por encima de los 3 dB [Alexander 1997].



**Figura 78. Margen de disponibilidad del sistema de comunicaciones ópticas.**

Si la visibilidad baja de 400m el margen de disponibilidad no será lo suficiente para lograr establecer el enlace y por lo tanto el sistema no funcionará.

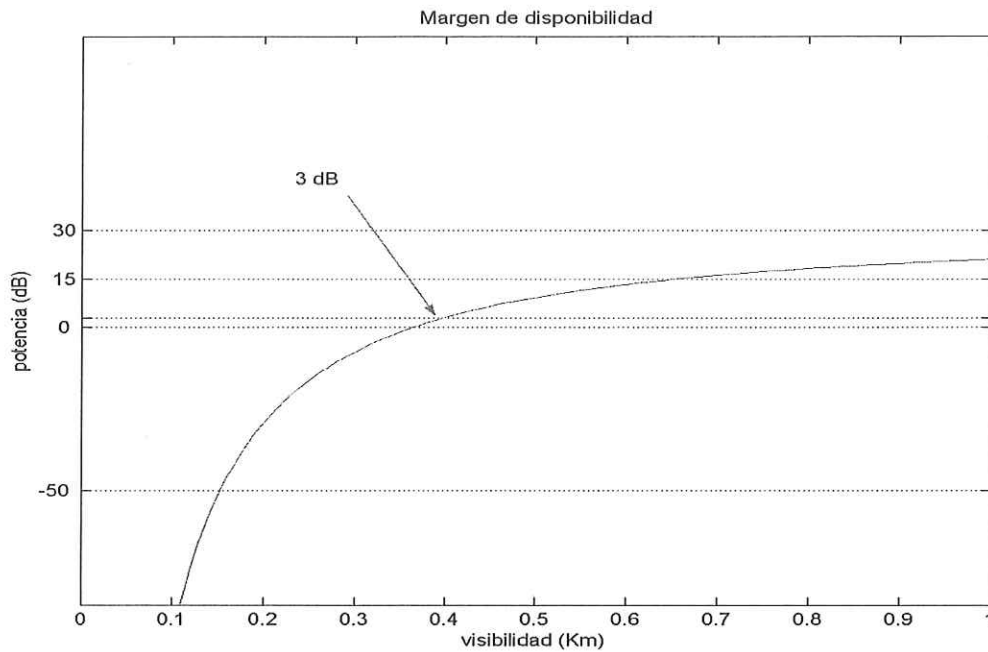


Figura 79. El margen mínimo de potencia para poder afirmar que el enlace se podrá establecer.

### *V.2 Margen de disponibilidad para diferentes valores de potencia y distancia*

Utilizando la metodología del capítulo IV, se realizaron cálculos para diferentes potencias de transmisión a diferentes distancias de enlace hasta 1 Km.

Las potencias de transmisión fueron seleccionadas de acuerdo a los estándares de transmisión láser en espacio libre y las distancias fueron establecidas reduciendo 200 m a partir de 1 Km, quedando la tabla 4 para las potencias seleccionadas, esto quiere decir que el grado de el fenómeno climatológico cada vez es mayor

Tabla 4. Potencias de transmisión seleccionadas

| Potencia de Transmisión (mW) | Potencia de transmisión en (dBm) |
|------------------------------|----------------------------------|
| 500                          | 27                               |
| 200                          | 23                               |
| 150                          | 21.76                            |
| 100                          | 20                               |
| 20                           | 13                               |

y la tabla 5 para las distancias.

Tabla 5. Distancias del enlace

| Distancia del enlace (m) |
|--------------------------|
| 1000                     |
| 800                      |
| 600                      |
| 400                      |
| 200                      |

En la **Error! Reference source not found.**, 81, 82, 83, 84 se observa el margen de disponibilidad del enlace con diferentes potencias de transmisión de 20mW a 500mW y con visibilidades de 200 m a 2 Km.

