

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA**



**“DISEÑO DE UN RADIOENLACE UHF DIGITAL POR  
SOBRE EL HORIZONTE, ENTRE PIURA Y BAYOVAR”**

**TESIS**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

**INGENIERO ELECTRONICO**

PRESENTADA POR

**EDGARDO GERMÁN VERÁSTEGUI LAZO**

PROMOCION 1970-1

LIMA - PERU  
2001

*A Lucila, Sergio,  
Natalia y Joaquín*

**DISEÑO DE UN RADIOENLACE UHF DIGITAL POR SOBRE EL  
HORIZONTE, ENTRE PIURA Y BAYOVAR**

# INDICE

	Página
<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>CONSIDERACIONES DE TECNOLOGIA DE TRANSMISION</b>	4
1.1 Introducción	4
1.2 Vía Satélite	6
1.3 Servicio de Transmisión de Datos	9
1.4 Radioenlace Digital UHF Directo	11
<b>CAPITULO II</b>	
<b>RADIOPROPAGACION POR LINEA DE VISTA CASI RASANTE</b>	16
2.1 Introducción	16
2.2 Ruta del Radioenlace	22
2.3 Apreciación de Obstrucciones	24
2.4 Teoría de Difracción	29
2.4.1 Ecuaciones de Maxwell	29
2.4.2 Aproximación de Fresnel	32
2.5 Estimación de la Atenuación por Difracción	37
2.5.1 "Technical Note 101" - Oficina Nacional de Estándares (NBS) de EE.UU. de N.A.	39
2.5.1.1 Difracción "Filo de Cuchilla"	39

	Página
2.5.1.2 Difracción allende el horizonte de tierra esférica	42
2.5.2 Metodología de K. Bullington	48
2.5.2.1 Nomograma de Difracción sobre tierra plana	49
2.5.2.2 Nomograma de Difracción allende el horizonte de tierra esférica	54
2.5.2.3 Nomograma de Difracción en obstáculo protuberante	57
<b>CAPITULO III</b>	
<b>ESTUDIOS DE CAMPO</b>	61
3.1 Plan de Pruebas	62
3.2 Estimación del valor de k	66
3.3 Estimación de la atenuación por Difracción	71
3.3.1 Bayóvar 1 - Piura 1	71
3.3.2 Bayóvar 1 - Piura 2	74
3.3.3 Resumen de valores estimados	77
3.4 Registros de Niveles de Recepción	78
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>DISEÑO DEL RADIOENLACE</b>	82
4.1 Criterios de Diseño	82
4.2 Cálculos de Radiopropagación	83
4.2.1 Confiabilidad	83
4.2.2 Margen de Desvanecimiento	85
4.2.3 Nivel de Portadora Recibida	86

	Página
4.2.4 Resultados	89
4.3 Configuración de Sistema	93
4.3.1 Equipos de Transmisión	93
4.3.2 Telemedición y control SCADA	99
4.3.3 Interconexión de Redes Lan	101
4.3.4 Acceso al INTERNET	102
<b>CONCLUSIONES</b>	103
<b>ANEXO: Datos numéricos de los Perfiles Topográficos</b>	104
<b>ACRONIMOS</b>	109
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	111

## PROLOGO

El propósito del presente estudio, es analizar cuantitativamente las condiciones de radiopropagación, y definir técnicamente un radioenlace UHF digital entre Piura y Bayóvar, por sobre el horizonte, bajo condición de difracción.

La condición de línea de vista, para el diseño de un radioenlace en la banda UHF y de Microondas, al asumir radiopropagación de espacio libre, permite establecer parámetros de transmisión altamente predecibles. La metodología seguida en el diseño, tiene carácter estándar, y está profusamente documentada, en base a la investigación física desarrollada en la primera mitad del siglo XX.

Cuando la topografía de la zona, que atravieza el radioenlace, no cumple con la condición de línea de vista, usualmente se divide el enlace en dos saltos de radiocomunicación, de modo que en cada uno de ellos prevalezca la mencionada condición. Ello, implica el funcionamiento de una estación repetidora, con lo que la inversión económica requerida, resulta duplicada.

Complementariamente, se dispone en la actualidad de varias metodologías que permiten afrontar el diseño de radioenlaces bajo condición de difracción sobre obstáculos. Entre ellas podemos citar a las de Kenneth Bullington, Longley-Rice, y la Recomendación UIT-R PN 370, la primera de

las cuales será ensayada comparativamente en el presente estudio. Estas metodologías, introducen una modificación al valor de atenuación por radiopropagación en espacio libre, referida al grado de claridad que presenta el eje de antenas respecto de los obstáculos a la línea de vista. Las metodologías de radioenlaces por difracción, son también resultado de extensa investigación, desarrollada en la primera mitad del siglo XX, tanto a nivel teórico como experimentalmente. Su precisión es de menor orden que la de la metodología estándar por línea de vista, por lo que su ámbito de aplicación está en las radiocomunicaciones fijas de uso privado, de baja capacidad, o móviles.

La implantación de radioenlaces por difracción, generalmente apunta a sustentar funcionamiento sin aplicación de estación repetidora, lográndose de tal manera, mantener la rentabilidad económica de la inversión dentro de márgenes realizables.

El presente estudio, enfoca los criterios de ingeniería de radiocomunicación, hacia el diseño de un radioenlace por difracción, requerido para la integración de funciones de la empresa PETROPERU S.A., en sus operaciones en la ciudad de Piura y el puerto de Bayóvar, en la costa Norte peruana. La justificación técnico-económica de aplicación del radioenlace, da inicio al estudio, considerando las alternativas de transmisión vía satélite y de alquiler de servicios a la empresa TELEFONICA DEL PERU. En el Capítulo II, se presenta la base conceptual de los procedimientos de cálculo en radiopropagación, con énfasis en la caracterización cualitativa y cuantitativa de los enlaces por difracción. Una somera revisión de la teoría



electromagnética, sirve de base para la presentación de las metodologías de análisis del fenómeno de difracción, orientadas a determinar el valor de la atenuación de radiopropagación. Ellas son ensayadas, en tres radioenlaces que constituyeron materia de las pruebas de campo realizadas, y sus resultados son comparados, en el Capítulo III, con los deducidos de los registros de medición obtenidos, comprobándose buena concordancia entre teoría y práctica. La metodología de cálculo, es a su vez aplicada para la estimación del valor de  $k$ , relación entre los radios de tierra ficticia y real, prevaleciente en la zona del radioenlace.

En el Capítulo IV, se afronta el diseño del radioenlace digital propuesto, siguiendo la práctica de ingeniería establecida, ampliada con los conceptos tratados en los capítulos anteriores. Se desarrollan además, los aspectos de implantación en el entorno tecnológico actual, relativos a requerimientos a nivel de usuario, capacidades de transmisión, dimensionamiento de equipos y performance de funcionamiento.

# **CAPITULO I**

## **CONSIDERACIONES DE TECNOLOGIA DE TRANSMISION**

### **1.1 Introducción**

La empresa PETROPERU S.A. - OPERACIONES OLEODUCTO, se encarga de realizar el bombeo de petróleo, en el Oleoducto Norperuano, desde los campos de producción en la selva Norte amazónica, hacia el terminal de despacho marítimo Bayóvar, en la ensenada de Sechura. Esta empresa tiene su oficina principal en la ciudad de Piura, en donde se llevan a cabo las funciones de dirección y administración de sus operaciones. El Oleoducto se compone de 8 estaciones de bombeo y de la Terminal Bayóvar, las cuales, excepto una, estación Morona, disponen de sendas estaciones terrenas de comunicación vía satélite para su enlace con la oficina principal en Piura.

La estación terrena vía satélite del terminal Bayóvar, fue instalada en 1998. Con anterioridad, desde 1991 hasta 1998, funcionó entre Terminal Bayóvar y las oficinas de Piura un radioenlace UHF analógico, de salto único, en banda de 400 MHz, cursando comunicaciones telefónicas y de datos. El reemplazo de este radioenlace por el enlace vía satélite, en 1998, fue por razón de obsolescencia tecnológica de los equipos UHF analógicos. La elección del medio de transmisión vía satélite, obedeció al aprovechamiento de una estación terrena que la empresa disponía, sin uso, en sus

oficinas de Lima.

La alternativa de reemplazo del radioenlace UHF analógico por otro de tecnología digital, esbozada en esa oportunidad con conocimiento limitado de las condiciones de radiopropagación, fue desestimada debido a que los fondos para inversión disponibles, resultaban insuficientes. El desconocimiento de una metodología de cálculo segura, para la estimación de la atenuación por difracción, obligaba a elegir alturas de antenas en los extremos del radioenlace, que emularan a las mismas alturas aplicadas en pruebas realizadas. Ello implicaba la instalación de torres con alturas del orden de 136m en Bayovár y de 36m en la azotea de las oficinas de Piura, infraestructuras éstas, cuyo costo excedía las expectativas originales basadas en las alturas de torres que se aplicaron en el radioenlace analógico.

La empresa tiene proyectada la implementación de un Sistema de Control SCADA, que abarcará a todas las estaciones del Oleoducto. Una comprensión de la topología de transmisión existente, y de la problemática operativa en Terminal Bayóvar y Piura, permite afirmar que la eficiencia del futuro sistema de Control SCADA, se vería mejorada, si facilitara acceso a sus funciones de programación y control, tanto desde las oficinas de Piura como desde la estación terminal Bayóvar. Para lograr esta ventaja operativa, será necesario incrementar la capacidad de transmisión entre esos lugares de 128 kbps actual, al valor 256 kbps, de modo de establecer un canal de datos adicional a 64 kbps, para interconexión de redes LAN dedicadas al Control SCADA, que funcionarían en Piura y en Bayóvar.

En la actualidad, año 2001, la empresa proyecta reubicar la estación

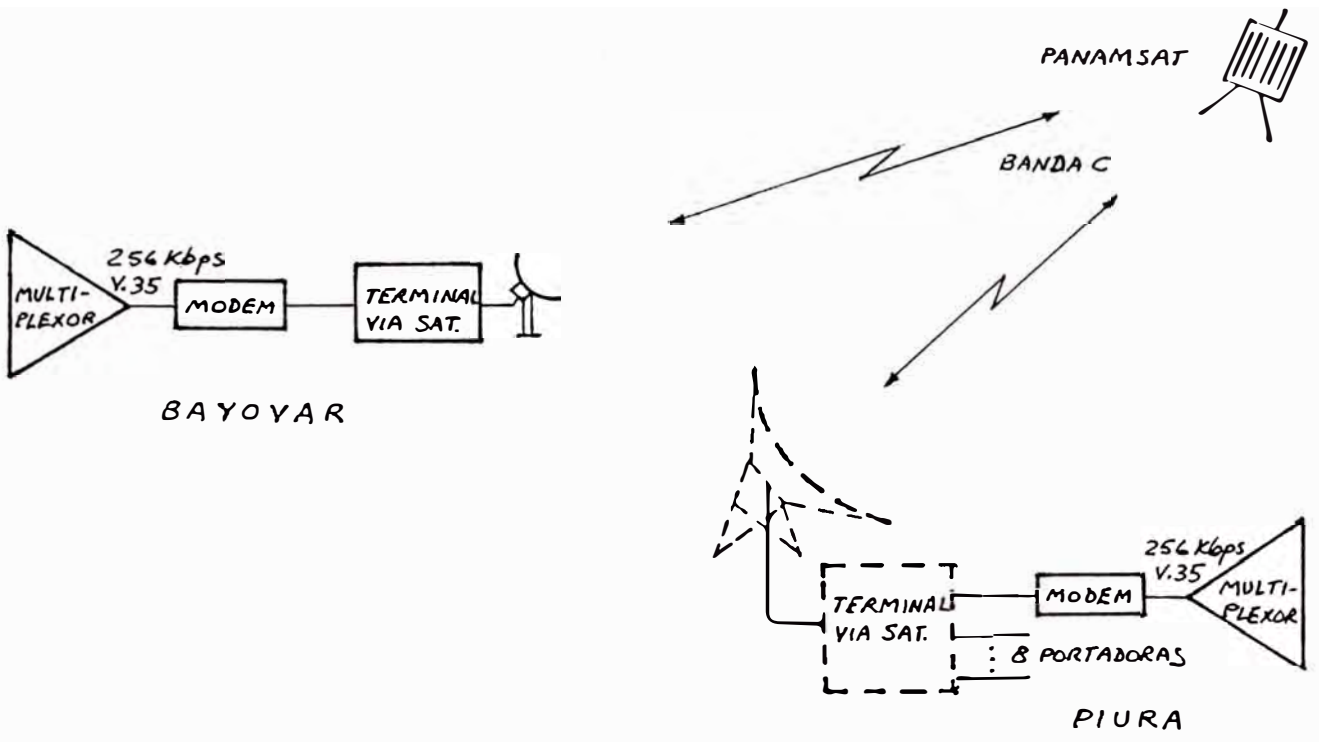
terrena vía satélite de Terminal Bayóvar, hacia la estación Morona, en la selva peruana, con miras a desplazar un enlace UHF analógico en banda de 400 MHz, que opera entre esta estación y la estación N° 5, para soporte de sus comunicaciones. En reemplazo del enlace vía satélite Bayóvar - Piura, se está considerando la contratación de servicio de transmisión de datos, punto a punto, terrestre, a la empresa TELEFONICA DEL PERU. Este servicio se daría mediante varios saltos de radiocomunicación.

Sirvan estos antecedentes para enfocar, seguidamente, la comparación técnico-económica de la instalación de un radioenlace UHF digital, de un solo salto, Bayóvar - Piura, respecto del enlace vía satélite y del alquiler de servicio de transmisión de datos, mencionados.

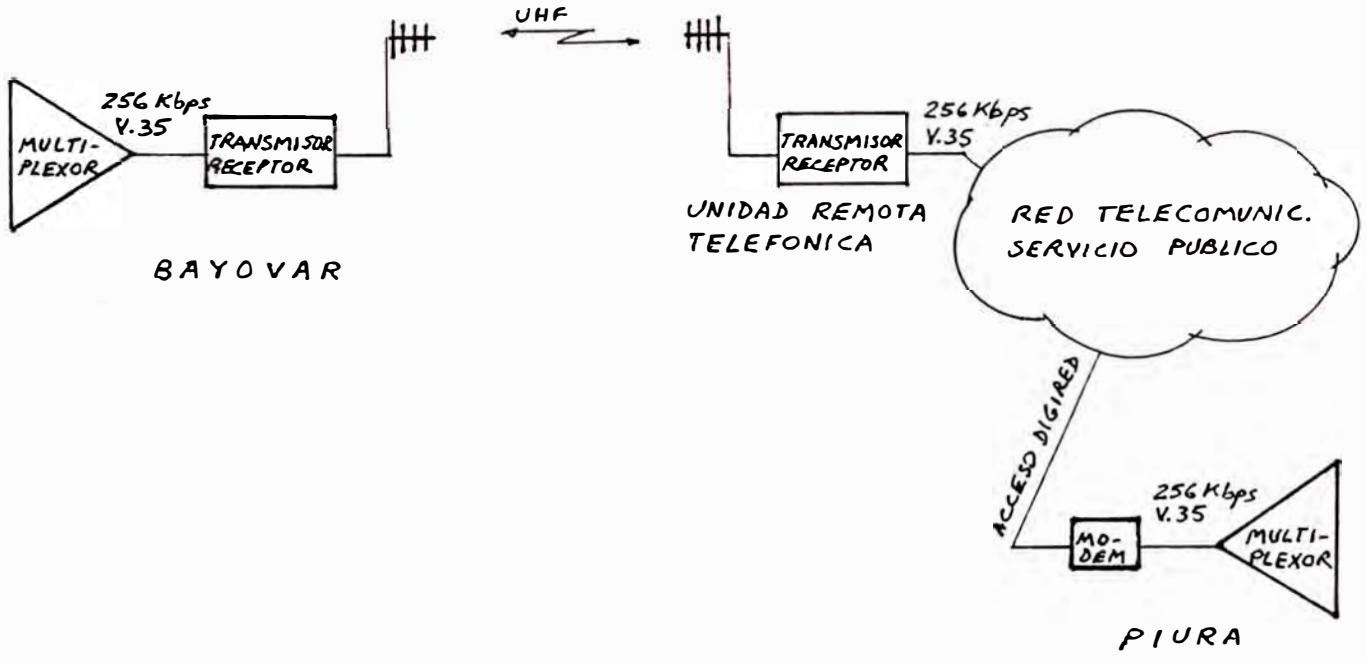
## **1.2 Vía Satélite**

El enlace vía satélite Bayóvar - Piura, opera en la actualidad con portadora de velocidad 128 kbps, en el sistema de satélites PAS de PANAMSAT. La estación terrena en Bayóvar, corresponde al standard E1 de INTELSAT, y se compone de los siguientes equipos:

- Antena con reflector parabólico de aluminio, de 3.5m de diámetro.
- Un terminal de satélite digital, que integra al amplificador de potencia HPA, de 5 watts, junto con los equipos convertidores de subida y de bajada.
- Un amplificador de bajo ruido LNA, con temperatura de ruido de 45° K.
- Un modem satelital, con velocidad de operación programada en 128 Kbps, modulación QPSK y técnica de corrección de errores FEC.
- Un multiplexor de voz y datos, equipado para 4 canales de voz, un canal de datos asincrónico a 9.6 kbps, y otro de datos sincrónico a 64 kbps.



a) Vía Satélite



b) Servicio de Transmisión

Figura Nº 1 - Configuración de alternativas de Transmisión Bayóvar – Piura

Asumimos que los equipos multiplexores y modems, pueden ser programados para operar con la nueva velocidad de portadora de 256 kbps, requerida para el enlace Bayóvar - Piura. En la Figura N° 1 a), se describe la configuración de equipos de transmisión prevista para esta alternativa.

La alternativa de continuación de la operación del enlace vía satélite, debe tomar en cuenta que sus equipos conformantes datan de 1994 como año de fabricación. Asignando una vida útil de 12 años para equipos de telecomunicaciones en general, consideramos que en 5 años más sus equipos electrónicos deberán ser reemplazados por otros de tecnología actual. En la Tabla N° 1 se detalla el costo estimado del reemplazo, que ascienden a US\$ 61,000 a ser desembolsados en el año 2006. Los costos de mantenimiento se estiman en US\$ 2,000 anuales, y el costo de alquiler del transpondedor satelital, para portadora de 256 kbps, en US \$ 4,267 mensuales, equivalente a US \$ 51,204 anuales.

Cabe mencionar que el costo de alquiler de transpondedor satelital indicado, corresponde a la tasa mensual aproximada de US \$ 1067 por portadora de 64 kbps, que la empresa PETROPERU S.A. tiene pactada con PANAMSAT, desde 1993. En la actualidad, desde 1994, TELEFONICA DEL PERU es la autorizada para brindar el servicio de transmisión vía satélite en Perú, y su tarifa mensual por portadora de 64 kbps, es sustancialmente mayor que la indicada.

Tabla N° 1 .- Datos Económicos del Enlace Vía Satélite Bayóvar - Piura

ITEM	CONCEPTO	VALOR US \$
1	REEMPLAZO DE EQUIPOS EN AÑO 2006 - 1 Terminal radiofrecuencia \$25,000 incluye LNA - 2 Modem 256 kbps 18,000 - 2 multiplexores voz/datos 18,000	61,000
2	MANTENIMIENTO ANUAL	2,000
3	ALQUILER ANUAL DE TRANSPONDEDOR (Tasa \$4,267 mensual)	51,204

### 1.3 Servicio de Transmisión de Datos

Para el análisis de esta alternativa, consideramos que el establecimiento de este servicio, a cargo de la empresa TELEFONICA DEL PERU S.A., será a través de su infraestructura terrestre de transmisión de larga distancia, aplicando enlaces por conductores de cobre, microondas, UHF o fibra óptica.

Las oficinas de Piura serán conectadas al servicio DIGIRED, para acceso al nodo existente de TELEFONICA en esa ciudad, mediante modems para transmisión por líneas telefónicas dedicadas. La portadora de 256 kbps que se establecerá, será enrutada por enlace de microondas o UHF del servicio público, hacia una localidad cercana al puerto de Bayóvar. La portadora se conectará finalmente a un radioenlace VHF o UHF, que se instalará entre la Unidad Remota de TELEFONICA y la estación Terminal Bayóvar. La antena y equipos UHF se instalarán en el edificio de control del Terminal Bayóvar, donde se conectarán los servicios de comunicación de voz y datos.

Tabla N° 2 .- Datos Económicos del Servicio de Transmisión de Datos Bayóvar - Piura, a ser brindado por TELEFONICA DEL PERU

ITEM	CONCEPTO	VALOR US \$
1	<b>INVERSION EQUIPOS RADIOENLACE BAYOVAR</b> - 2 transmisores-receptores \$ 16,000 - 2 antenas Yagi 1,500 - Cable coaxial 1/2" 1,000 - 1 Multiplexor(voz/datos) 12,000 - 2 UPS 500 watts, 4 horas 1,000 - Instalación 7,000	38,500
2	<b>INVERSION MULTIPLEXOR PIURA</b>	12,000
3	<b>PAGO INICIAL LICENCIA OPERACION</b>	250
4	<b>PAGO INICIAL DIGIRED</b> - Acceso a la red Piura \$ 1,000 - Instalacion puerto Piura 300 - Instalación puerto remoto 300	1,600
5	<b>CANON ESPECTRO RADIOELECTRICO, ANUAL</b> - 2 estación-frecuencias de 200kHz separación canal, equivalente a 8 canales de 25kHz.	824
6	<b>MANTENIMIENTO DE RADIOENLACE Y MULTIPLEXOR, ANUAL</b>	1,500
7	<b>SUSCRIPCION DIGIRED ANUAL</b> - Puerto Piura a 256kbps \$ 4,800 (tasa \$400 mensual) - Puerto remoto a 256kbps 4,800 (tasa \$400 mensual)	9,600
8	<b>SERVICIO LARGA DISTANCIA ANUAL PIURA-UNIDAD REMOTA A 256KBPS (tasa \$1,000 mensual)</b>	12,000



El esquema descrito, e ilustrado en la Figura N° 1b), es el usualmente ofertado por la mencionada empresa, para clientes empresariales. El radioenlace de salto final hacia Bayóvar, y el multiplexor digital que se instalará en Piura, deberán ser directamente adquiridos por PETROPERU S.A., pues serán para su uso exclusivo; su valor se considera como egreso al inicio del servicio. En la Tabla N° 2, se presentan los costos involucrados en esta alternativa.

#### **1.4 Radioenlace UHF Directo**

El diseño del radioenlace Bayóvar - Piura de salto único, implica considerar condición de radiopropagación por difracción, debido a la distancia superior a 80 km entre Piura y Bayóvar. La metodología desarrollada en el presente estudio, ha permitido definir el equipamiento necesario para obtener performance adecuada en el radioenlace. Se descarta por lo tanto, la aplicación de una estación repetidora, pues ello, obviamente provocaría aumento innecesario del valor de inversión del proyecto.

La definición técnica del radioenlace directo Bayóvar- Piura, se ve favorecida además, por el avance tecnológico logrado en equipos transmisores-receptores digitales de baja capacidad, fabricados desde 1995. La extensión de la velocidad de transmisión, hasta llegar a 768 Kbps, en ancho de banda de 200 kHz, y con umbral de recepción en el orden de -92 dBm, son características muy ventajosas en la interconexión de redes de cómputo, bajo condiciones difíciles de propagación. Por ello, estos equipos constituyen recurso altamente apreciado en las operaciones productivas y de negocios en general.

Los siguientes requerimientos operativos, han sido identificados, para la implementación del radioenlace digital Bayóvar - Piura:

- Operación en la banda de frecuencias de 400 MHz, que originalmente tuvo asignado. Ello, además de facilitar el proceso de renovación de licencia de operación ante el Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción, permitirá reutilizar la infraestructura de antenas y cables coaxiales, aplicada en el funcionamiento del radioenlace analógico original.
- Capacidad de transmisión de 256 kbps, para permitir la asignación de tres canales de interconexión de redes de computadoras LAN, en velocidad de 64 kbps, entre las operaciones de Piura y Bayóvar. Uno de los canales se asignará a tráfico de oficinas, y los otros dos, principal y respaldo, a la extensión hacia Piura, de las aplicaciones del futuro centro de control del Oleoducto Norperuano, que operará en el terminal Bayóvar. La capacidad restante podrá asignarse a comunicaciones telefónicas y datos asíncronicos.
- Configuración redundante para los equipos radiotransmisores y multiplexores digitales, de modo de asegurar alta disponibilidad al medio de transmisión, relativa a la aplicación de automatización SCADA.
- Instalación de torre de altura no mayor que 25m, sobre la azotea, o nivel de cuarto piso, del edificio donde funcionan las oficinas de la empresa PETROPERU S.A. - Operaciones Oleoducto, en Piura. Este requerimiento apunta a limitar al mínimo indispensable, la infraestructura en las oficinas de Piura, considerando que la mencionada empresa ocupa el inmueble en calidad de inquilina.

La configuración de sistema del Radioenlace Digital Bayóvar - Piura, está descrita en la Figura N° 23, del Capítulo IV. Los datos económicos, están listados en la Tabla N° 3. Para efectos de comparación con las alternativas descritas en los apartados anteriores, bajo igual nivel de disponibilidad de equipos, la inversión indicada en esta tabla, se refiere a configuración no redundante, 1+0, para los equipos de radiotransmisión.

La inversión inicial asciende al valor de US \$ 78,550, que ha sido estimado considerando el uso de la siguiente infraestructura que PETROPERU S.A. tiene disponible, producto de la desactivación de una red UHF, que funcionó hasta 1994:

- Antenas de reflector de rejilla parabólica, de 15 y 10 pies de diámetro.
- Cables coaxiales de 7/8" y de 1 5/8" a ser instalados en los terminales del radioenlace, Bayóvar y Piura.
- Rectificador-cargador de baterías 220 VAC a 24 VDC, en la caseta de equipos de la estación terminal UHF Bayóvar.
- Torre autosoportada de 70m de altura, a ser instalada en terminal Bayóvar, en reemplazo de la existente de 48.7m de altura.
- Torre ventada de 25m de altura, a ser instalada en la azotea del edificio donde funciona la empresa en Piura.

Los costos de mantenimiento estimados serán de US \$ 1,500 anuales, y los de canon por uso del espectro radioeléctrico serán de US \$ 824 anuales.

Tabla N° 3 .- Datos Económicos del Radioenlace UHF Directo

ITEM	CONCEPTO	VALOR US \$
1	<b>INVERSION EQUIPOS ELECTRONICOS (1+0)</b> - 2 Transmisores-receptores \$ 16,000 - 2 Amplificadores 40 watts 3,500 - 2 Multiplexores voz/datos 24,000 - 2 Modems HDSL 4,000 - 1 UPS 1.5 kw, 4 horas 3,500 - 1 UPS 500 w, 4 horas 1,000 - 1 banco baterías 24V,250A 3,000 - Instalación 10,000	65,000
2	<b>INVERSION MONTAJE INFRAESTRUCTURA</b> - Torre 70m autosoportada \$ 10,000 - Torre 25m ventada 1,750 - Antenas 15'φ y 10'φ 1,000 - Cables coaxiales 500	13,250
3	<b>PAGO INICIAL LICENCIA OPERACION</b>	300
4	<b>CANON ESPECTRO RADIOELECTRICO, ANUAL</b> - 2 estación-frecuencias , 200kHz separación canal, equivalente a 8 canales de 25kHz.	824
5	<b>MANTENIMIENTO ANUAL</b>	1,500

Para efectos de comparación económica de las alternativas descritas, en base a los datos de las tablas N° 1, N° 2 y N° 3, en la Tabla N° 4, se ha elaborado el flujo de caja que produce cada una de ellas, durante el período de 12 años de ejercicio, asumido como vida útil de equipos de Telecomunicaciones, limitada ésta por obsolescencia. En la alternativa Vía Satélite, en el

año 2006, al costo de 'alquiler anual se ha agregado el valor de reemplazo de los equipos, al cumplimiento de su vida útil. Asimismo, en el año 2013, al costo de alquiler anual se le ha restado el valor que tendrán los equipos, 5 años antes de su total depreciación.

Se ha efectuado el cálculo del valor actual para las alternativas presentadas, a la tasa de descuento de 12%, aplicable en proyectos de inversión. Los resultados, mostrados en la última fila de la Tabla N° 4, definen a la alternativa de Radioenlace UHF directo, como la más conveniente, con valor actual de US \$ 92,946.

Tabla N° 4 .- Flujo de Caja y Valor Actual de las Alternativas de Transmisión entre Piura y Bayóvar. (US \$)

AÑO	VIA SATELITE	SERVICIO DE TRANSMISION	RADIOENLACE UHF DIRECTO
2002	53,204	52,350 + 23,924	78,550 + 2,324
2003	53,204	23,924	2,324
2004	53,204	23,924	2,324
2005	53,204	23,924	2,324
2006	53,204 + 61,000	23,924	2,324
2007	53,204	23,924	2,324
2008	53,204	23,924	2,324
2009	53,204	23,924	2,324
2010	53,204	23,924	2,324
2011	53,204	23,924	2,324
2012	53,204	23,924	2,324
2013	53,204 - 25,416	23,924	2,324
<b>VALOR ACTUAL</b>	<b>206,772</b>	<b>200,545</b>	<b>92,946</b>

## CAPITULO II

### RADIOPROPAGACION POR LINEA DE VISTA CASI RASANTE

#### 2.1 Introducción

La propagación electromagnética en el espacio libre, se entiende como ondas emitidas desde una antena, que viajan por el espacio vacío sin límites o contornos. La transmisión de energía puede representarse como trayectorias, llamadas rayos, que son líneas rectas, normales a superficies donde el campo eléctrico tiene instantánea-mente igual valor vectorial. Al propagarse la energía en espacio libre, sólo una fracción de la potencia entregada a una antena isotrópica, será recibida por otra similar colocada a cierta distancia, según la relación:

$$\frac{P_r}{P_t} = (\lambda/\pi D)^2 \quad ( 1 )$$

$P_t$  = potencia generada en transmisor, watts

$P_r$  = potencia recibida, watts

$\lambda$  = longitud de onda, m

$D$  = distancia entre antenas, m

La inversa de esta relación, expresada en decibeles, se conoce como pérdida de espacio libre:

$$L_{free} = 32.5 + 20\log f + 20\log D \quad ( 2 )$$

$L_{free}$  = pérdida de espacio libre, dB

$f$  = frecuencia de la señal emitida, MHz

$D$  = distancia entre antenas transmisora y receptora, km

Es evidente que la misma fórmula se aplica en cualquier medio uniforme no limitado, si el medio en sí no produce pérdidas. En el caso de transmisión en la atmósfera terrestre, con estratificación lineal del índice de refracción, con respecto a la altura, las ecuaciones de Maxwell predicen también que la atenuación de radiopropagación está dada por la fórmula de espacio libre, (la atenuación por absorción de energía en moléculas de O<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>O, sólo tiene importancia en frecuencias superiores a 10 GHz). El desarrollo matemático además establece que los rayos de propagación electromagnética siguen realmente trayectorias curvilíneas, convexas vistas desde arriba, con radio de curvatura 4 veces mayor que el radio de la superficie terrestre. Para facilidad de análisis del perfil topográfico, se conviene, sin embargo, en representar los rayos como líneas rectas, y en aplicar un incremento de altura  $h$  a las cotas del terreno, igual a la diferencia de alturas entre el rayo real curvo y la tierra curva, dado por la siguiente fórmula, (método de análisis conocido como "Lenkurt", preferido en la referencia [1]),

$$h(k) = \frac{d_1 \times d_2}{12.75 k} \quad (3)$$

$d_1$  = distancia hacia un extremo del enlace, km

$d_2$  = distancia hacia el otro extremo del enlace, km

$k$  = relación del radio de curvatura de tierra ficticia (donde el rayo se representa rectilíneo), al radio de curvatura de la tierra  
= 4/3 (atmósfera standard)

El desarrollo de la teoría de Fresnel, basada en el principio de Huygens, (físico holandés, 1629-1695, su obra "Traite de la Lumiere" data de 1690), establece que para producir intensidad de campo de magnitud comparable a

la de espacio libre, dado por la fórmula ( 2 ), es suficiente considerar la región de espacio limitado por un elipsoide de rotación alrededor del eje de antenas, (una demostración se desarrolla en la referencia [2], pag 13-16). El radio de la sección transversal de tal elipsoide, corresponde al 60% del radio  $F_1$  de la primera zona de Fresnel, dado por:

$$F_1 = 17.3 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot D}} \quad (4)$$

$F_1$ = radio de la primera zona de Fresnel, m  
 $d_1$ = distancia hacia antena emisora, km  
 $d_2$ = distancia hacia antena receptora, km  
 $D$  = distancia total entre antenas, km  
 $f$  = frecuencia, GHz

Cuando la transmisión se establece entre antenas emplazadas sobre la tierra, el trazado del eje de antenas en posición tal, que las elevaciones del terreno no invadan el elipsoide de radio  $0.6F_1$ , es condición que define los llamados enlaces con claridad de espacio libre. Esta definición, adoptada en el presente estudio, toma en cuenta el criterio, basado en el comportamiento físico arriba referido, de que bajo tal condición de claridad sobre los obstáculos, la pérdida por propagación radioeléctrica corresponde a la de espacio libre.

La invasión de las elevaciones del terreno dentro del elipsoide de radio  $0.6F_1$ , es condición que define al radioenlace por difracción o no óptico. En la Figura N° 2 se ilustra el perfil topográfico de un radioenlace por difracción, en el que cuatro elevaciones del terreno, aumentadas en altura  $h$  dada por la fórmula ( 3 ), y señalizadas por la gráfica designada "con  $k=4/3$ ", invaden



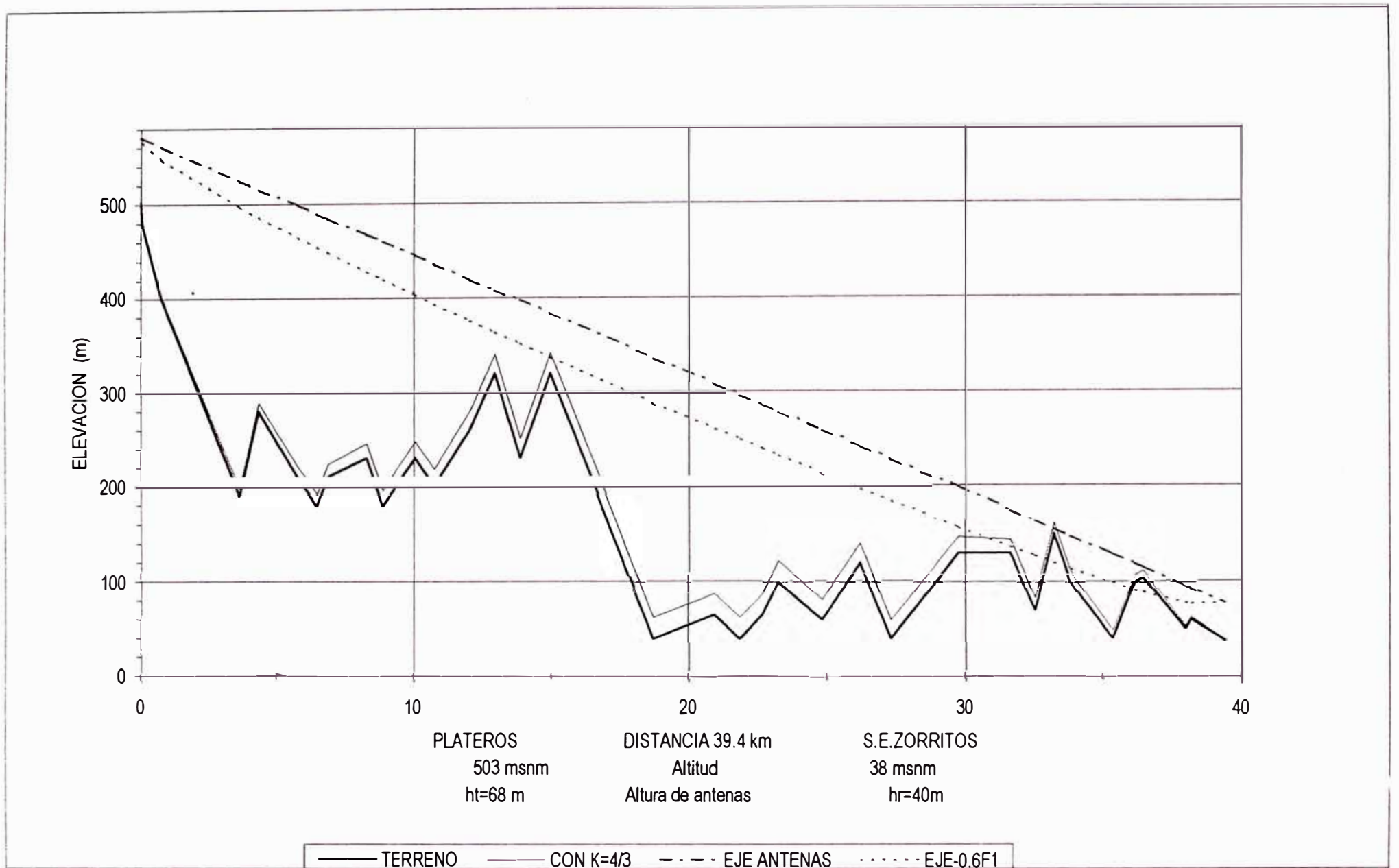


Figura N° 2.- Perfil Topográfico de Radioenlace por Difracción

el elipsoide que limita la zona de claridad de espacio libre, graficado con designación "Eje- $0.6F_1$ " en la leyenda. Una de las elevaciones llega incluso a sobrepasar el eje de antenas. Se define la claridad del enlace  $F$  en cada punto, como la diferencia en altura entre el eje de antenas y la cota aumentada del terreno. Los obstáculos ubicados debajo del eje de antenas tienen claridad positiva, y aquellos ubicados por encima la tienen negativa. Los obstáculos que se ubican precisamente en el eje de antenas tienen claridad rasante "grazing", de valor cero. El cociente  $F/F_1$ , claridad dividida entre radio de la primera zona de Fresnel, define la claridad relativa en cada punto del enlace.

Para referencia, el enlace de la Figura N° 2 , en la distancia 33.3 km, presenta claridad  $F = -5\text{m}$ , y el radio de la primera zona de Fresnel, para frecuencia de 450 MHz es  $F_1 = 58.55\text{m}$ . La claridad relativa en ese punto es  $F/F_1 = -5/58.55 = -0.0853$ . Asimismo, en la distancia 36.5 km, y para la misma frecuencia, la claridad relativa es  $F/F_1 = 5/42.27 = 0.118$ .

Ambos obstáculos tienen claridad casi rasante, el primero por encima, y el segundo por debajo del eje de antenas.

En el enlace por difracción, la pérdida por propagación radioeléctrica resulta mayor que la de espacio libre. El nivel de señal recibida se obtiene aplicando al valor de propagación en espacio libre, una atenuación por difracción que debe calcularse. Referencialmente, para el enlace mostrado en la Figura N° 2 , la atenuación por difracción, debida a 4 obstáculos reconocibles, donde la claridad relativa,  $F/F_1 < 0.6$ , se ha estimado en 10 dB.

La metodología de cálculo de la pérdida de propagación en radioenlace

por difracción o no óptico, puede también desarrollarse en base a la teoría de Fresnel, mencionada. Sin embargo, la complejidad matemática de tal desarrollo, que debe afrontarse para cada condición particular de perfil topográfico, conduce a la necesidad de aplicar fórmulas aproximativas, además de gráficos o nomogramas.

El fenómeno de difracción, faculta la propagación de energía Electromagnética, por detrás de un obstáculo de claridad negativa, dentro de una estrecha cuña, con intensidad progresivamente decreciente respecto del ángulo vertical tendido entre el rayo tangente al obstáculo, y la dirección en que se posicione el receptor por detrás del obstáculo. Esta particularidad, resulta del desarrollo de las ecuaciones de Maxwell, bajo condiciones de contorno, en las que no es válido aplicar el modelo de rayos indicadores de dirección de avance de la energía.