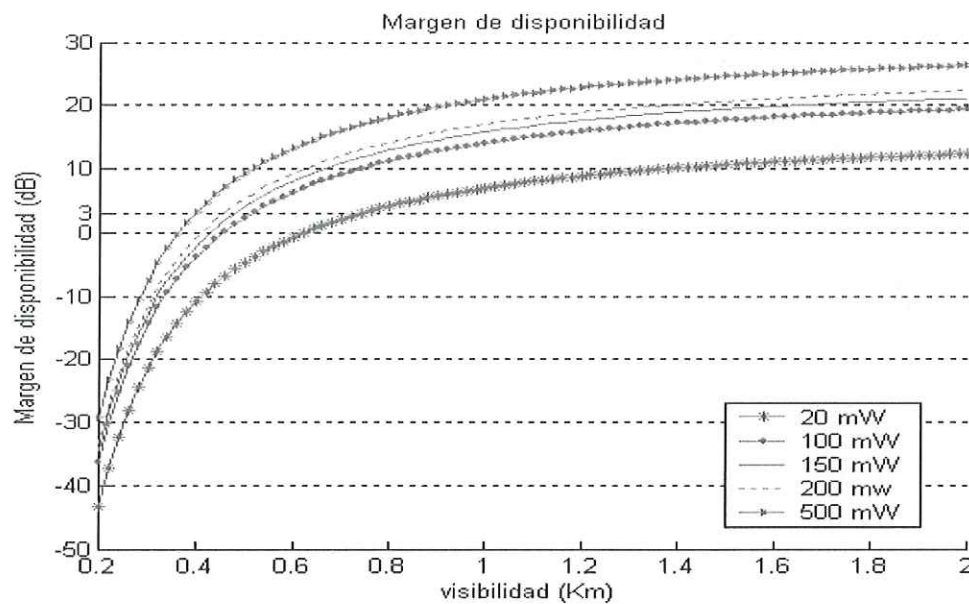


Figura 80. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 1 Km.

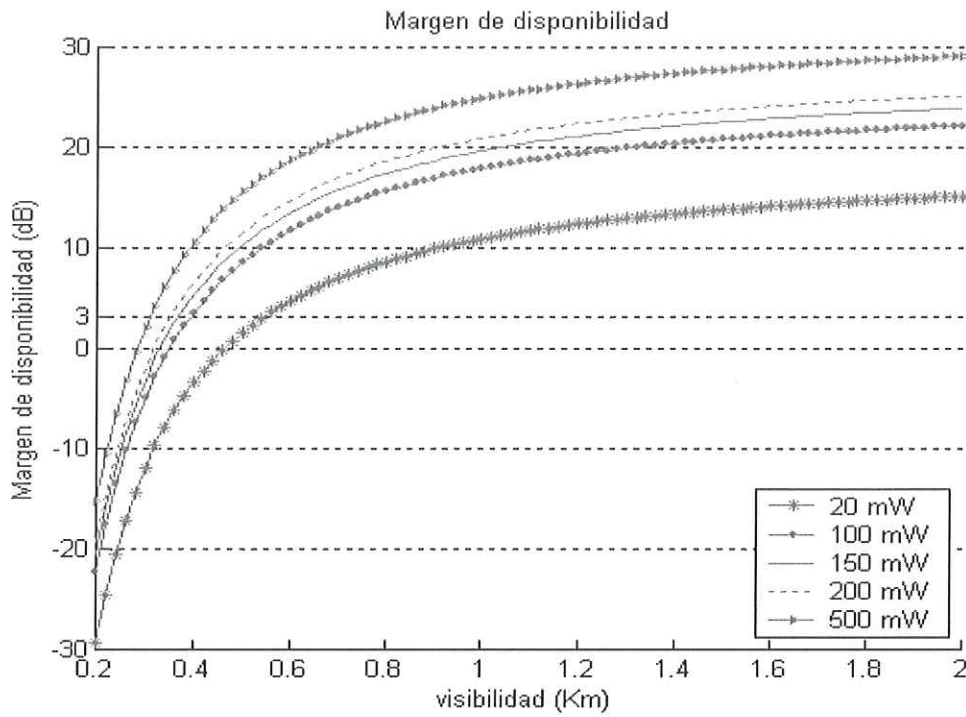


Figura 81. Margem de disponibilidade para diferentes potências a uma distância de enlace de 800 m.