De manera análoga al comportamiento de la luz, debido a la difracción, la "sombra" de energía electromagnética, producida detrás de un obstáculo topográfico, presenta borde "difuso", en donde la detección de energía es aprovechable para las radiocomunicaciones. La facilidad de penetración de la energía en la zona de difracción, depende de diversos factores, siendo de importancia anotar que conforme disminuye la longitud de onda, la "sombra" proyectada por el abultamiento del terreno, en la dirección del rayo tangente, se hace más nítidamente definida. En otras palabras, conforme la longitud de onda disminuye, la intensidad de la energía se atenúa más rápidamente respecto del ángulo vertical de propagación por debajo del rayo tangente al obstáculo.

## 2.2 Ruta del Radioenlace

El radioenlace Bayóvar - Piura, materia del presente estudio, se proyecta entre las oficinas de la empresa PETROPERU S.A. OPERACIONES OLEODUCTO, sito en calle Huánuco No 220, Piura, y la estación terminal del Oleoducto Nor Peruano en Bayóvar. En la Figura N° 3, se presenta la Reseña Geográfica del Radioenlace Piura-Bayóvar, donde para mayor especificación se designan sus sitios terminales como "Piura" y "Bayóvar", los que tienen las siguientes coordenadas.

Piura : S 05° 11' 28"

W 80° 37' 26"

47 m.s.n.m.

Bayóvar : S 05° 48' 12"

W 81° 03' 55"

160 m.s.n.m.

El terminal Bayóvar se ubica en la playa de tanques de almacenamiento de petróleo, sobre explanada del macizo de Illescas, a 2km del muelle de carga de petróleo en Punta Bapo, en la bahía de Sechura. En este lugar existe torre autosoportada de 48.7m de altura, apta para el montaje de antena.

El terminal Piura se ubica en la azotea, nivel de cuarto piso, del edificio donde funciona PETROPERU S.A., donde es factible construir la torre requerida para el montaje de antena. Los sitios terminales del radioenlace, están reconocidos como estaciones de radiocomunicación UHF existentes, que en el pasado establecían enlace analógico en la misma ruta Bayovar - Piura materia del Estudio. Estos sitios están comprendidos dentro de centros operativos de la empresa, con facilidades de energía, caseta para

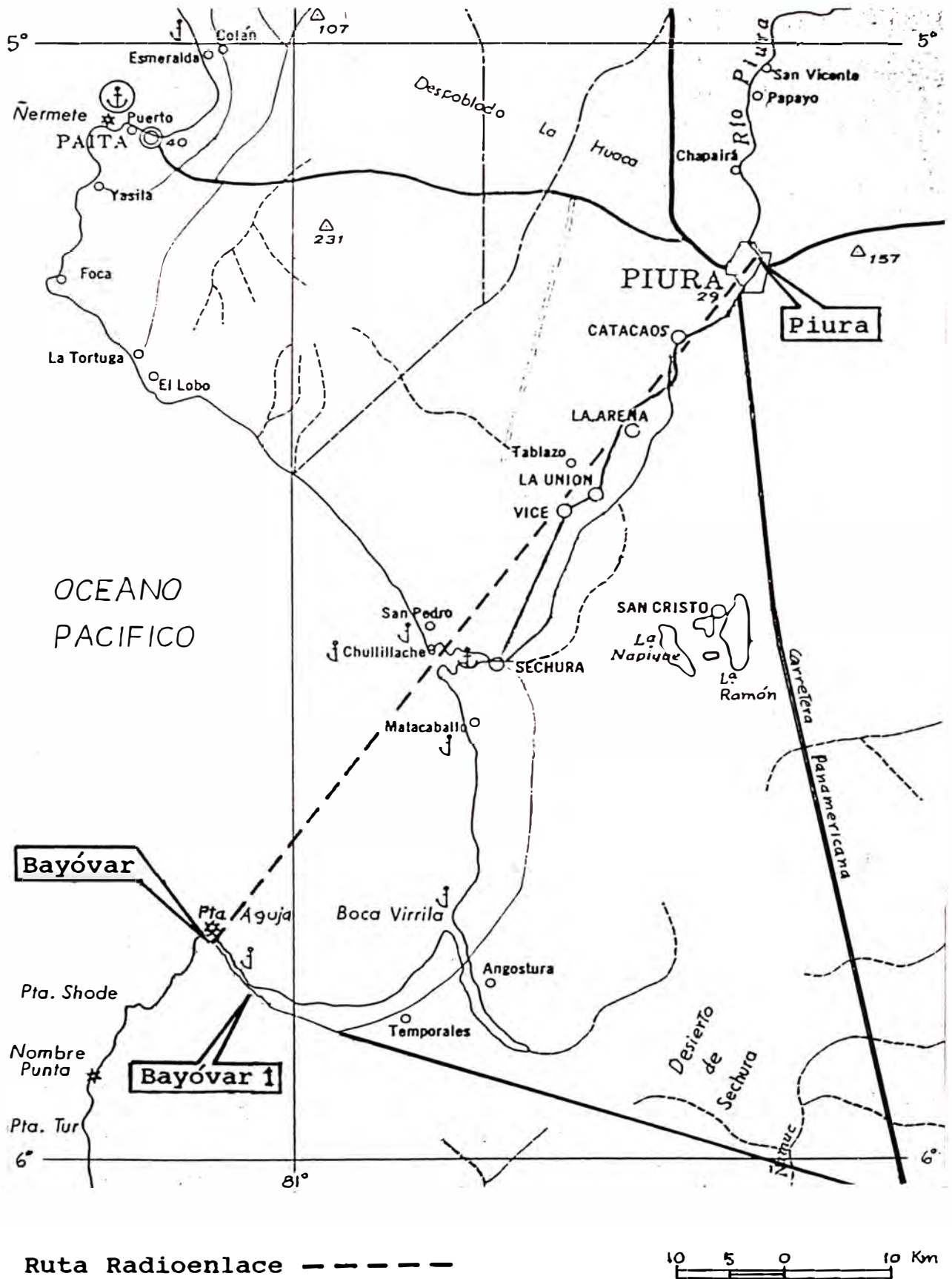


Figura No 3

Reseña Geográfica del Radioenlace Piura - Bayóvar

alojamiento de los equipos, y pares telefónicos para enlace de las señales de servicio hacia los equipos de telefonía, datos y SCADA de usuario final.

El radioenlace cubre la distancia total de 83.55 km. Los primeros 34 km, saliendo de Bayóvar, se desarrollan sobre el Océano Pacífico hasta las inmediaciones de Sechura. Sigue luego una zona desértica de aproximadamente 26 km, y después la zona agrícola del valle bajo del río Piura que se extiende desde La Unión hasta Piura cubriendo los últimos 24 km.

La región presenta temperatura ambiental en el rango de 16° C en invierno, a 34° C en verano, y está surcada por vientos moderados durante todo el año, lo cual indicaría alta probabilidad de existencia de atmósfera estándar. Se asume por ello, que la curvatura del haz radioeléctrico, corresponde a valor de  $k = 4/3$ .

### **2.3 Apreciación de Obstrucciones**

En la Figura N° 4 , se presenta el perfil topográfico del enlace Bayovar - Piura. La gráfica incluye las cotas del terreno tomadas de las cartas geográficas. Adicionalmente están graficadas las cotas del terreno aumentadas en la elevación  $h$  obtenida de la fórmula ( 3 ), para  $k=4/3$ , indicativas de la curvatura ficticia de la tierra, para trazado de rayos en línea recta. Para mayor detalle en el análisis de la claridad relativa, en el Anexo se presentan los datos numéricos del perfil graficado.

La posición de antenas en cada extremo de la gráfica, refleja el montaje real que tuvieron cuando el radioenlace funcionó en su modalidad analógica desde 1991 hasta 1998. En el extremo de Bayóvar, donde se dispone de torre autosoportada de 48.7m de altura; la antena con reflector de rejilla

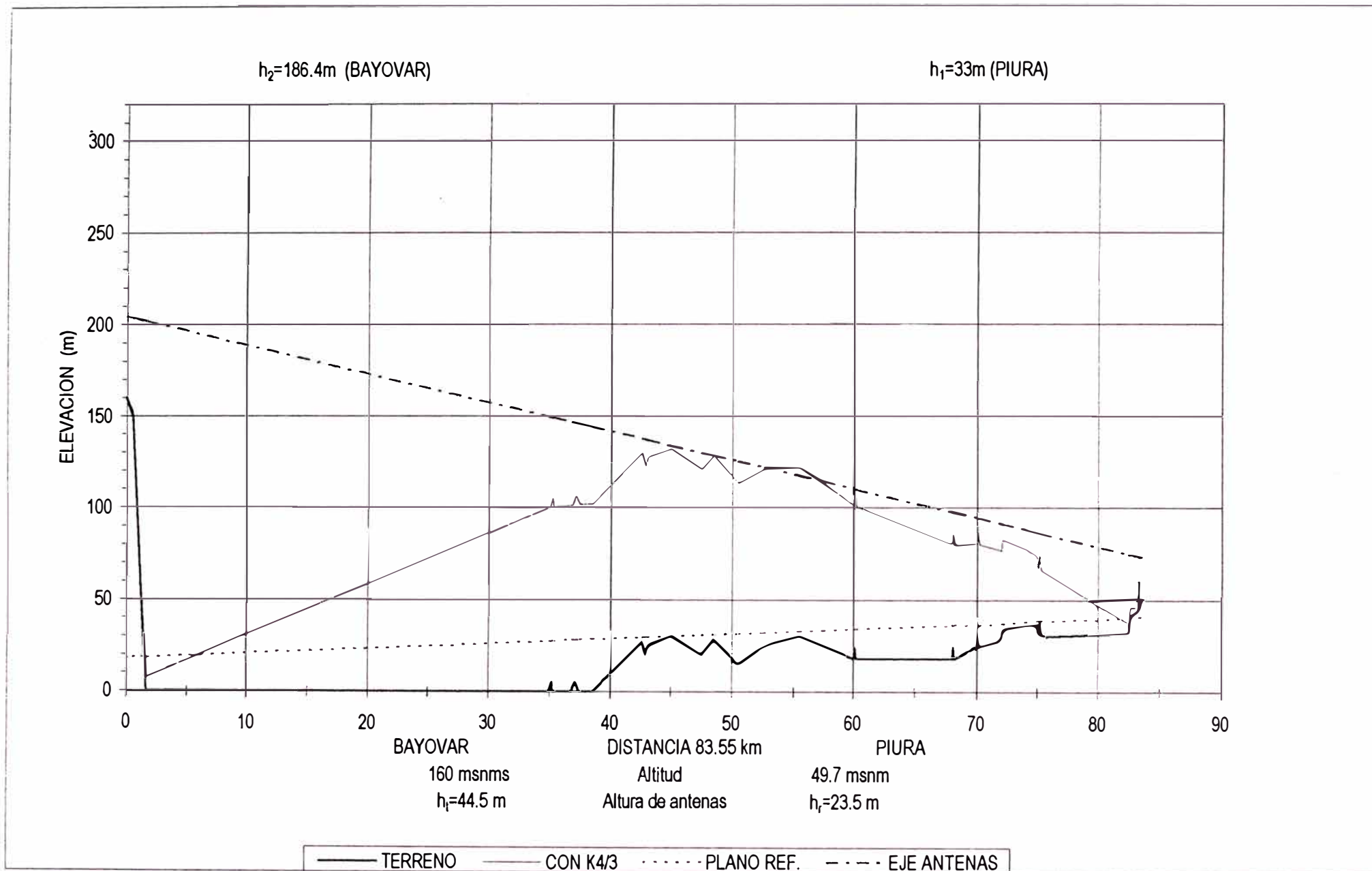


Figura N° 4.- Perfil Topográfico del Radioenlace Analógico Bayóvar-Piura

parabólica de 15 pies de diámetro, estuvo montada a 44.5m sobre el suelo. En el extremo de Piura se construyó una torre arriostrada de 25m sobre el nivel del quinto piso de un edificio contiguo al ocupado por la empresa PETROPERU S.A. La antena con reflector de rejilla parabólica de 10 pies de diámetro, estuvo montada a 23.5m sobre el nivel del mencionado quinto piso.

El enlace comprende un 40% de recorrido sobre el mar, desde la salida del extremo de Bayóvar hasta la distancia de 35 km. La considerable diferencia de alturas, de 131.3m, que existe entre las alturas de antenas en los terminales, y la cercanía del mar al terminal de mayor elevación, correspondiente a Bayóvar, permiten deducir a simple vista, que las reflexiones producidas sobre la superficie marina, siguen trayectorias que no enlazan a las antenas. Por lo tanto, las reflexiones en el mar no tienen influencia sobre la señal de trayectoria "directa" detectada en recepción. Por otro lado, la geometría del enlace para  $k=\infty$ , sitúa al punto de reflexión, sobre terreno con árboles y casas, en las inmediaciones de Catacaos. En general, la incidencia casi rasante del rayo sobre el terreno, para cualquier valor de  $k$ , determina precisamente la presencia de difracción, donde no funciona la óptica de rayos. Se descarta por lo tanto, la producción de reflexiones interferentes.

Un primer tramo del recorrido, que va desde la distancia 0km hasta 30km, saliendo de Bayóvar, está libre de obstáculos en el espacio comprendido por el 60% de la primera zona de Fresnel. Esta calidad, corresponde a la caracterizada como criterio de claridad de espacio libre, en el apartado 2.1, anterior.



Entre las distancias 30 km hasta 45 km, el enlace incluye zona de obstrucción, de no cumplimiento del criterio de claridad de espacio libre, donde la invasión del abultamiento del terreno en la primera zona de Fresnel se hace progresivamente mayor.

El recorrido restante es sobre terreno predominantemente llano, con ondulación leve. Debido a la distancia del salto, sin embargo, el incremento de elevación del terreno que simula la curvatura efectiva del haz radioeléctrico, obtenido según la fórmula ( 3 ), ocasiona que el eje entre antenas tenga un recorrido rasante al terreno, entre las distancias de 45 km a 65 km, lo que define claridad  $F/F_1 \approx 0$ . Entre las distancias 65 km a 80 km, el terreno invade parcialmente a la primera zona de Fresnel. Y desde 80 Km hasta el extremo de Piura, el enlace presenta claridad de espacio libre. En este tramo, el eje de antenas sobrepasa, con claridad relativa 0.75, al obstáculo más prominente, constituido por la cúpula de la catedral de Piura, posicionada en la distancia 83.31 km, y con altitud 62 m.s.n.m.

Tabla Nº 5 .- Porcentajes de Recorrido según Calidad de Obstrucciones, en Enlace Piura - Bayóvar

CALIDAD	RANGO DE DISTANCIA (km)					TOTAL
	0-35	30-45	45-65	65-80	80-84	
ESPACIO LIBRE	36%	-	-	-	4%	40%
OBSTRUIDO $0 < F/F_1 < 0.6$	-	18%	-	18%	-	36%
OBSTRUIDO $F \approx 0$	-	-	24%	-	-	24%

En la Tabla N° 5 , se resume la calidad de obstrucciones presentadas en el recorrido del enlace, ya descritas. La leve ondulación del terreno, del orden de  $\pm 10\text{m}$ , respecto de la altitud promedio de  $20\text{m.s.n.m.}$ , no faculta tomar en cuenta alguna elevación del terreno en particular, como obstáculo de difracción, sino que más bien toda la extensión del terreno comprendido entre las distancias de  $30\text{km}$  y  $80\text{km}$ , considerada como esfera uniforme, es la causante de la difracción.

La caracterización general del enlace corresponde entonces a rayo rasante sobre tierra esférica. Para efectos de la determinación de la atenuación por difracción, el perfil del terreno puede representarse como una línea recta determinada por las dos cotas más elevadas del perfil real. Se simula así, una condición en la que la atenuación sería aproximadamente igual pero nunca menor que la experimentada realmente. Tal línea recta está graficada en la Figura N° 4 , con designación de leyenda "PLANO REF.". Para el cálculo de la atenuación por difracción además, procede considerar las alturas de antenas, referidas al plano de referencia así definido, según se describe más adelante, en el apartado 2.5.2.2.

El criterio expuesto en el párrafo anterior da como resultado una esquematización de la condición de difracción en el enlace, definida por la transmisión entre dos antenas posicionadas en las alturas indicadas, sobre perfil topográfico plano, o más propiamente sobre tierra esférica, considerando la curvatura relativa del haz radioeléctrico respecto de la curvatura real de la tierra. Este criterio es el aplicado por la metodología de Bullington, como se verá en el apartado 2.5.2.2.

## 2.4 Teoría de Difracción

Se presenta a continuación la base matemática conceptual, que sustenta el análisis de la propagación de ondas electromagnéticas, bajo la condición de difracción definida en la Introducción del presente capítulo. La investigación física del problema, por diversos autores, ha adoptado por lo general, uno de los dos enfoques presentados: el riguroso basado en el desarrollo de las ecuaciones de Maxwell, o el de aproximación cuantitativa de la integral de Fresnel. Ambos enfoques implican compleja elaboración matemática, orientada a encontrar soluciones compatibles con las condiciones de contorno particulares impuestas por el tipo de obstrucción en el enlace. Aunque la obtención de resultados es a veces impracticable con estos métodos, conocidos como de "óptica física", su presentación aquí, con carácter referencial, cumple con revisar la base científica, que ha dado lugar a los métodos de estimación de la atenuación por difracción, con el objeto de afianzar criterios en su aplicación al diseño de radioenlaces.

### 2.4.1 Ecuaciones de Maxwell

La propagación de ondas electromagnéticas, a través de los medios reales, se analiza a partir de las ecuaciones desarrolladas por James Maxwell (físico y matemático escocés, 1831-1879). Estas ecuaciones relacionan el campo eléctrico con el magnético, y conducen a la llamada ecuación de onda, (su derivación puede revisarse en la referencia [3]), cuya expresión para el campo eléctrico, tiene como parámetros a la permitividad eléctrica y a la permeabilidad magnética del medio de propagación:

$$\frac{1}{\epsilon\mu} \nabla^2 e = \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (5)$$

$e = e(x,y,z,t)$  = campo eléctrico

$t$  = tiempo

$\epsilon$  = permitividad eléctrica del aire

$\mu$  = permeabilidad magnética del aire

Esta ecuación diferencial corresponde a la onda de propagación del campo eléctrico a través de la atmósfera, con una velocidad  $c_1 = (1/\epsilon\mu)^{1/2}$ .

Por definición del índice de refracción  $n$ , la velocidad se da también por  $c_1 = c/n$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz en el espacio libre. De modo que la ecuación de onda, tiene también la siguiente expresión, referida a los parámetros de velocidad de la luz y de índice de refracción en el aire:

$$\frac{c^2}{n^2} \nabla^2 e = \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (6)$$

$c$  = velocidad de la luz en espacio libre =  $3 \times 10^8$  m/seg

$n$  = índice de refracción del aire  $\approx 1.0003$

Al asumir que el campo eléctrico depende armónicamente del tiempo, con frecuencia angular  $\omega$  constante:

$$e(x,y,z,t) = E(x,y,z)e^{-i\omega t}$$

y sustituyendo esta expresión en ( 6 ), se obtiene la llamada ecuación escalar de onda, de Helmholtz, (en honor de Herman von Helmholtz, físico y matemático alemán, 1821-1894):

$$\nabla^2 E + k^2 n^2 E = 0 \quad (8)$$

$k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ ,  $m^{-1}$  (constante de propagación)

$\omega$  = frecuencia angular =  $2\pi f$ , rad/seg

$\lambda$  = longitud de onda en espacio libre =  $c/f$ , m

El análisis de esta ecuación, orientado a la comprensión de los parámetros que afectan la transmisión de señales en radioenlaces prácticos, fue emprendido por varios investigadores entre 1940 y 1950, lográndose establecer un modelo de radiopropagación en la atmósfera, que predice con suficiente aproximación las mediciones experimentales. Como resultado, se tiene la metodología de óptica geométrica, aplicable a enlaces con claridad de espacio libre, que predice la propagación de ondas a lo largo de rayos con curvatura igual al gradiente del índice de refracción en la atmósfera. Esta base teórica, ha permitido establecer los criterios de diseño actuales, tomando en cuenta el valor del parámetro  $k$ , referido en la Introducción del presente capítulo.

El cálculo del campo eléctrico transmitido por un dipolo, cerca de la tierra, a través de atmósfera estratificada, consiste en obtener una solución apropiada de la ecuación escalar de onda (8), donde  $E$  es la componente vertical (eje  $z$ ) del campo eléctrico, de componentes cero en los ejes  $x$  o  $y$ . En el caso de los radioenlaces con difracción, la obtención de soluciones a la ecuación escalar de onda, conlleva análisis matemático de alta complejidad. Así por ejemplo, las soluciones arribadas, para enlaces rasantes ( $F/F_1=0$ ) sobre tierra esférica, se expresan como series de productos de funciones, las que a su vez deben evaluarse a partir de otros desarrollos en serie, cuyos términos comprenden integrales. Las soluciones se obtienen por aplicación de artificios de aproximación a límites para los parámetros en juego. En la referencia [4], se encuentran desarrolladas soluciones de la ecuación escalar.

### 2.4.2 Aproximación de Fresnel

La teoría de Fresnel surge del principio de Huygens, el cual establece que cualquier elemento de espacio en el recorrido de una onda, puede considerarse como el centro de una onda esférica secundaria, y que el campo de irradiación puede calcularse por la superposición vectorial de todas estas ondas secundarias.

Fresnel derivó una solución cuantitativa de este principio, mediante análisis matemático aproximado, cuya validez se ha comprobado al aplicarse a varios problemas de difracción. Aunque la formulación matemática no es del todo rigurosa, tiene aplicabilidad muy amplia a muchos problemas de propagación de interés práctico.

Para referencia, se exponen los resultados de este enfoque, a la propagación por difracción producida por una superficie plana opaca con borde en línea recta, interpuesta entre dos antenas. Esta configuración de obstrucción es llamada "filo de cuchilla", ("knife edge").

En la Figura N° 5 , se describe el perfil del enlace propuesto, donde el filo S se asume infinito en la dirección perpendicular al eje entre antenas, y con espesor cero. La intensidad de campo E en el punto P, se obtiene por la superposición de las ondas secundarias originadas en emisores distribuidos en el plano vacío que se prolonga por encima del filo S. La formulación matemática se inicia asignando la intensidad de campo  $u_1$ , de la onda recibida en un punto cualquiera M por encima del filo, como valor dependiente de la inversa de la distancia  $r_1$ , y con fase dada por el producto  $kr_1$ , siendo k la constante de propagación. El valor del campo E producido en P,

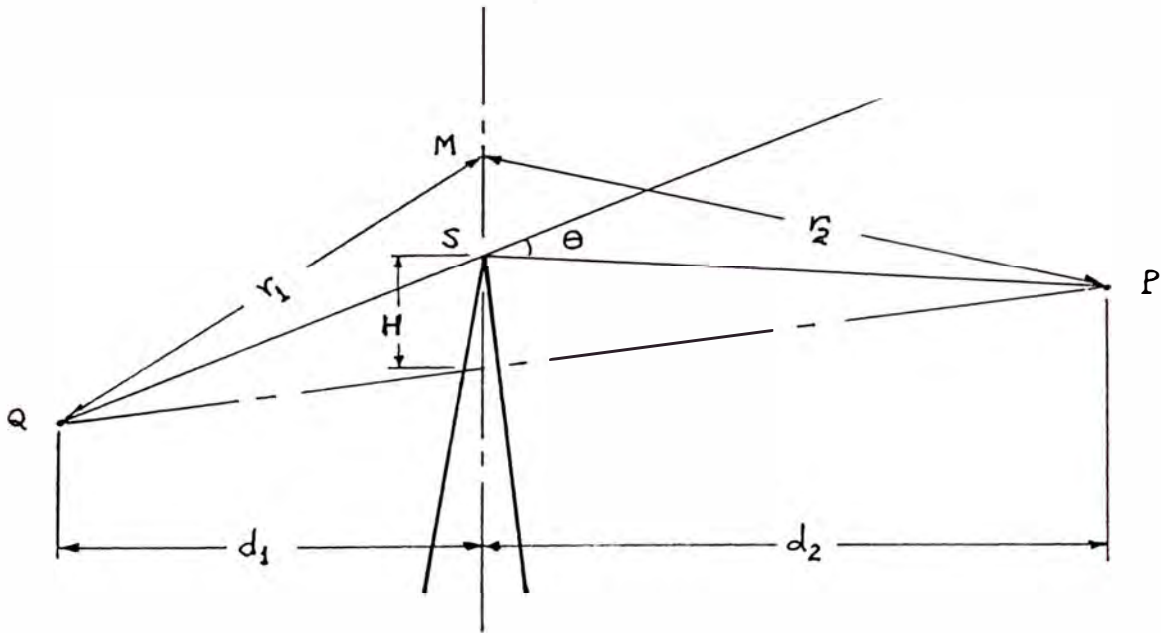


Figura N° 5 .- Geometría de Difracción "Filo de Cuchilla"  
(Fuente: referencia [2])

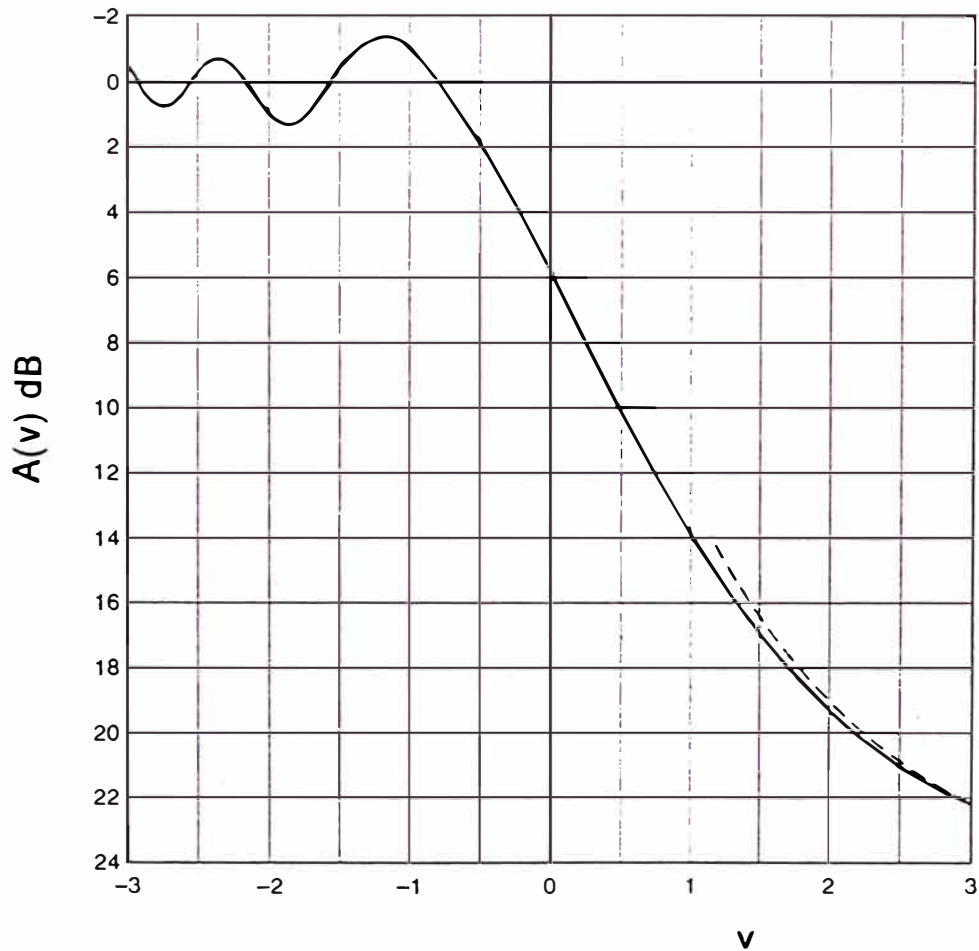


Figura N° 6 .- Función de Atenuación de Fresnel  $A(v)$   
(Fuente: referencia [7])

debido al elemento irradiante en M, se obtiene a su vez, multiplicando al campo  $u_1$  por la inversa de la distancia  $r_2$ , y aplicándole el desfase  $kr_2$ . Luego se plantea la sumatoria de todos los campos producidos en P por los elementos irradiantes secundarios distribuidos en el plano por encima de S, como una integral de superficie.

Al aplicar algunas aproximaciones geométricas, derivadas de que las distancias  $d_1$  y  $d_2$  son mucho mayores que la altura H del filo, y el ángulo de difracción  $\theta$  es pequeño (ver figura N° 5 ), y al efectuar conveniente cambio de variables en la integral, se obtiene la expresión del campo E como el producto del campo resultante de propagación en espacio libre  $E_0$  y una función de atenuación por difracción  $A'(x)$ , o  $A(v)$ :

$$E = E_0 A'(x), \quad A'(x) = \sqrt{i/\pi} \int_x^{\infty} \exp(-it^2) dt \quad (9)$$

$$x = \sqrt{\frac{i/\pi}{\lambda}} \frac{D}{d_1 \cdot d_2} \cdot H = \sqrt{\pi} H/F_1 \quad d_1, d_2 \gg H, \quad (10)$$

La función de atenuación  $A'(x)$ , da lugar a la función  $A(v)$ , al efectuarsele el cambio de variable  $x = \sqrt{\pi/2} v$ . Tal función  $A(v)$  es la forma más conocida para la atenuación por difracción en filo de cuchilla, con la variable  $v$  dada por:

$$v = \sqrt{\frac{1/2}{\lambda}} \frac{D}{d_1 \cdot d_2} \cdot H = \sqrt{2} H/F_1 \quad (11)$$



El parámetro  $H$  representa la altura del obstáculo, sobre el eje de antenas, y equivale al valor negativo de la claridad  $F$ , referida en la sección 2.1 Introducción. La integral incluida en la fórmula ( 9 ) es llamada integral de Fresnel. Su cálculo numérico se efectúa desarrollando la función exponencial en serie de Taylor, e integrando cada término por separado. El resultado de este proceso, puede apreciarse en la Figura N° 6 , donde se muestra la gráfica de la amplitud de  $A(v)$ , como función de  $v$ .

Varias condiciones han sido impuestas en la derivación de la fórmula ( 9 ). En particular aquellas indicadas en ( 10 ), pueden ser satisfechas siempre que los ángulos de elevación de los rayos tendidos desde el transmisor o el receptor hacia el filo  $S$ , sean pequeños. Sólo una sección comparativamente pequeña del contorno del filo  $S$ , en vez de una extensión horizontal infinita, se confirma que juega un rol contribuyente en la difracción. Esta conclusión, junto con el hecho de que sólo en casos excepcionales se encuentra severa variación del parámetro  $H$  en el sentido horizontal de un filo de montaña natural, valida para muchos casos prácticos, la aplicación de la fórmula ( 9 ), o de los valores graficados en la Figura N° 6.

Aunque la fórmula ( 9 ) ha sido derivada por un procedimiento matemático, es correcto afirmar que ella resulta de una evaluación aproximada, llamada también método de campo de apertura, de la representación rigurosa enfocada con la ecuación escalar de onda, referida en el apartado 2.4.1. Tal ecuación, comprende al problema de propagación en su manera más general, y contiene implícitamente el concepto de irradiación secundaria de Huygens-Fresnel. La aproximación, produce valores de atenuación por

difracción que van haciéndose progresivamente menores que los predichos mediante el desarrollo de la ecuación de onda, conforme aumenta el ángulo de difracción  $\theta$  o el parámetro  $v$ . La desviación producida para  $v=2.4$ , equivalente a relación  $H/F_1 = 1.69$ , es del orden de -2 dB respecto del valor obtenido por la ecuación de onda.

Los valores de atenuación por difracción obtenidos de la Figura N° 6, si bien son referidos a un obstáculo ideal conformado por una superficie plana de espesor nulo, en la práctica demuestran ser estimativos de la atenuación producida por obstáculos, únicos en el radioenlace, de configuración geométrica real, como es el caso de cumbres de cerros. Ello se debe, sobre todo a que la condición de ángulo de difracción pequeño se presenta en la generalidad de los problemas de propagación por sobre cerros.

La metodología aproximativa de Fresnel, descrita, se ha aplicado también para resolver enlaces por difracción que presentan varios obstáculos en el trayecto. Al respecto, conviene mencionar el enfoque por J.H. Whittaker, indicado en la referencia [5], que aplica la evaluación de campo de apertura, en cada cambio de pendiente importante del perfil topográfico de un radioenlace, para determinar la intensidad y fase de un número, entre 20 a 30, de elementos de irradiación secundaria distribuidos en cada plano vertical por encima de los obstáculos. El cálculo numérico de las integrales de Fresnel, es ayudado mediante computadora, para obtener la distribución de campos por encima de un obstáculo, la que a su vez sirve para calcular la distribución de campos en el siguiente obstáculo, y así sucesivamente hasta llegar al terminal de recepción.

## 2.5 Estimación de la Atenuación por Difracción

Previo a la exposición de los métodos de estimación de la atenuación, procede estimar la posible influencia del fenómeno de dispersión troposférica, que permite también establecimiento de radioenlaces más allá del horizonte.

De acuerdo con la Technical Note 101 de la National Bureau of Standards (NBS) de Estados Unidos de N.A., la distancia (en km) desde un terminal al horizonte, a la cual los modos de propagación por difracción y por dispersión troposférica son aproximadamente iguales, está dada por:  $65(100/f)^{1/3}$ , siendo  $f$  la frecuencia en megahertz. Para la frecuencia de 400 MHz, aplicada en el radioenlace Bayóvar - Piura, esta fórmula arroja el valor de 41km. En nuestro caso, la distancia de Bayóvar al horizonte resulta ser de 56 km, de acuerdo con la fórmula ( 21 ), expuesta más adelante en el apartado 2.5.2.2, tomando como valor de altura de antena,  $h_1=186.4\text{m}$ , correspondiente al terminal de Bayóvar, extraído del perfil topográfico de la Figura Nº 4. Esta distancia, siendo mayor que la anterior calculada, indicaría la posibilidad de influencia del modo de dispersión. La NBS recomienda en este caso, calcular la atenuación de los dos modos, por dispersión troposférica y por difracción, desestimar la presencia del modo que tenga valor de atenuación superior en 15 dB al del otro, y elegir al de menor atenuación como modo predominante.

La estimación de la atenuación global de enlace por dispersión troposférica, entre Bayóvar y Piura, arroja el valor de 171.87 dB, de acuerdo con el procedimiento "Cálculo de la mediana de la atenuación, básica de largo

período, debido a Dispersión Troposférica” , incluido también en la Technical Note 101 referida, (versión simplificada de este procedimiento, se presenta en la referencia [6], pag. 138-162). Por otro lado el cálculo de atenuación global, considerando difracción sobre tierra esférica, desarrollado en la presente sección, arroja valor del orden de 145 dB. Debemos por lo tanto, desestimar el modo de propagación por dispersión troposférica, por presentar valor de atenuación superior, en más de 15dB, al valor del modo de difracción.

Dos metodologías de cálculo de la atenuación por difracción, se describen en los apartados siguientes: la recomendada en la Technical Note 101 de la NBS, mencionada, que fuera desarrollada por A.C. Longley y P.L. Rice, y la desarrollada por Kenneth Bullington. De ambas metodologías se presentan, en forma resumida, los casos que conciernen al estudio del radioenlace Bayóvar - Piura realizado, y que coincidentemente son los más comunes encontrados en aplicaciones reales. Dentro de la primera metodología mencionada, trataremos los casos de difracción en obstáculo protuberante único de claridad relativa menor que 0.6, y de difracción sobre tierra esférica allende el horizonte, de claridad relativa menor que cero. En el tratamiento de la segunda de las metodologías nombradas, se incluye primeramente el caso de difracción sobre tierra plana, condición ideal aplicada para simular la radiopropagación sobre varios obstáculos con claridad relativa menor que 0.6, pero mayor que cero, para luego presentar los casos de difracción sobre obstáculo protuberante único y sobre tierra esférica allende el horizonte, ya mencionados. Estas metodologías, tienen

como base teórica a los resultados del análisis de la ecuación escalar de onda, referido a la propagación sobre tierra, y también del análisis aproximativo de Fresnel, llamado también método de campo de apertura, referido a la difracción "filo de cuchilla".

### **2.5.1. "Technical Note 101" - Oficina Nacional de Estándares de EE.UU. de N.A.**

Un resumen de esta metodología, se presenta en la referencia [6], pag. 158-173. La fuente original es: P.L. Rice, A.C. Longley, K.A. Norton, and A.P. Barsis, "Transmission Loss Prediction for Tropospheric Communication Circuits", NBS Tech. Note 101, U.S. National Bureau of standards, Boulder, Co., May 1965 (revised January 1967). De esta metodología describiremos los tipos de difracción presentes en los perfiles topográficos ilustrados en las Figuras N° 7 y N° 8, denominados:

- (a) Un solo obstáculo "filo de navaja".
- (b) Allende el horizonte de tierra esférica.

#### **2.5.1.1 Difracción "Filo de Cuchilla"**

Consiste en la radiopropagación, habiendo un obstáculo aislado entre las antenas. El perfil topográfico debe mostrar claridad relativa mayor que 0.6, en todo su trayecto, excepto en el punto de obstrucción donde debe ser menor que 0.6, ver Figura N° 7. Las antenas transmisora y receptora deben tener un horizonte común, consistente en una montaña con cumbre aguda o risco filudo.

Para la valoración en primera aproximación, de la pérdida por difracción en el obstáculo, se idealiza la forma de éste, asimilándolo a una arista o