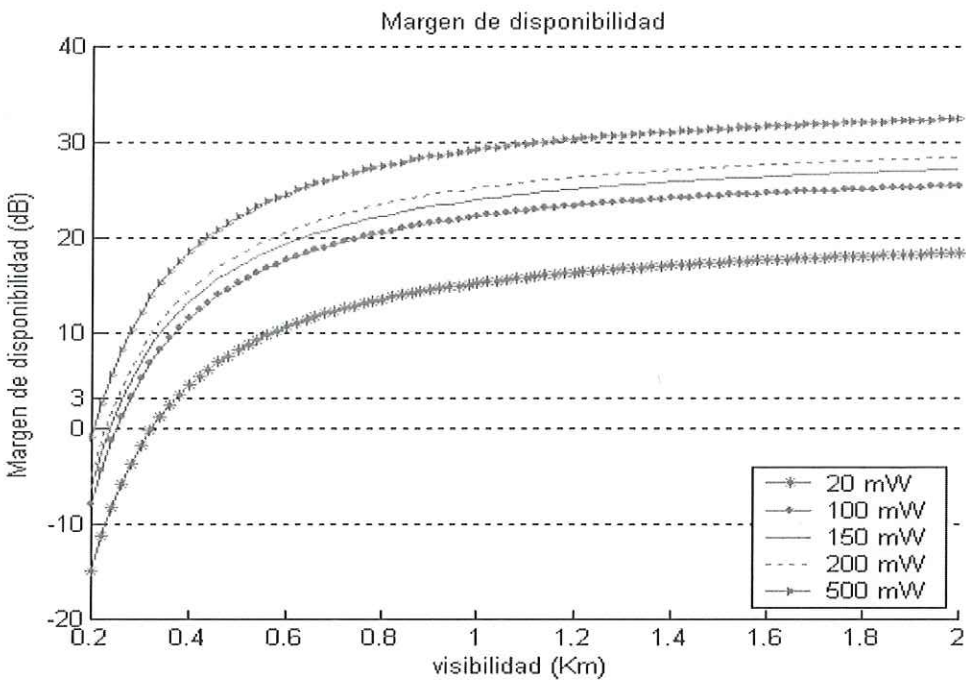


Figura 82. Margem de disponibilidade para diferentes potências a uma distância de enlace de 600 m.

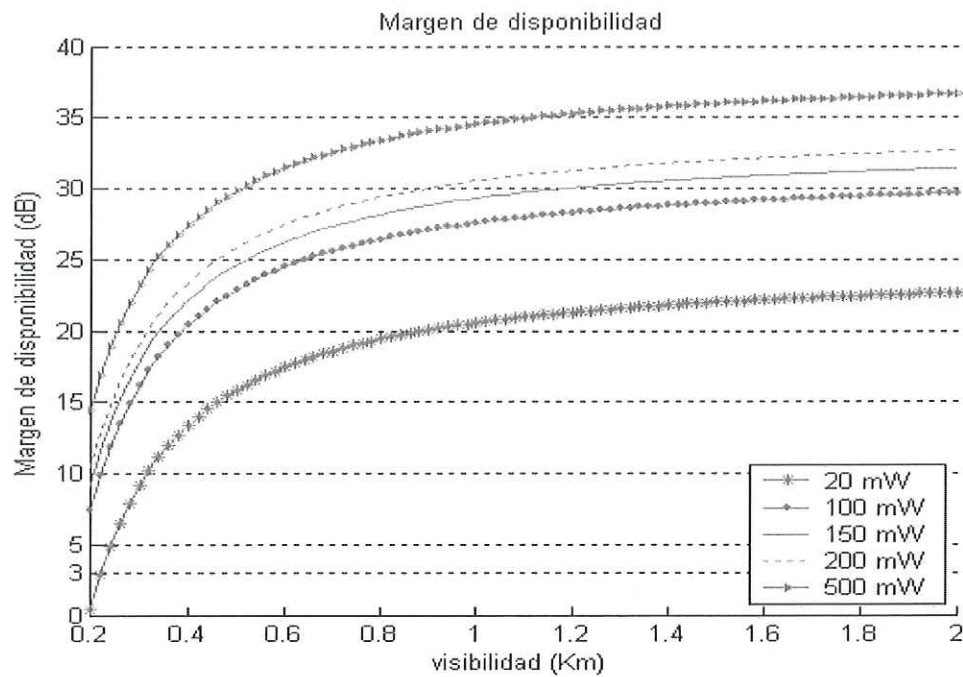


Figura 83. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 400 m.