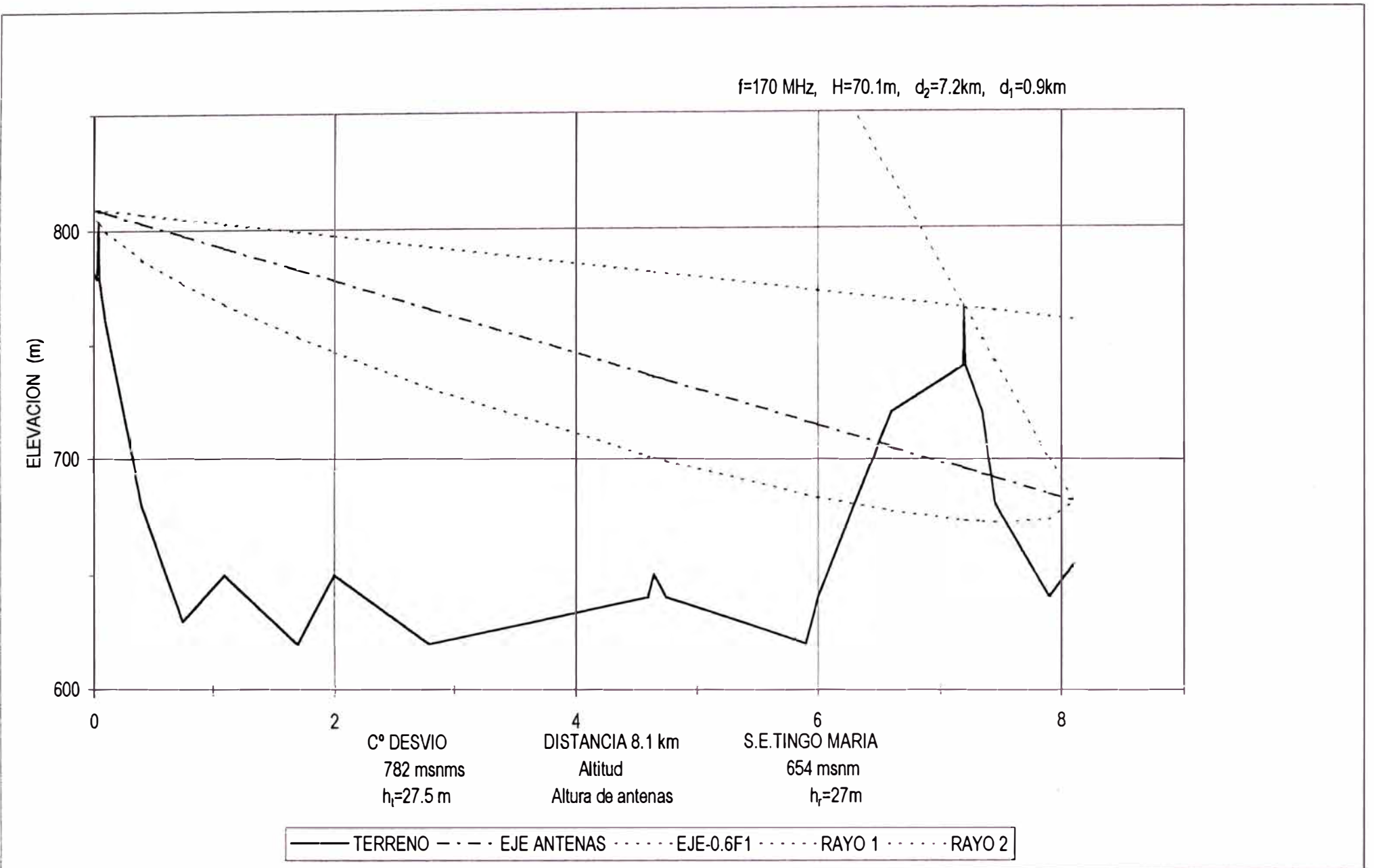


Figura N° 7 .- Perfil Topográfico de Difracción en Filo de Cuchilla

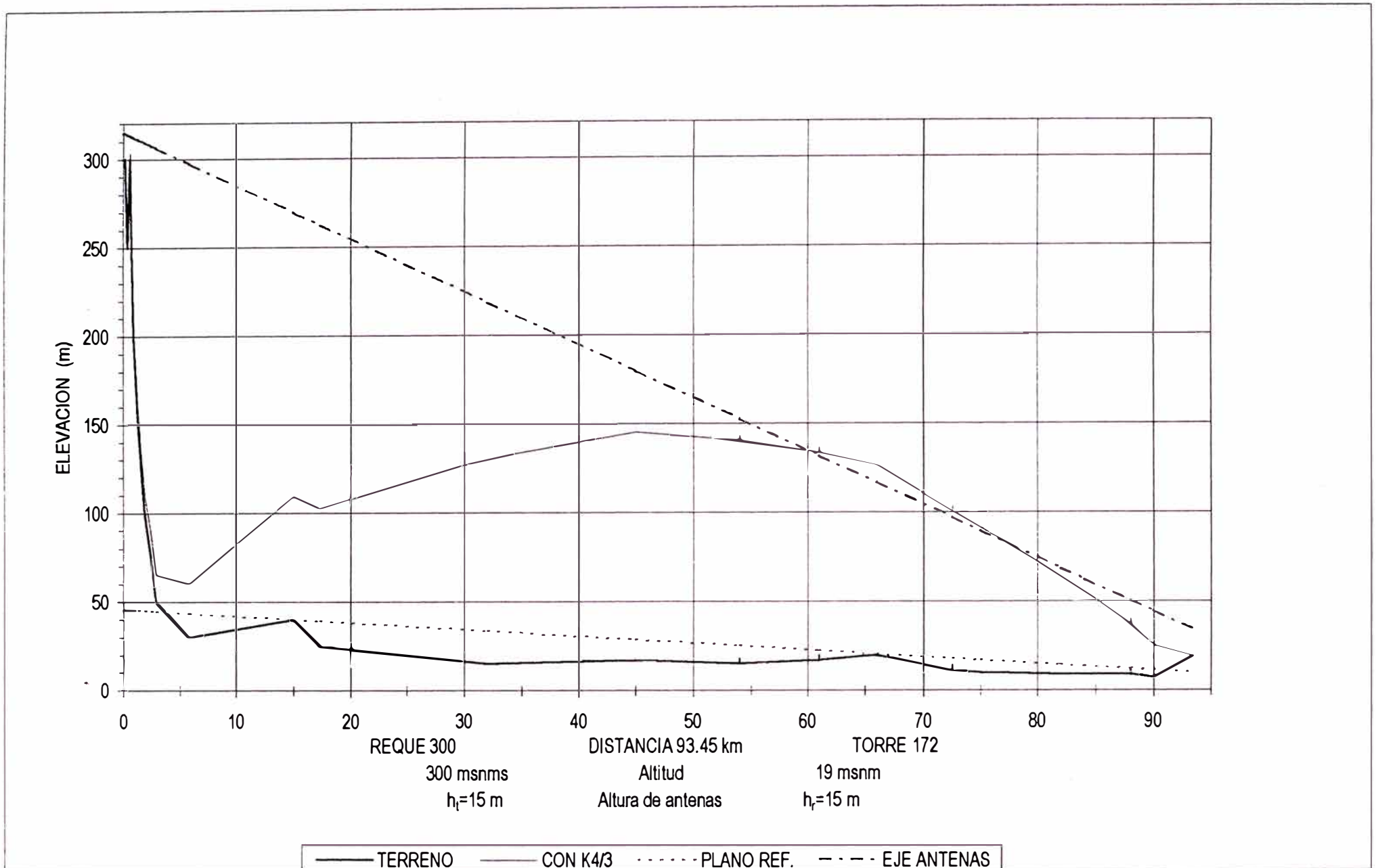


Figura N° 8.- Perfil Topográfico de Difracción allende el horizonte de Tierra Esférica

cuña de espesor despreciable. El valor de la atenuación por difracción, se obtiene directamente de la gráfica  $A(v)$  de la Figura N° 6 , debiéndose calcular previamente el valor de  $v$ , según la fórmula N° 11. Para facilidad de recordación, el valor de  $v$  es la negativa de la claridad  $F/F_1$  multiplicada por  $\sqrt{2}$ . Para valores de  $v$  mayores que  $-1$ , de interés para el presente caso de difracción, se dispone de aproximación numérica sencilla, dada por la siguiente expresión, que se encuentra enunciada en la referencia [7], página 162:

$$A(v) = 6.9 + 20 \log(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1) \quad \text{dB} \quad (12)$$

El valor de  $A(v)$  calculado, debe sumarse a la atenuación por propagación en espacio libre, dado por la fórmula ( 2 ), para obtener la atenuación total del enlace.

### **2.5.1.2 Difracción allende el horizonte de tierra esférica**

Se produce esta modalidad cuando el terreno entre las antenas es liso o con ondulación leve (llanura, mar, lagos), con claridad relativa cero o menor, ver Figura N° 8. La atenuación por difracción se formula como la suma ( en dB) de cuatro términos que dependen: uno de la distancia total, otros dos de las distancias entre los terminales y sus respectivos horizontes, y un cuarto término que depende de la frecuencia, las características del terreno, el índice de refracción y de la polarización, sea ésta vertical u horizontal.

El procedimiento de cálculo se ilustra a continuación aplicado al enlace analógico Bayóvar – Piura, descrito en la Sección 2.3 anterior, y que corresponde a este caso de difracción.



- Cálculo del parámetro  $C_o$ :

$$C_o = (8497/a)^{1/3} \quad (13)$$

$a$  = radio efectivo terrestre, obtenido de la Figura N° 9, conocida la refractividad de 340, referida a nivel del mar, en la costa peruana  
= 9100 km

$$C_o = (8497/9100)^{1/3} \\ = 0.9774$$

- Obtención de parámetro  $K(a=8497)$ , de la Figura N° 10, para radio de curvatura terrestre 8497 km, correspondiente al valor de  $k=4/3$ .  $K$  es función de la frecuencia de operación, la cual es 400 Mhz, y de la polarización de antena, que es vertical en nuestro caso.

$$K(a=8497) = 0.0055$$

- Obtención del parámetro  $b^\circ$  a partir de la Figura N° 11. Este parámetro es también función de la frecuencia y de la polarización de antena.

$$b^\circ = 90^\circ$$

- Cálculo de  $k(a)$ , para radio efectivo terrestre distinto:

$$K(a) = C_o K(a=8497) \quad (14) \\ = 0.9774 \times 0.0055 = 0.005375$$

- Obtención del parámetro  $B(K,b^\circ)$ , a partir de la Figura N° 12 :

$$B(K,b^\circ) = 1.603$$

- Obtención del parámetro  $C_1(K,b^\circ)$  a partir de la Figura N° 13 :

$$C_1(K,b^\circ) = 20$$

- Cálculo del parámetro  $B_o$ :

$$B_o = f^{1/3} (C_o)^2 B(K,b^\circ) \quad (15) \\ = 400^{1/3} \times 0.9774^2 \times 1.603 = 11.283$$

- Cálculo de los siguientes valores:

$$x_o = d \cdot B_o \quad (16)$$

$$x_1 = d_{Lt} \cdot B_o \quad (17)$$

$$x_2 = d_{Lr} \cdot B_o \quad (18)$$

$d_{Lt}$  o  $d_{Lr}$  son las distancias entre el terminal de transmisión o recepción, y su respectivo horizonte. Según el perfil topográfico del enlace, Figura N° 4:

$$d = 83.55 \text{ km}$$

$$d_{Lt} = 48.5 \text{ km (terminal de Bayóvar)}$$

$$d_{Lr} = 28.05 \text{ km (terminal de Piura)}$$

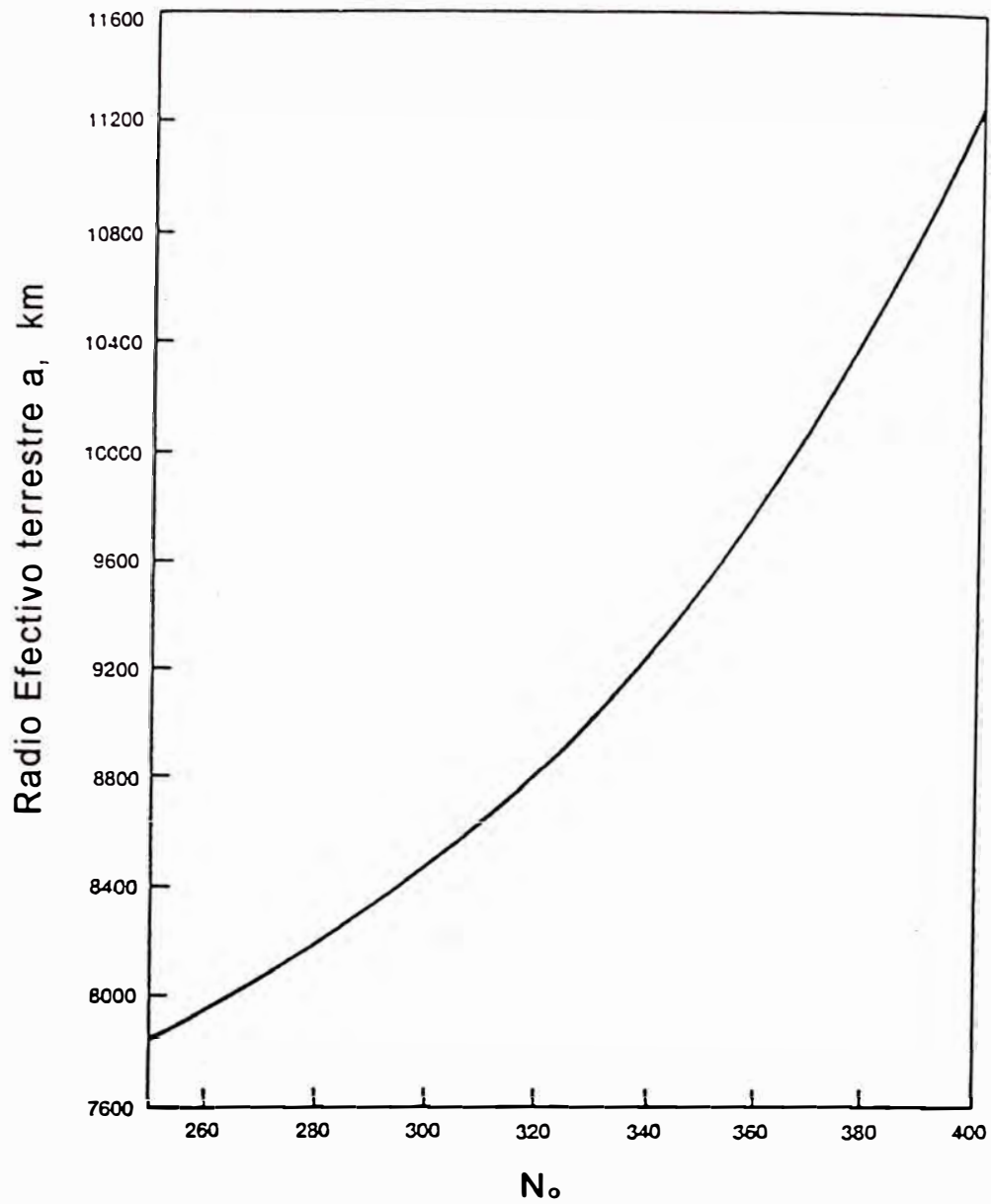


Figura N° 9 .- Radio efectivo terrestre versus la refractividad  $N_0$  referida a nivel del mar  
(Fuente: referencia [6])

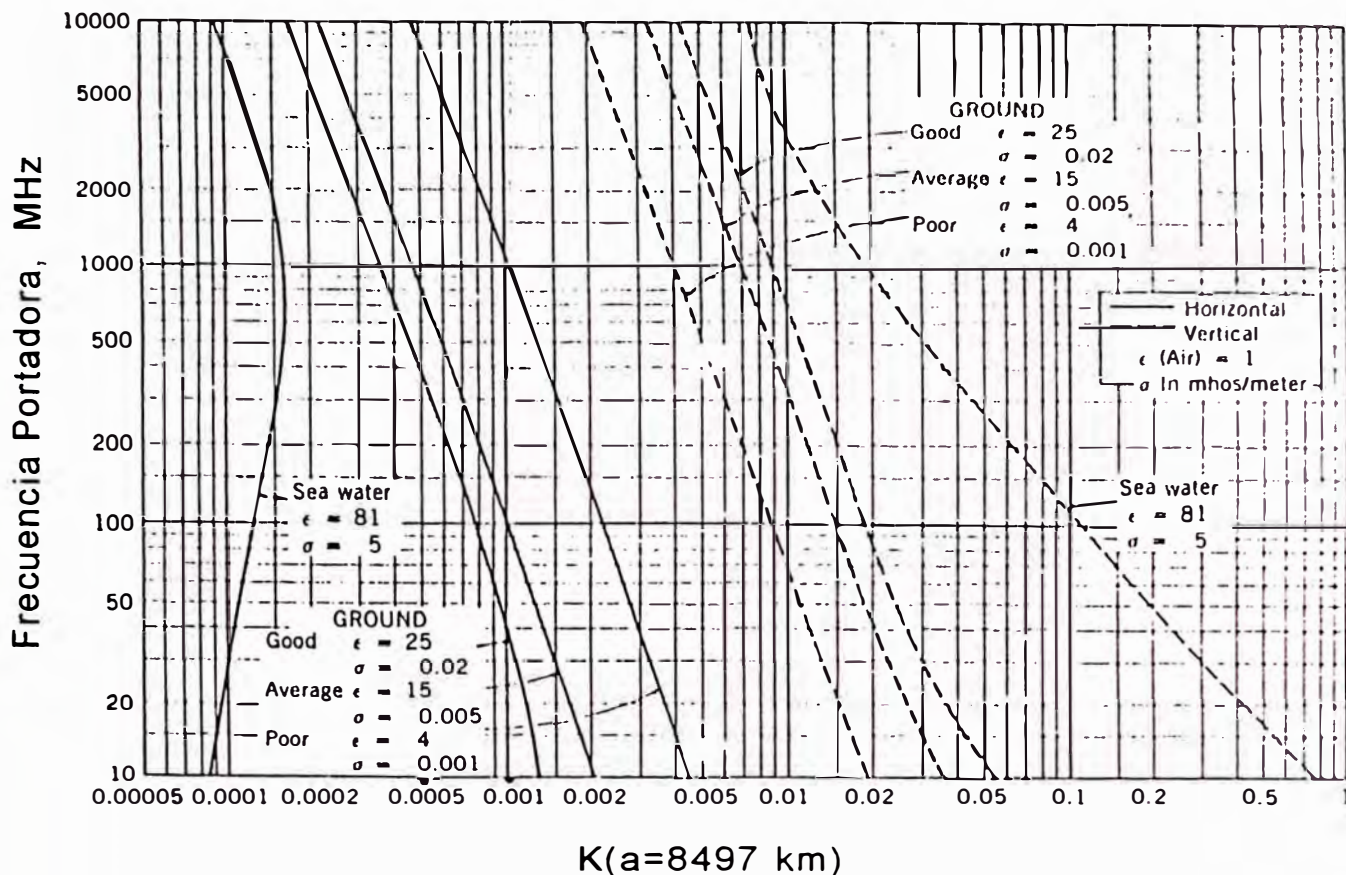


Figura N°10.- Parámetro K, referido a radio efectivo terrestre a=8497 km  
(Fuente: referencia [6])

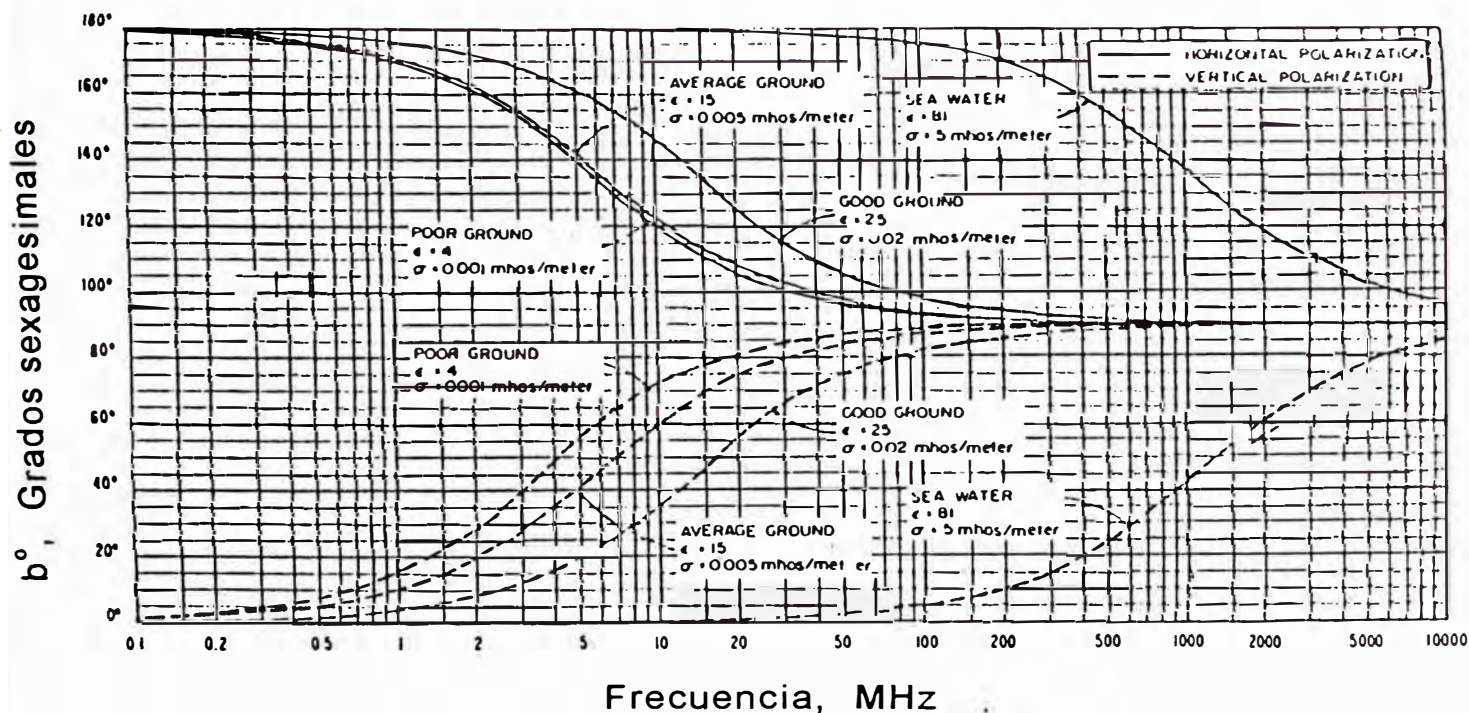


Figura N° 11.- Parámetro b°, para propagación de onda terrestre sobre tierra esférica  
(Fuente: referencia [6])

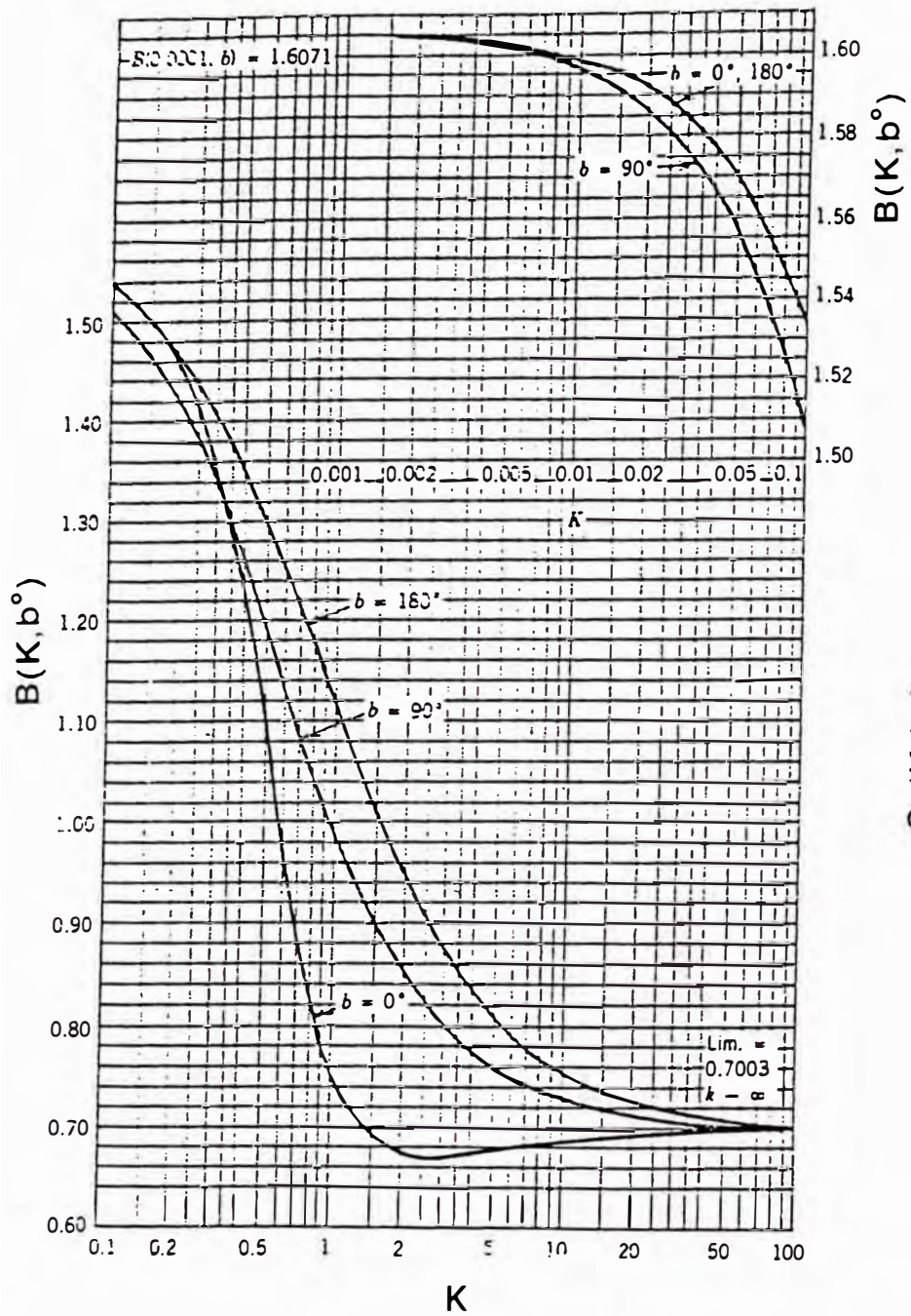


Figura N° 12.- Parámetro  $B(K, b^\circ)$  versus  $K$   
(Fuente: referencia [6])

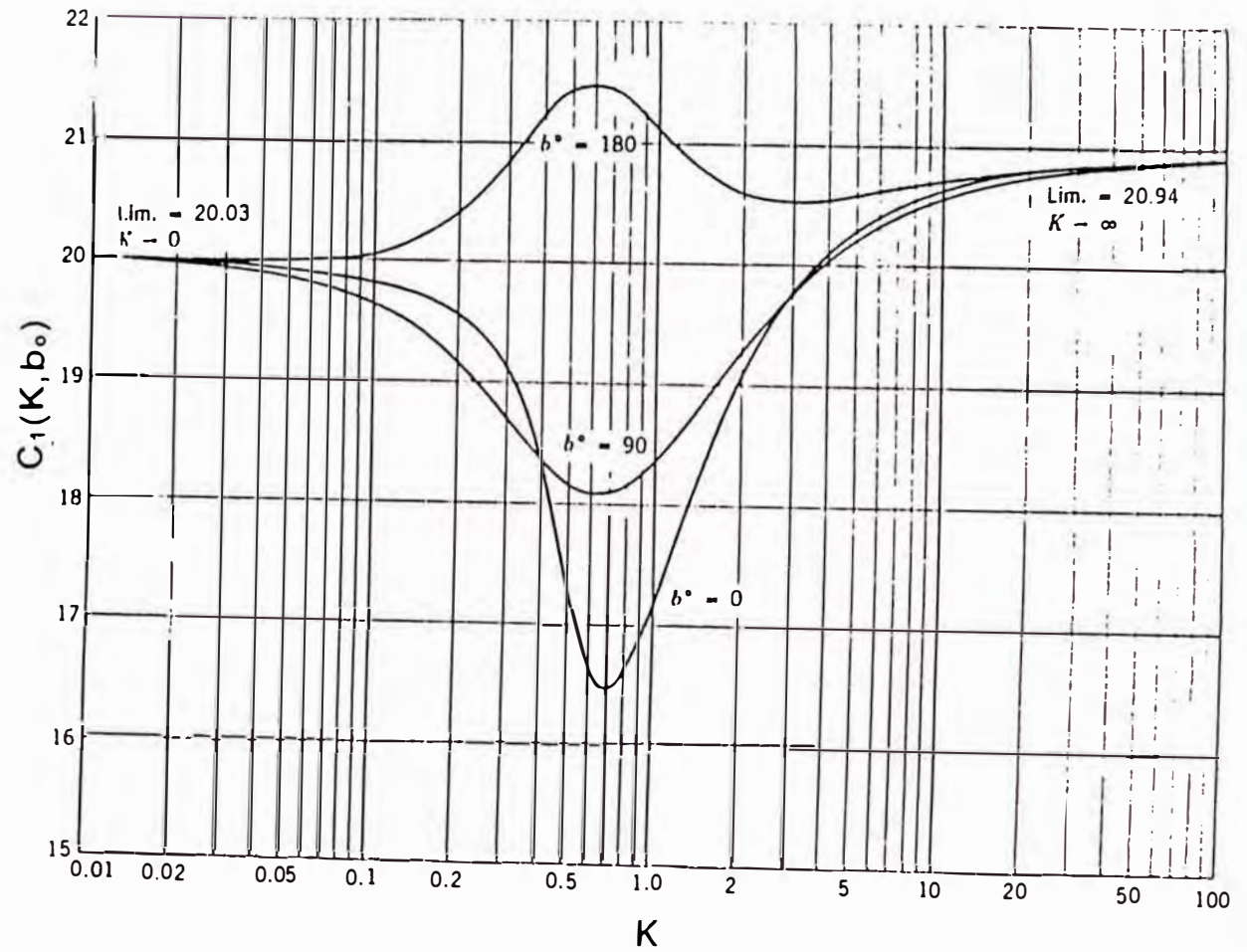


Figura N° 13.- Parámetro  $C_1(K, b^\circ)$   
(Fuente: referencia [6])

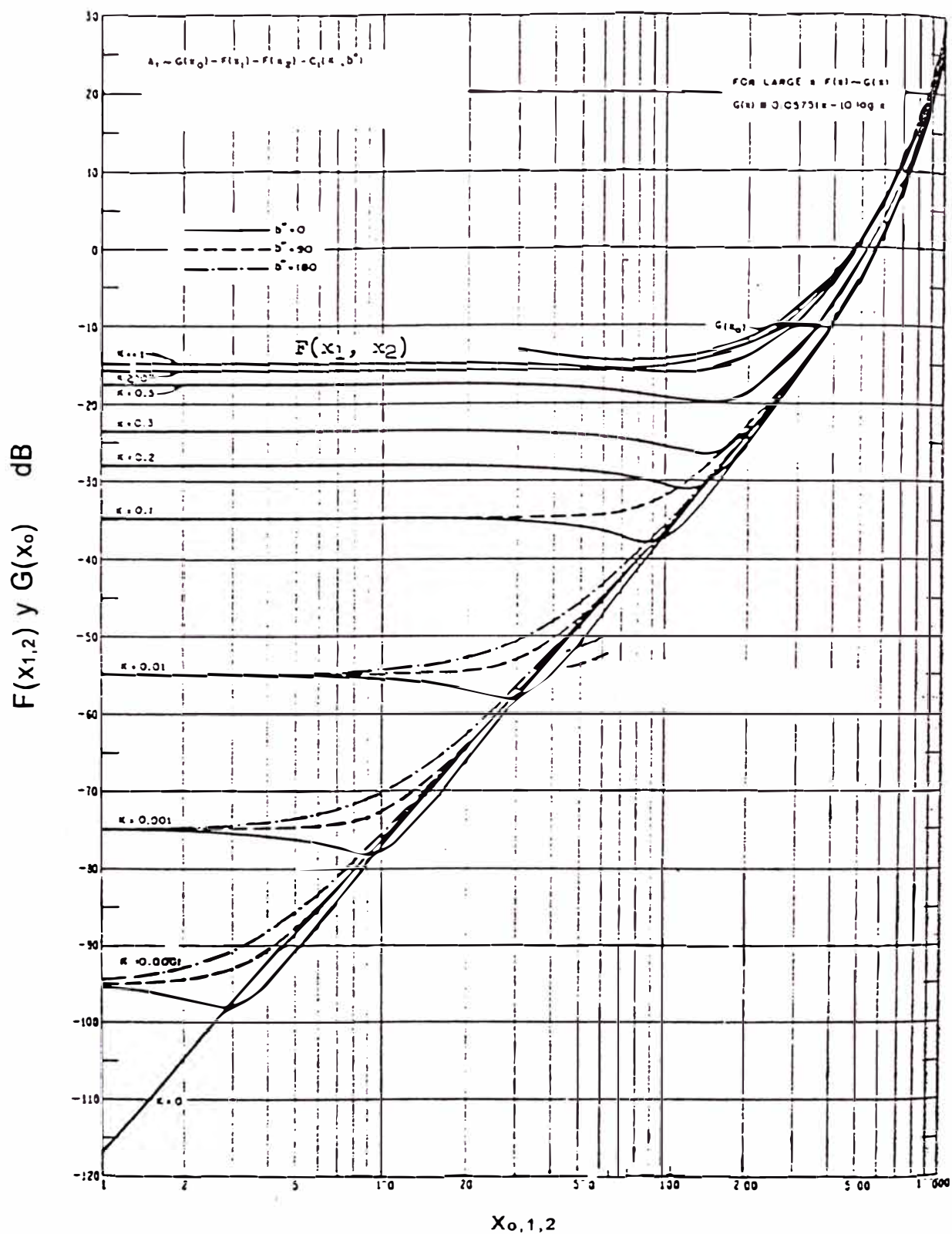


Figura N° 14.- Funciones  $F(x_1)$ ,  $F(x_2)$  y  $G(x_0)$ ,  
 para rango  $0 \leq k \leq 1$   
 (Fuente: referencia [6])

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}x_0 &= 83.55 \times 11.283 = 942.69 \text{ km} \\x_1 &= 48.5 \times 11.283 = 547.22 \text{ km} \\x_2 &= 28.05 \times 11.283 = 316.48 \text{ km}\end{aligned}$$

- Obtención de los componentes de la atenuación por difracción  $G(x_0)$ ,  $F(x_1)$  y  $F(x_2)$ , a partir de la Figura N° 14 :

$$\begin{aligned}G(x_0) &= 25 \text{ dB} \\F(x_1) &= -2 \text{ dB} \\F(x_2) &= -15 \text{ dB}\end{aligned}$$

- Cálculo de la atenuación por difracción

$$\begin{aligned}A_d &= G(x_0) - F(x_1) - F(x_2) - C_1(K, b^0) \\ &= 25 - (-2) - (-15) - 20 = 22 \text{ dB}\end{aligned}\tag{19}$$

Este valor calculado, debe sumarse a la atenuación por propagación en espacio libre  $L_{\text{free}}$ , dado por la fórmula ( 2 ), para obtener la atenuación total del enlace. En Bayóvar - Piura:

$$\begin{aligned}L_{\text{free}} &= 32.5 + 20\log 400 + 20\log 83.55 \\ &= 122.98 \text{ dB}\end{aligned}$$

La atenuación total de propagación  $L$ , resulta entonces:

$$L = L_{\text{free}} + A_d = 122.98 + 22 = 144.98 \text{ dB}$$

### 2.5.2 Metodología de K. Bullington

Se ha dado en llamar metodología de Bullington, a la aplicación de nomogramas diseñados en base a las formulaciones de la atenuación por difracción, resultantes del desarrollo de la ecuación escalar de onda, y de la aproximación de Fresnel, referidas en la sección 2.4 anterior. Esta metodología, está basada en la interpretación gráfica del radioenlace, para definir la condición de difracción presente y los parámetros de entrada a los nomogramas. Kenneth Bullington desarrolló el enfoque de cálculo de la atenuación por difracción, que finalmente se incorporó a los nomogramas, en

su artículo "Radio Propagation Fundamentals", publicado en Bell Systems Technical Journal 36 (3), de Mayo 1957, páginas 593-626.

Los nomogramas consideran simplificaciones de cálculo, basadas en condiciones prácticas. Además, su aplicación considera previamente una esquematización del perfil topográfico, que debe enfocarse con suficiente criterio de diseño. Fundamentalmente, consiste en reemplazar, al perfil topográfico por una línea recta representativa de plano de tierra, con lo cual se logra esquematizar los tipos de difracción presentes en el enlace, para proceder a la estimación de sus valores de atenuación por separado.

La metodología afronta el cálculo de la difracción total, como una combinación de tres casos posibles: sobre tierra plana, por sobre el horizonte de tierra esférica y sobre protuberancia del terreno.

#### **2.5.2.1 Nomograma de Difracción sobre tierra plana**

La gráfica del perfil topográfico, en este caso, puede ser accidentado con varias elevaciones. La condición de difracción sobre tierra, es reconocida por el pase del rayo sobre el perfil, sin tocar a las elevaciones, pero con claridad relativa menor que 0.6. La inspección de la claridad entre el rayo y el terreno, debe considerar la elevación adicional de las cotas de éste, en la altura dada por la fórmula ( 3 ). En la Figura N° 15 , se ilustra la configuración de difracción sobre tierra plana descrita. El valor de la atenuación por propagación en este radioenlace, se considera igual al producido por propagación sobre un plano de tierra que es tangente al perfil, en el punto o puntos de menor claridad. Cuando el valor de la claridad relativa es aproximadamente similar, (menor que 0.6), en la mayor parte de

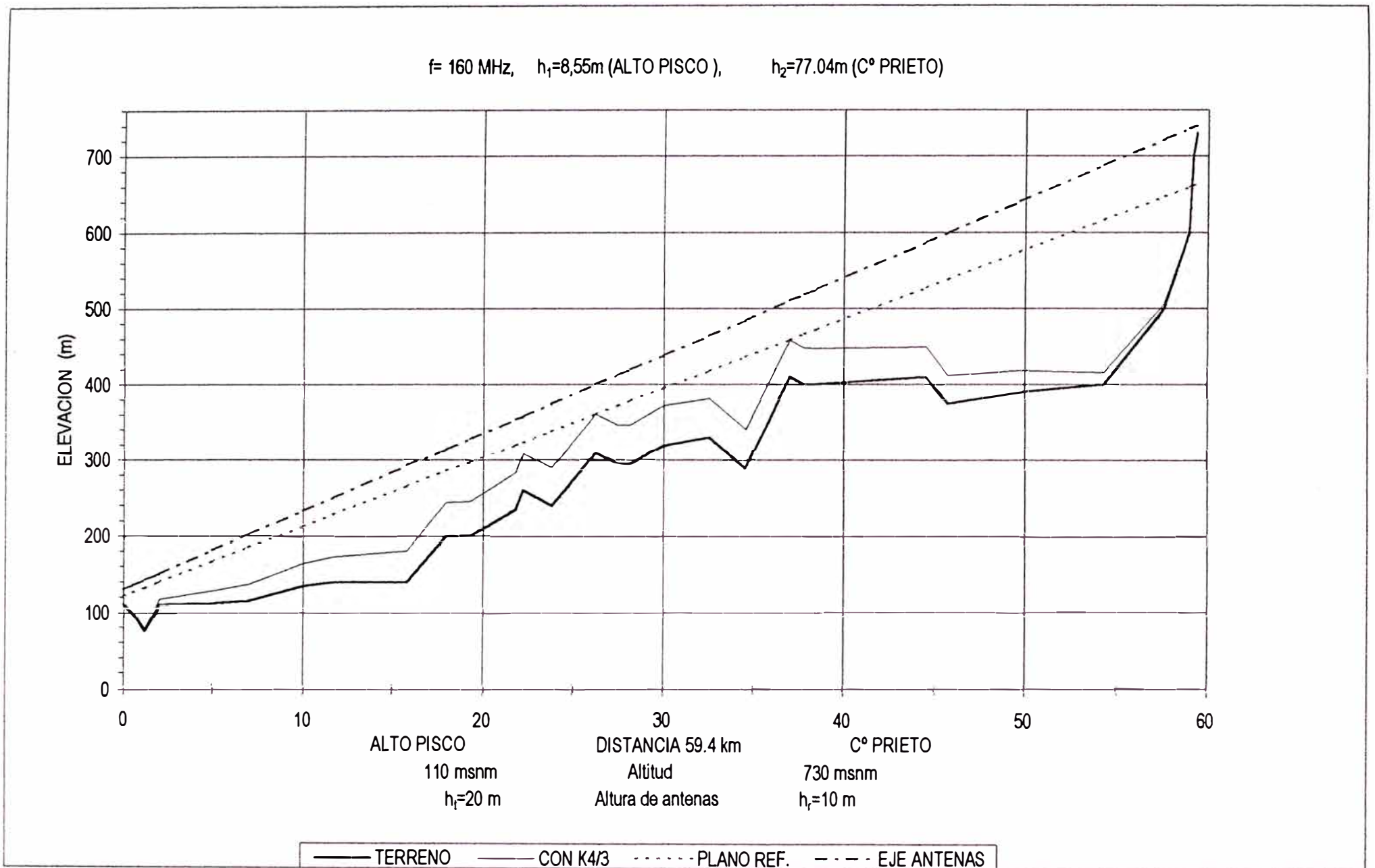


Figura N° 15.- Perfil Topográfico de Difracción sobre Tierra Plana. Trazado de plano de tierra tangente a elevaciones.