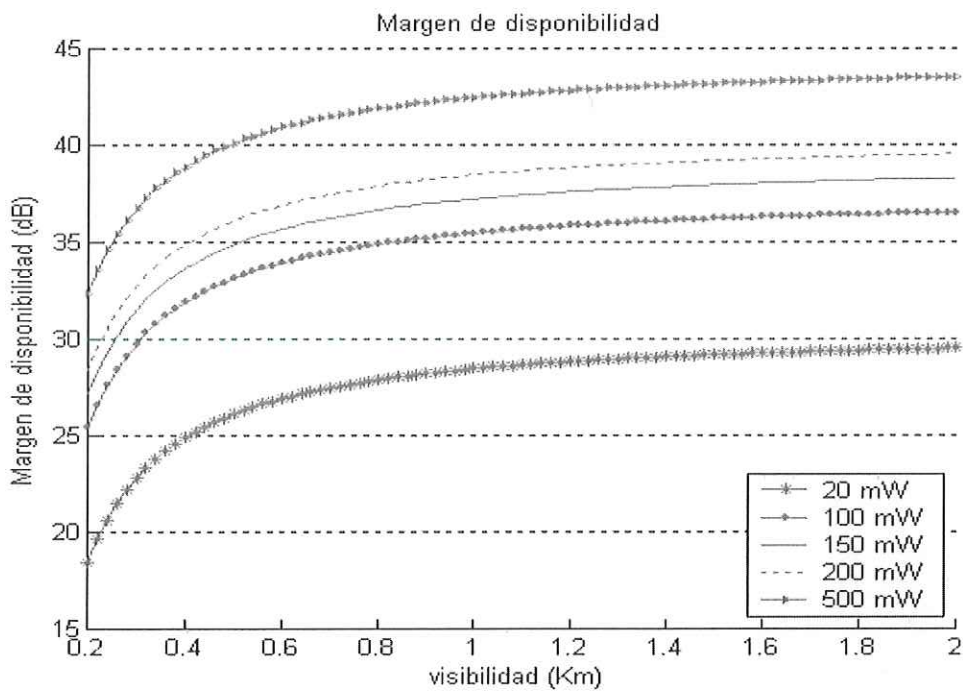


Figura 84. Margen de disponibilidad para diferentes potencias a una distancia de enlace de 200 m.

## VI CONCLUSIONES

1. Se aporta la estadística real sobre el comportamiento de la niebla en la ciudad de Ensenada B.C. durante los pasados 5 años.

Recordando que el fenómeno climatológico que mas afecta a los enlaces ópticos inalámbricos es la niebla y la información recabada sobre éste, nos muestra que los meses mas severos para un enlace óptico inalámbrico son septiembre y octubre.

La gráfica de la figura 85 se observa el comportamiento del canal en el transcurso del año en el periodo de 2001-2005.

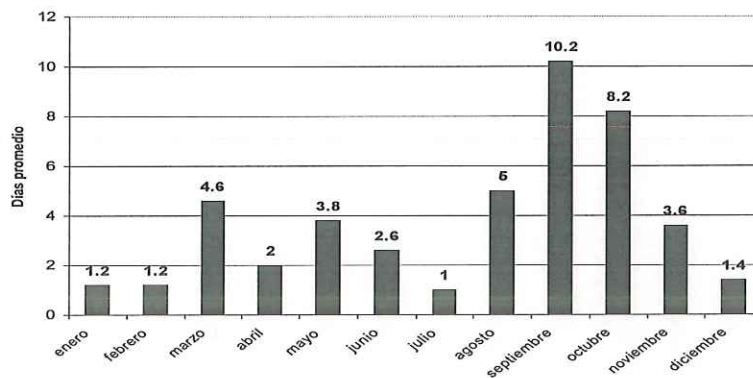


Figura 85. Promedio de días con niebla en la ciudad de Ensenada (2001-2005).

2 Se diseñó un sistema de comunicaciones ópticas inalámbricas MI/DD para las condiciones de la ciudad de Ensenada B.C.

3. El sistema diseñado es viable, debido a que las condiciones que pudieran interrumpir la comunicación del enlace solo se dan en tiempos cortos en un día y con poca frecuencia en la mayoría de los meses, por ejemplo en la figura 85 en el mes de septiembre el promedio

de niebla es de 10.2 días bajo esta condición, el tiempo real de éste hidrometeoro solo dura un periodo de tiempo 5.508 días esto se puede ver en la figura 74, pag. 57.