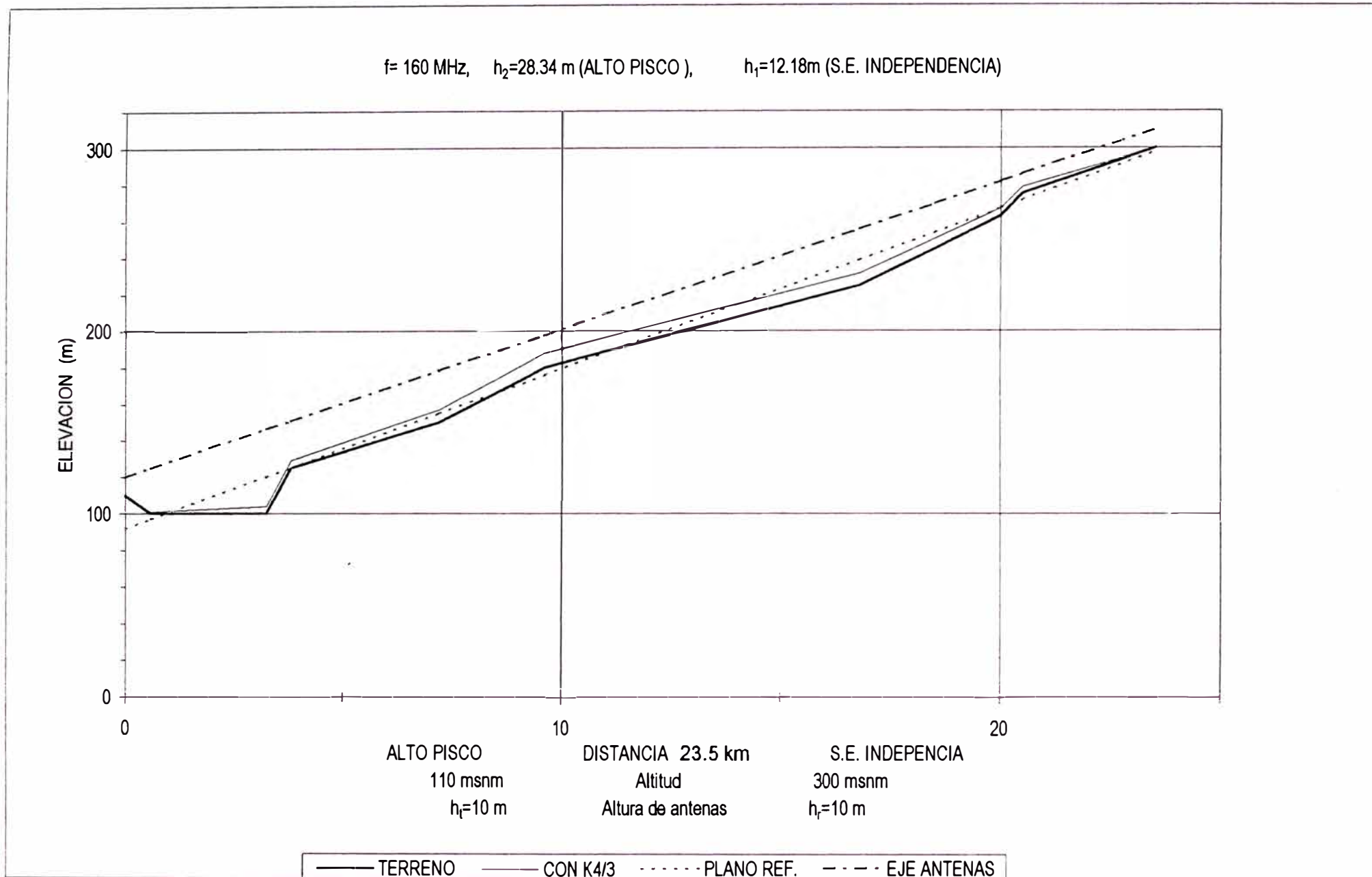


Figura N° 16.- Perfil Topográfico de Difracción sobre Tierra Plana. Trazado de plano de tierra, paralelo a contorno de terreno.

la distancia del enlace, el plano de tierra puede elegirse como aquella recta, paralela al contorno general del terreno, que define áreas por encima del perfil, de superficie total igual a la de las áreas definidas por debajo del perfil, tal como se ilustra en la Figura N° 16. Las alturas de las antenas con respecto a tal plano de tierra o plano de referencia, se designan como  $h_1$  para la altura menor y  $h_2$ , para la altura mayor, las que junto con la distancia  $D$  del radioenlace, constituyen los parámetros de entrada para la estimación del valor total de atenuación por radiopropagación. En la Figura N° 17, se presenta el nomograma que permite obtener ese valor.

La posición del plano de tierra resulta fundamental en la estimación de la atenuación. El trazado de este plano requiere la aplicación de adecuado criterio, cuando la condición de claridad menor que 0.6 se presenta exclusivamente en un tramo de la distancia total, mientras que en el resto del enlace alcanza valores mayores que 0.6. En tal caso, conviene elegir plano de tierra, válido sólo en el tramo de difracción identificado, y referir la estimación de su valor de atenuación exclusivamente a esa porción de la distancia del enlace. Las alturas  $h_1$  y  $h_2$  en tal caso, consisten en la diferencia de alturas entre el eje de antenas y el plano de tierra, en los extremos del tramo de difracción. Para el cálculo del valor de atenuación por difracción en el tramo, al valor obtenido del nomograma de Figura N° 17, se le resta el valor de atenuación de espacio libre en ese tramo, dado por la fórmula ( 2 ). La atenuación de radiopropagación del enlace total, se obtiene sumando el valor de atenuación obtenido para el tramo de difracción, más la atenuación de espacio libre en la distancia total dada por la fórmula ( 2 ).

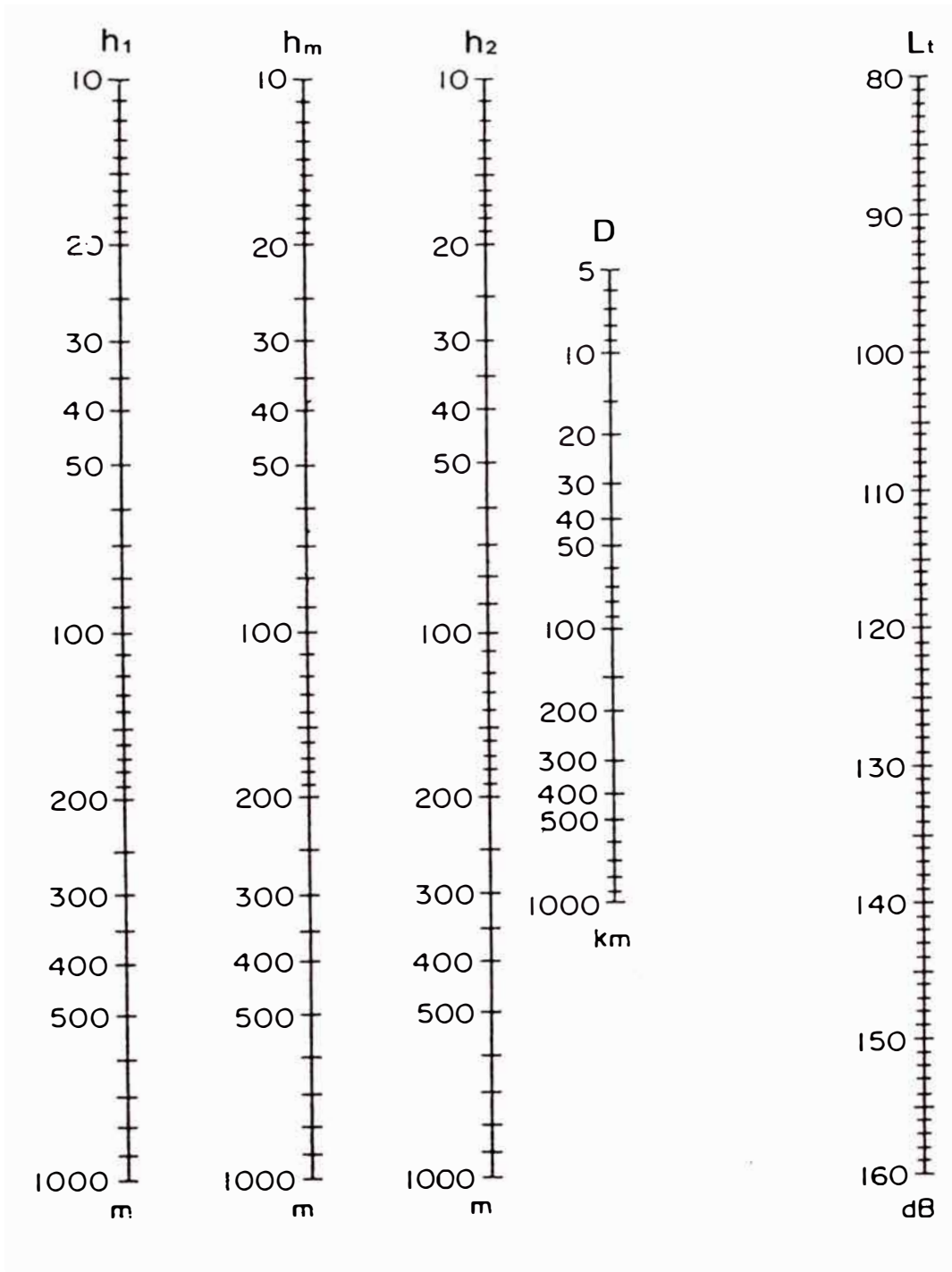


Figura N° 17.- Atenuación entre antenas isotrópicas sobre tierra plana. Resultado válido sólo si es mayor que atenuación de espacio libre.

Uso: Ingresar valores en escalas  $h_1$  y  $h_2$ .

Leer valor  $h_m = (h_1 h_2)^{1/2}$ .

Unir con regla valores  $h_m$  y  $D$ , leer resultado en escala  $L_t$

(Fuente: referencia [8])

### 2.5.2.2 Nomograma de Difracción allende el horizonte de tierra esférica

Este procedimiento se conoce también como de las tres pérdidas. Se llama distancia de horizonte de una antena, a la distancia entre el pie de la antena y el punto de tangencia con la superficie terrestre de un rayo trazado desde la antena. esta distancia está dada por:

$$d_{1,2} = 3.57 \sqrt{k h_{1,2}} \quad (20)$$

$d_{1,2}$  = distancia de horizonte de antena transmisora o receptora, km  
(subíndice 1 corresponde a la distancia menor)

$h_{1,2}$  = altura de antena en terminal correspondiente, m

Para  $k=4/3$ :

$$d_{1,2} = 4.1 \sqrt{h_{1,2}} \quad (21)$$

El presente caso de difracción se da sobre terreno llano con leves ondulaciones, cuando la distancia del radioenlace es mayor que la suma de las distancias de horizonte de sus antenas. Sobre el perfil del terreno en base a cotas cartográficas, sin considerar elevación adicional por curvatura efectiva del rayo, se traza una línea recta representativa de plano de tierra o de referencia, que sea tangente a los puntos del perfil con menor claridad. Las alturas de las antenas con respecto a este plano de tierra, designadas  $h_1$  y  $h_2$ , son usadas en la fórmula ( 20 ) para obtener las distancias  $d_1$  y  $d_2$ , las cuales restadas de la distancia total del radioenlace  $D$ , resultan en la distancia  $d_3$ , intermedia entre los puntos de horizonte de las antenas. En la Figura N° 18, se presenta el nomograma que permite obtener tres valores de atenuación, correspondientes a las tres distancias  $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ , y en función de la frecuencia de operación en MHz. La suma de ellos resulta en la atenuación

por difracción del radioenlace.

El radioenlace analógico Bayóvar – Piura, corresponde al presente caso de difracción sobre el horizonte de tierra esférica. Su perfil topográfico, así como el plano de tierra elegido, están representados en la Figura N° 4. Las alturas de antenas sobre este plano, resultan ser de  $h_1=33\text{m}$ , en el terminal Piura y de  $h_2=186.4\text{m}$ , en el terminal Bayóvar. Las distancias de horizonte calculadas son:

$$d_1=23.55 \text{ km}, \quad d_2=55.97 \text{ km}, \quad d_3=4.03 \text{ km} \quad \text{y} \quad D=83.55 \text{ km}$$

Siendo la frecuencia de operación elegida  $f$  de 400 MHz, del nomograma de Figura N° 18 ,se obtienen:

$$L_1= 18.5\text{dB}, \quad L_2=2.3\text{dB}, \quad L_3=1.5\text{dB}$$

El valor de atenuación por difracción total es de 22.3 dB, que concuerda con el estimado según la metodología de la Technical Note 101, de la Sección 2.5.1.2 anterior.

Para la obtención de las distancias de horizonte  $d_1$  y  $d_2$ , que son parámetros de entrada en el nomograma, puede aplicarse la escala horizontal presentada en la parte inferior de la Figura N° 18, siempre y cuando el valor de  $k$  se estime en  $4/3$ . Bajo tal condición el radio de tierra ficticia, sobre el cual el rayo se representa como línea recta, tiene valor 8,493 km, valor que se ha redondeado a 8,500 km, en la escala mencionada. En el caso más general, para la determinación de las distancias de horizonte, debe aplicarse la fórmula ( 20 ), que toma en cuenta el valor de  $k$  específico, con el que se requiere analizar la radiopropagación.

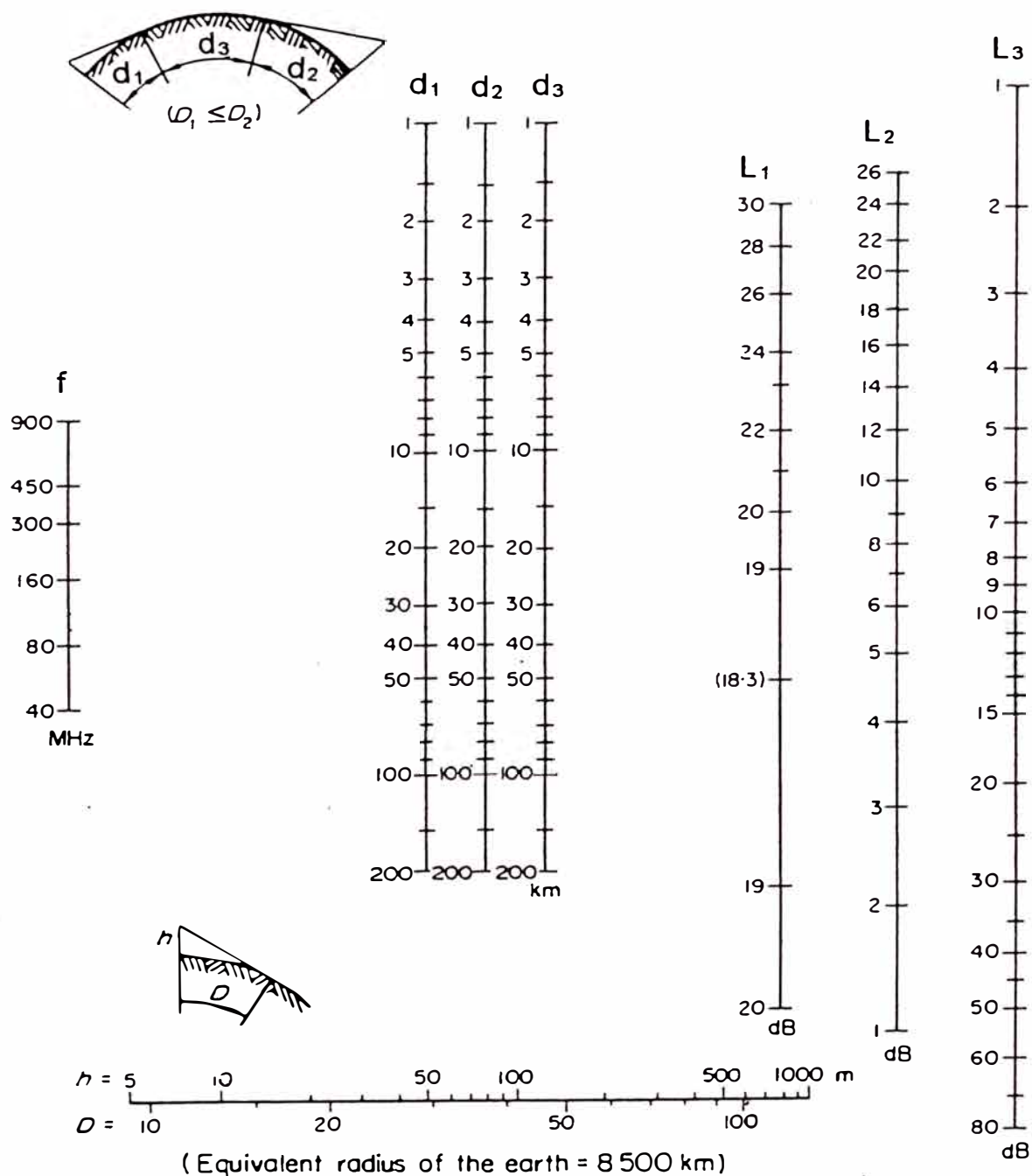


Figura N° 18 - Atenuación entre antenas isotrópicas, allende horizonte de tierra esférica, adicional a atenuación en espacio libre.

(Fuente: referencia [8])

### 2.5.2.3 Nomograma de Difracción en obstáculo protuberante

La existencia de una elevación prominente, en el enfoque de un enlace sobre tierra, impone la dificultad de que el trazado del plano de tierra pase por encima de una o de las dos antenas, haciendo irreal su configuración. Ello se resuelve trazando el plano de tierra tangente a todas las elevaciones menores, y dejando al obstáculo principal, protuberante sobre el plano.

El enfoque consiste en estimar primero la atenuación producida sobre tierra, conforme a los métodos anteriormente descritos, y luego adicionarle la atenuación por difracción en el obstáculo protuberante, estimada según lo explicado a continuación.

La difracción en obstáculo protuberante es tratada conforme a la aproximación de Fresnel para un obstáculo tipo filo de cuchilla, descrita en la sección 2.4.2 anterior. Bullington introdujo una simplificación en el cómputo del parámetro  $v$  de la fórmula ( 11 ), de modo que para el caso  $d_1 \leq d_2$ , en la obtención de la atenuación por difracción, se incurra en error menor que 3dB, aplicando la siguiente fórmula:

$$v = 3 \times 10^{-3} H(f/d_1)^{1/2} \quad (22)$$

$H$  = altura del obstáculo por sobre el eje de antenas, m

$d_1$  = distancia desde el obstáculo hacia el terminal más cercano, km

$f$  = frecuencia de operación, MHz

Además de esta modificación del parámetro de entrada, a los valores de atenuación por aproximación de Fresnel, graficados en la Figura N° 6, se les sustrae 6 dB, como compensación por la mayor magnitud del parámetro

H, resultante de un artificio gráfico, asignada al obstáculo protuberante, de forma irregular, atípico al “filo de cuchilla” descrito en el apartado 2.5.1.

La estimación de la atenuación por difracción, se obtiene del nomograma de la Figura N° 19, en el que están incorporadas las simplificaciones mencionadas, teniendo como entradas la distancia  $d_1$ , del obstáculo hacia el terminal más cercano, la altura H obtenida según se describe a continuación, y la frecuencia de operación.

En radioenlaces reales, la difracción en obstáculo protuberante, es por lo general simultánea a uno de los casos anteriormente tratados, sobre tierra plana o allende el horizonte de tierra esférica. El plano de tierra, usado en el tratamiento de esos casos, ya descrito, es usado como referencia para la medida de la altura H del obstáculo, definiéndose su cúspide por la intersección de las rectas que, con origen en el pie de cada antena, en el plano de tierra, son trazadas tangentes al perfil del obstáculo, como se ilustra en el esquema superior de la Figura N° 19. En el caso de difracción conjunta sobre tierra plana, la altura H debe incluir a la elevación adicional por curvatura efectiva del rayo, dada por la fórmula ( 3 ), mientras que en el caso de difracción conjunta sobre horizonte de tierra esférica no debe incluirse tal elevación adicional.