4. Para establecer el enlace a una distancia de 1 Km, es suficiente un láser con 20 mW de potencia óptica para obtener un margen de disponibilidad de 3 dB soportando visibilidad de 750 m. y es posible aumentar la potencia óptica hasta 500 mW (basados en estándares) y tener funcionando el enlace aun con visibilidad de 400m.

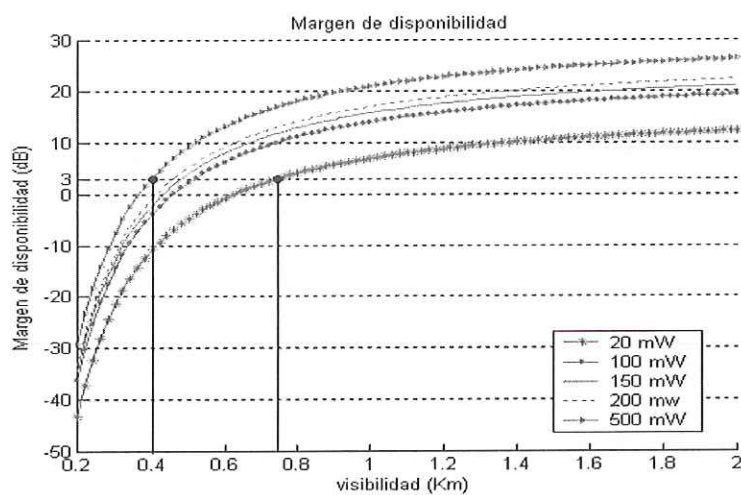


Figura 86. Margen de disponibilidad a una distancia de enlace de 1 Km para la ciudad de Ensenada.

## VII TRABAJOS A FUTURO

1. La construcción del sistema diseñado.
2. Caracterizar en campo el sistema.
3. Estudiar los efectos que puede tener un sistema con multi-láser.
4. Minimizar los efectos de pérdidas geométricas con un sistema de rastreo.

## REFERENCIAS

- [1] A.Santamaría, F.J. López Hernández, 1994, “Wireless LAN Systems”, Artech house, Inc., Norwood, MA., 99-119 p.
- [2] Desurvire, E. 2004. “Wiley Survival Guide in Global Telecommunications: broadband access, optical components and networks, and cryptography.” John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 528 pp.
- [3] Higareda C. Santiago A., “Estadística meteorológica 2001-2005”, Departamento de Oceanografía Física del CICESE, fuente original, Fuerza Aérea Mexicana, estación meteorológica de la B.A.M. No. 3 El ciprés, Ensenada, B.C.
- [4] Méndez, J. A. y Gagliardi. M. R. 2001. “Zasercomm crosslinking for satellite clusters”, Proceedings of SPIE Free-space laser communication technologies XIII, San Jose, CA; USA. 50-59 p.
- [5] Muraoka E. Ramón, 2005, “Comunicaciones ópticas coherentes en el espacio libre” Tesis de Maestría, 63-84p.

- [6] Muraoka Espiritu Ramon, Arturo Arvizu Mondragon, Amado Nevárez Alcaraz. 2005. "Estadística de la visibilidad en la ciudad de Ensenada, B.C., durante el periodo 2001 al 2004" informe técnico.
- [7] Stephen B. Alexander, Washington, 1997, "Optical Communication Receiver Design", SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 26-28 34-37 63-64 p.
- [8] Willebrand, Heinz and Ghuman, S. Baksheesh. 2002. "Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks", by Sams Publishing, 259 pp.

#### **CONSULTAS EN INTERNET**

- [1] <http://www.freespaceoptics.org/freespaceoptics/whitepapers/default.cfm>  
(noviembre de 2005)
- [2] [http://www.free-space-optics.org/fso\\_resources.php](http://www.free-space-optics.org/fso_resources.php)  
(noviembre de 2005)
- [3] <http://www.systemsupportsolution.com/whitepapers.htm>  
(enero de 2006)
- [4] [http://www.free-space-optics.org/fso\\_resources.php](http://www.free-space-optics.org/fso_resources.php)  
(enero de 2006)

[5] <http://www.terabeam.com>

(enero de 2006)

[6] <http://www.lasers.jpl.nasa.gov>

(junio de 2006)