También el nomograma puede aplicarse al caso de una cumbre aguda de montaña, que califica como tipo “filo de cuchilla” para la metodología de la “Technical Note 101”, descrita en el apartado 2.5.1 anterior. En este caso, para hacer compatible la estimación obtenida del nomograma, con la obtenida de la Figura N° 6, es necesario restituir los 6 dBd que el nomograma



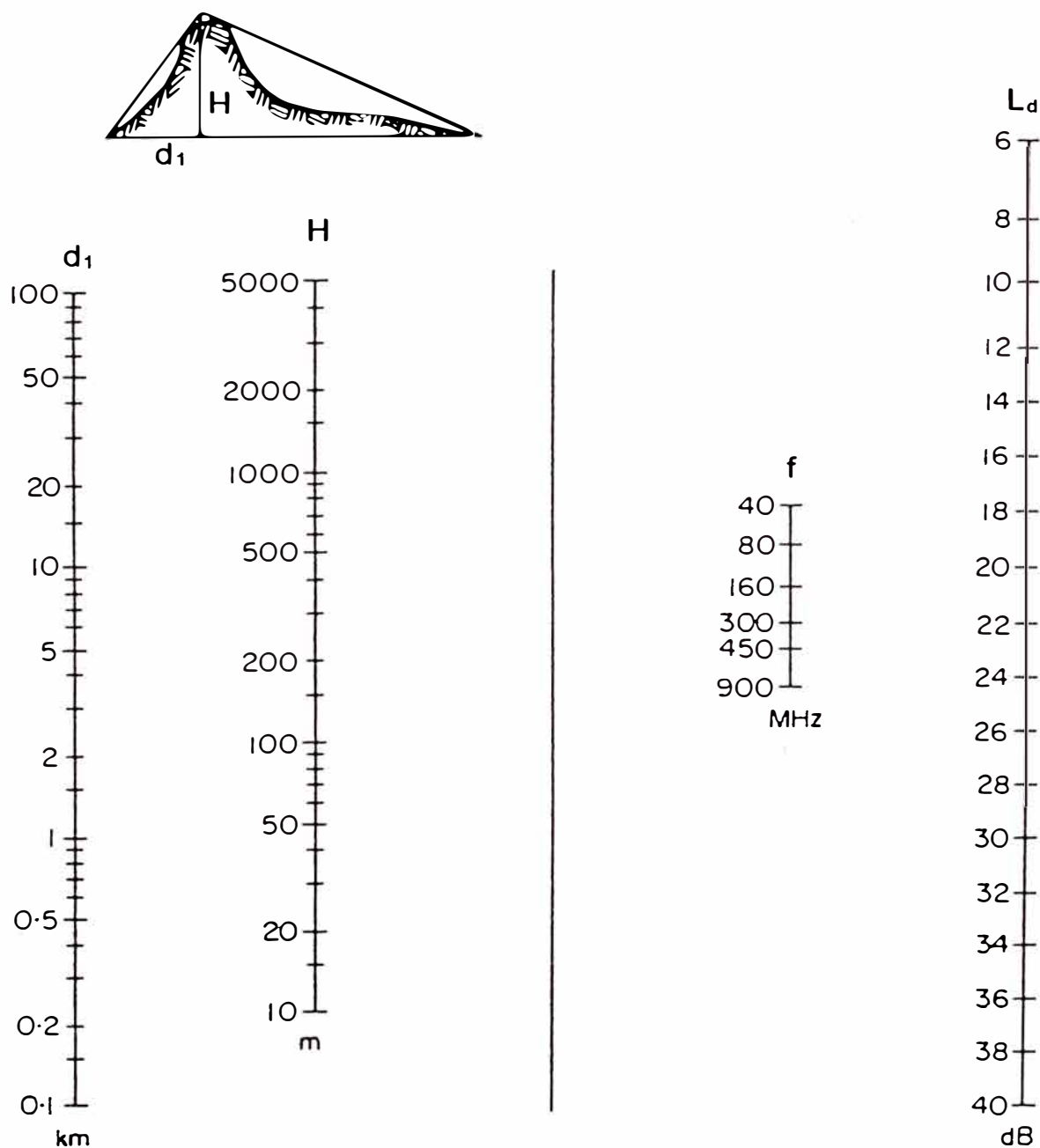


Figura N° 19.- Atenuación producida en obstáculo protuberante.

Uso: -En el perfil topográfico, trazar triángulo esquemático mostrado, para obtener  $d_1$  y  $H$ .

-Con estos valores marcar punto en vertical central.

-Usar este punto y el valor de frecuencia, para leer resultado en escala  $L_d$ .

(Fuente: referencia [8])

sustraer del valor de atenuación por difracción, definido según la aproximación de Fresnel. En este caso, de difracción única en la cumbre, la altura  $H$  se mide con respecto al eje de antenas.

## **CAPITULO III ESTUDIOS DE CAMPO**

La implantación del radioenlace Bayovar - Piura, en su versión analógica, en 1991, fue decidida en vista de los resultados de las pruebas de transmisión que se realizaron. El grupo de ingenieros a cargo del enlace proyectado no estaba familiarizado con las metodologías expuestas en el capítulo anterior. Existía comprensible grado de incertidumbre en el establecimiento del mismo, dada la condición de claridad relativa menor que cero, identificada. Además, no había sido posible detectar señal de recepción entre equipos radiotransmisores instalados en los terminales, con antenas montadas en torre existente de 48.7m en Bayóvar y mástil de 2m sobre la azotea de las oficinas de la empresa PETROPERU en Piura.

Se considero entonces como necesaria, la realización de pruebas de transmisión, desde alguna elevación del terreno existente en la proximidad de Bayóvar, y desde alguna edificación en Piura, de modo que se asegurara el pase de línea de vista por encima del horizonte. Ello permitiría evaluar el orden de magnitud de la señal de recepción, y estimar la factibilidad técnica del radioenlace. El estudio de campo, permitió definir que montando las antenas a las mismas alturas sobre el nivel del mar, que las que se usaron en la prueba, el radioenlace rendiría satisfactorio nivel de recepción, del orden de -64 dBm. Para ello se iba a requerir el montaje de torres de alturas,

136m en Bayóvar y 36m en Piura, como configuración probada, de alto margen de seguridad. No era posible inferir, el nivel de recepción para menores alturas de antenas, ya que la claridad relativa del radioenlace se aproximaba rápidamente a cero, donde las condiciones de difracción se tornaban sustancialmente diferentes.

Fue necesario realizar ulterior prueba, con las alturas de antena entonces disponibles, sobre torre de 48.76m en Bayóvar, y sobre torre existente en la azotea de un edificio vecino, al local de la empresa PETROPERU, en Piura, superior en un piso de altura a este último. Tal prueba permitió obtener nivel de recepción apto para operación, lo que condujo a la implantación del radioenlace aplicando torre de 25m sobre altitud de 49.7m.s.n.m. en Piura. Con este esquema de altura de antenas, funcionó con nivel superior a -70 dBm., desde 1991 hasta 1998.

Las mediciones del estudio de campo realizado, sirven en el presente capítulo, como valores de comprobación para los cálculos de radiopropagación que se presentan para el radioenlace Piura-Bayóvar, en aplicación de las metodologías desarrolladas en el capítulo anterior.

### **3.1 Plan de Pruebas**

La realización de pruebas de transmisión entre dos sitios de localización muy cercana a los sitios terminales del radioenlace, asegura para fines prácticos, radiopropagación a través de las mismas condiciones de terreno y atmósfera. Esto se puede comprobar observando que el perfil topográfico del radioenlace analógico Bayóvar-Piura, graficado en la Figura N° 4 , es muy similar a los perfiles topográficos levantados entre los otros sitios de prueba.

El objetivo que se persigue es evaluar el comportamiento del nivel de recepción, con relación a la altura de montaje de las antenas, dado que las alturas a ensayar no son realizables con la infraestructura disponible en los sitios terminales del radioenlace.

Para la selección del sitio para prueba en Bayóvar, se analizaron las cartas del Instituto Geográfico Nacional, escala 1:100,000, hojas 12-a Bayóbar, 12-b Sechura, y 11-b Piura. El sitio designado como Bayóvar 1, tiene las siguientes coordenadas: S 05° 50' 53"

W 81° 02' 09"

310 m.s.n.m.,

y está distante 5.9km del sitio Bayóvar, terminal del radioenlace. La cota diferencial de este sitio, respecto del terminal Bayóvar, es de 150m. En la Reseña Geográfica de la Figura N° 3, se indica la ubicación del sitio Bayóvar 1.

En el extremo de Piura se eligió como sitio de prueba a la azotea del edificio donde funciona la sede principal del Banco de Crédito en esa ciudad, con frente en la Av. Grau y adyacente a la catedral, cruzando la calzada del Jr. Tacna. El edificio referido tiene 14 pisos de altura sobre el nivel de la calle, donde la cota es de 35 m.s.n.m., y es una de las elevaciones más destacables de la ciudad, con visión libre de obstáculos hacia el Sur, con dirección del desierto de Sechura. Este sitio, designado como Piura 1, tiene las siguientes coordenadas: S 05° 11' 35"

W 80° 37' 31"

77 m.s.n.m.,

y está distante 300m del sitio Piura, terminal del radioenlace. Su cota diferencial respecto del terminal Piura es de 27.3m.

En los dos sitios terminales del enlace de prueba, referidos, se aplicaron antenas de rejilla parabólica de 6 pies de diámetro, apoyadas sobre el nivel del terreno o piso, de modo que sus ejes se posicionaron a 1 m de altura sobre ese nivel. Adicionalmente, se realizó prueba de transmisión entre el sitio Bayóvar 1, descrito, y el propio sitio terminal Piura, pero con altura de antena 2m sobre la azotea, de nivel cuarto piso, del edificio que ocupa PETROPERU S.A. - OPERACIONES OLEODUCTO. Para efectos de diferenciación de pruebas, a este sitio se designa como Piura 2. Sus coordenadas son las mismas que las del terminal Piura, indicadas en la sección 2.2.

Los perfiles topográficos de los radioenlaces de prueba Bayóvar 1 - Piura 1, y Bayóvar 1 - Piura 2, están graficados en las Figuras N° 20 y N° 21. Adicionalmente, en el Anexo se presentan los datos numéricos para estos perfiles, para analizar en detalle la claridad relativa en cada punto de sus trayectos. Aun cuando la topografía del terreno es esencialmente la misma que la descrita en la Sección 2.3, para el radioenlace analógico Bayóvar - Piura, las diferentes alturas de antena en los terminales, determinan que estos radioenlaces de prueba, presenten distinta distribución de la claridad relativa, a lo largo de sus trayectos.

En Bayóvar 1 - Piura 1, la mitad del recorrido sobre el mar tiene claridad de espacio libre. La otra mitad, sobre terreno llano con leve ondulación, tiene claridad de valor promedio 0.3. La radiopropagación en esta segunda mitad, corresponde a la tipificada sobre tierra plana.

En Bayóvar 1 - Piura 2, la tipificación es similar a la del primer enlace de prueba descrito. Con la diferencia que, al final de la segunda mitad del recorrido, la cúpula de la catedral de Piura representa obstáculo tipo filo de cuchilla, con claridad relativa de orden  $-0.84$ . En el enlace de prueba Bayóvar 1 - Piura 2, existen pues dos tipos de difracción, primero sobre tierra plana, similar al del primer enlace, y luego en filo de cuchilla.

Las pruebas en los dos radioenlaces descritos, se realizaron el día 1/03/1991, previa prospección del sitio Bayóvar 1, que fuera realizada con ayuda de instrumentos altímetro y brújula de topógrafo. En el extremo de Bayóvar 1, se emitió señal portadora de 5.8 vatios, en la frecuencia de 381 MHz, aplicando equipo transmisor marca GRANGER ASSOCIATES, modelo 6004, serie N° 2273. En los extremos de Piura 1 y Piura 2, se detectó señal de recepción en instrumento analizador de espectro marca TEKTRONIX, modelo 7L14, con osciloscopio modelo 7603.

En Bayovar 1 y en Piura 1, se aplicaron antenas con reflector de rejilla parabólica de 6 pies de diámetro, y ganancia 16.6 dBi. En Piura 2, se aplicó antena con reflector de rejilla parabólica de 10 pies de diámetro, y ganancia 21.1 dBi. Todas las antenas fueron del fabricante MARK ANTENNAS.

El radioenlace analógico Bayóvar - Piura, descrito en las secciones 2.2 y 2.3 anteriores, es también considerado en el plan de pruebas. Se aplicaron antenas de rejilla parabólica, de diámetros 15 pies en Bayóvar y 10 pies en Piura, con ganancias 24.6 dBi y 21.1 dBi, respectivamente. Funcionaron equipos transmisores-receptores, de la misma marca y modelo arriba referidos, conectados a amplificadores de 20 watts, marca MOTOROLA.

La conexión de radiofrecuencia en recepción, incluyó dispositivo divisor de señal, para alimentación de receptores en configuración redundante. En cada terminal, se dispuso además de duplexor de radiofrecuencia, para la transferencia selectiva de señal, del transmisor hacia el cable alimentador de antena y de este último hacia el divisor de señal de recepción.

### **3.2 Estimación del Valor de $k$**

El valor de  $k$ , se define como la relación del radio de curvatura de tierra ficticia  $a_e$ , sobre la cual el haz radioeléctrico es una línea recta, al radio de la tierra real  $a$ . El valor de  $k$ , determina por lo tanto el abultamiento con que debe graficarse el perfil topográfico de un radioenlace. A valores menores de  $k$ , la curvatura de tierra ficticia es mayor, y por lo tanto el terreno se abulta más, ofreciendo menores valores de claridad.

La asignación del valor de  $k$ , para el análisis de un radioenlace, resulta por ello sustancial para su caracterización, pues para ciertos valores de  $k$ , la claridad puede ser de espacio libre, mientras que para valores de  $k$  menores, la claridad puede reducirse hasta el punto de hacer evidente la propagación por difracción sobre tierra o allende el horizonte.

Para el trazado de perfiles topográficos, la elección del valor de  $k$  está influenciado por su mínimo valor esperado en el recorrido del radioenlace, y por el requerimiento de confiabilidad del salto. Con valores bajos de  $k$ , se obtiene pronunciado abultamiento del terreno, y por lo tanto la altura de antenas debe incrementarse para asegurar cierta claridad, que haga factible al radioenlace. Para determinar el requerimiento de calidad, debe conocerse la distribución estadística de valores de  $k$ , a partir de mediciones de campo.



Tal distribución se puede relacionar a la confiabilidad del salto, al seleccionar un valor de  $k$ , que sea excedido con probabilidad de ocurrencia igual a la confiabilidad global requerida. Este criterio está enunciado en la referencia [9], páginas 337-379.

La expresión de  $k$  surge de la expresión de la curvatura de tierra ficticia, sobre la cual la propagación del frente de onda radioeléctrica sigue recorrido en línea recta. Tal curvatura se expresa como la suma algebraica de la curvatura del haz radioeléctrico en la atmósfera y de la curvatura real de la superficie terrestre:

$$1/a_e = 1/\rho + 1/a \quad (23)$$

$a_e$  = radio de tierra ficticia  
 $a$  = radio de tierra real = 6370 km  
 $\rho$  = radio del rayo en la atmósfera

Por otro lado, el análisis de la ecuación escalar de onda, da la expresión de la curvatura  $1/\rho$  en función del gradiente del índice de refracción  $n$  respecto de la altura  $h$ :

$$1/\rho = (1/n) dn/dh \quad (24)$$

De las ecuaciones ( 23 ) y ( 24 ), se obtiene:

$$k = \frac{a_e}{a} = \frac{1}{1 + (a/n)(dn/dh)} \quad (25)$$

En esta ecuación, el valor de  $n$  en la porción de atmósfera que afecta al radioenlace tiene variaciones muy pequeñas, por lo que puede tomarse su valor a nivel del suelo de 1.0003, como constante. Ello deja al gradiente del

índice de refracción, como la variable que afecta significativamente al valor de  $k$ . Al considerar la definición de refractividad,  $N=(n-1)10^6$ , y reemplazando el valor numérico del radio de la tierra  $a$ , y del índice de refracción  $n$ , se obtiene la fórmula más utilizada para el valor de  $k$ :

$$k = \frac{157}{157 + dN/dh} \quad (26)$$

$dN/dh$  = gradiente de la refractividad,  $\text{km}^{-1}$

Como puede verse, el abultamiento que el terreno le presenta al haz radio-eléctrico, en su trayecto por la atmósfera, es controlado por el gradiente de la refractividad. El valor de  $dN/dh$  en condiciones atmosféricas normales, es de aproximadamente  $-40$  unidades/km, que representa el valor al mediodía, en verano al nivel del mar, con buena movilidad de las masas de aire. Al reemplazar este valor en la fórmula ( 26 ), se obtiene el valor de  $k=4/3$ , llamado de atmósfera estándar.

El valor del gradiente de  $N$ , depende de parámetros meteorológicos como la presión atmosférica, la humedad y la temperatura, siendo esta última la de mayor influencia. El valor de  $k$ , definido por estos parámetros, prevalece en la atmósfera durante varias horas, como resultado de procesos de lenta combinación de las masas de aire, por acción de los vientos.

Debido a las distancias de decenas de kilómetros que atraviezan los radio-enlaces, la correlación entre los valores de  $k$  encontrados en la práctica, con los obtenidos a partir de la información meteorológica, es muy baja. Por ello la mejor guía para asignar el valor de  $k$ , a ser usado en el diseño de un

radioenlace, es la historia pasada y las pruebas de campo. Esta observación está planteada en la referencia [1], páginas 41-44.

El cálculo de la atenuación por difracción sobre el horizonte, realizado mediante la metodología de Longley-Rice (NBS Technical Note 101), y mediante la de Bullington, desarrollados en los apartados anteriores 2.5.1.2 y 2.5.2.2, considerando valor  $k=4/3$ , arrojan valores similares, del orden de 22 dB, para el radioenlace analógico Bayóvar - Piura. Por otro lado, el valor de atenuación por difracción, que está deducido más adelante, en la sección 3.4, a partir del mínimo nivel de recepción promedio, experimentado en el radioenlace analógico Bayóvar - Piura, desde 1991 hasta 1998., asciende a 24 dB.

El mayor valor de atenuación obtenido en la práctica, debemos atribuirlo a la existencia de un valor de  $k$  menor que el de  $4/3$ , supuesto en el cálculo. Es importante acotar que el nivel de recepción experimentado en el radioenlace Bayóvar - Piura, fue relativamente estable durante los 7 años de funcionamiento, manteniéndose por encima de -70 dBm. Tratándose de un enlace sin línea de vista, allende el horizonte, cualquier disminución del nivel de recepción, de manera consistente, durante períodos del orden de horas, como corresponde a las variaciones meteorológicas, debe atribuirse a la excursión del valor de  $k$  hacia valores menores, habida cuenta de que los equipos radiotransmisores se mantengan en condiciones operativas estables. Habiendo sido -70 dBm, el mínimo nivel de recepción experimentado, se deduce que tal valor corresponde al menor valor de  $k$  realizable en la zona que atravieza el radioenlace.

La estimación de ese valor de  $k$  mínimo, se puede practicar por procedimiento de prueba y error, aplicando el método de las tres pérdidas, descrito en el apartado 2.5.2.2. El cálculo de la atenuación por difracción sobre el horizonte de tierra esférica, se repite con valores de  $k$  sucesivamente menores que  $4/3$ , de modo de obtener valores de atenuación progresivamente mayores que 22 dB. Aquel valor de  $k$  que produzca atenuación por difracción de 24 dB, máximo deducido de la prueba de largo período, corresponderá al mínimo realizable en la zona.

Para ilustración, describimos el proceso con el valor  $k = 1.2$ . Las alturas  $h_1=33\text{m}$  y  $h_2=186.4\text{m}$ , indicadas en el perfil topográfico de la Figura N° 4, determinan nuevas distancias de horizonte, según la fórmula (20 ):

$$d_1=22.46 \text{ km}, \quad d_2=53.39 \text{ km}, \quad \text{y} \quad d_3=7.7 \text{ km}, \quad D=83.55 \text{ km}$$

Las cuales son usadas como entradas en el nomograma de la Figura N° 16, para definir las pérdidas:

$$L_1= 18.6 \text{ dB}, \quad L_2= 2.3 \text{ dB}, \quad L_3= 3.4 \text{ dB}$$

La suma de ellas arroja el valor  $L_d = 24.3 \text{ dB}$ , para la atenuación por difracción del radioenlace, que concuerda con el valor deducido de la prueba. Queda demostrado de esta manera, que el mínimo valor de  $k$  experimentado en el radioenlace es de 1.2, y por lo tanto tal valor debe tomarse como criterio de diseño en la zona geográfica comprendida entre Bayóvar y Piura. En otras palabras, la probabilidad de que el valor de  $k$  sea mayor o igual que 1.2, puede asumirse cercana al 100%.

### 3.3 Estimación de la atenuación por difracción

Procederemos a calcular la atenuación por difracción producida en los radioenlaces de prueba descritos en la sección 3.1. Considerando que el objetivo es establecer una comparación con los valores de atenuación experimentados en prueba de corto período, aplicaremos el valor de  $k=4/3$ , por ser el más probable en ocurrir. El valor de  $k=1.2$ , obtenido en el apartado anterior procede aplicar como objetivo de diseño, acorde con la confiabilidad requerida en el radioenlace, y asumiendo condiciones extremas de comportamiento de la atmósfera, detectables durante operación de largo período.

#### 3.3.1 Bayóvar 1 - Piura 1

La existencia de dos zonas diferenciadas, una como de claridad de espacio libre y otra como de difracción sobre tierra plana, identificadas en el perfil topográfico de la Figura N° 20 , sugiere la aplicación de la metodología de Bullington correspondiente, sólo en la segunda de las zonas mencionadas.

En la Figura N° 20, puede observarse la recta representativa de plano de tierra, válido exclusivamente para el rango de distancias de 45.2 km a 85.6 km. La recta se ha trazado aproximadamente paralela a la superficie general del terreno, con el criterio de que ella defina áreas por debajo del perfil, de superficie igual a la totalizada por las áreas que la recta define por encima del mismo. En base a esta selección del plano de tierra, la menor altura de antena  $h_1$ , corresponde al terminal de Piura. Asimismo, la altura de antena  $h_2$ , en el valor de distancia 45.2 km, corresponde a la diferencia

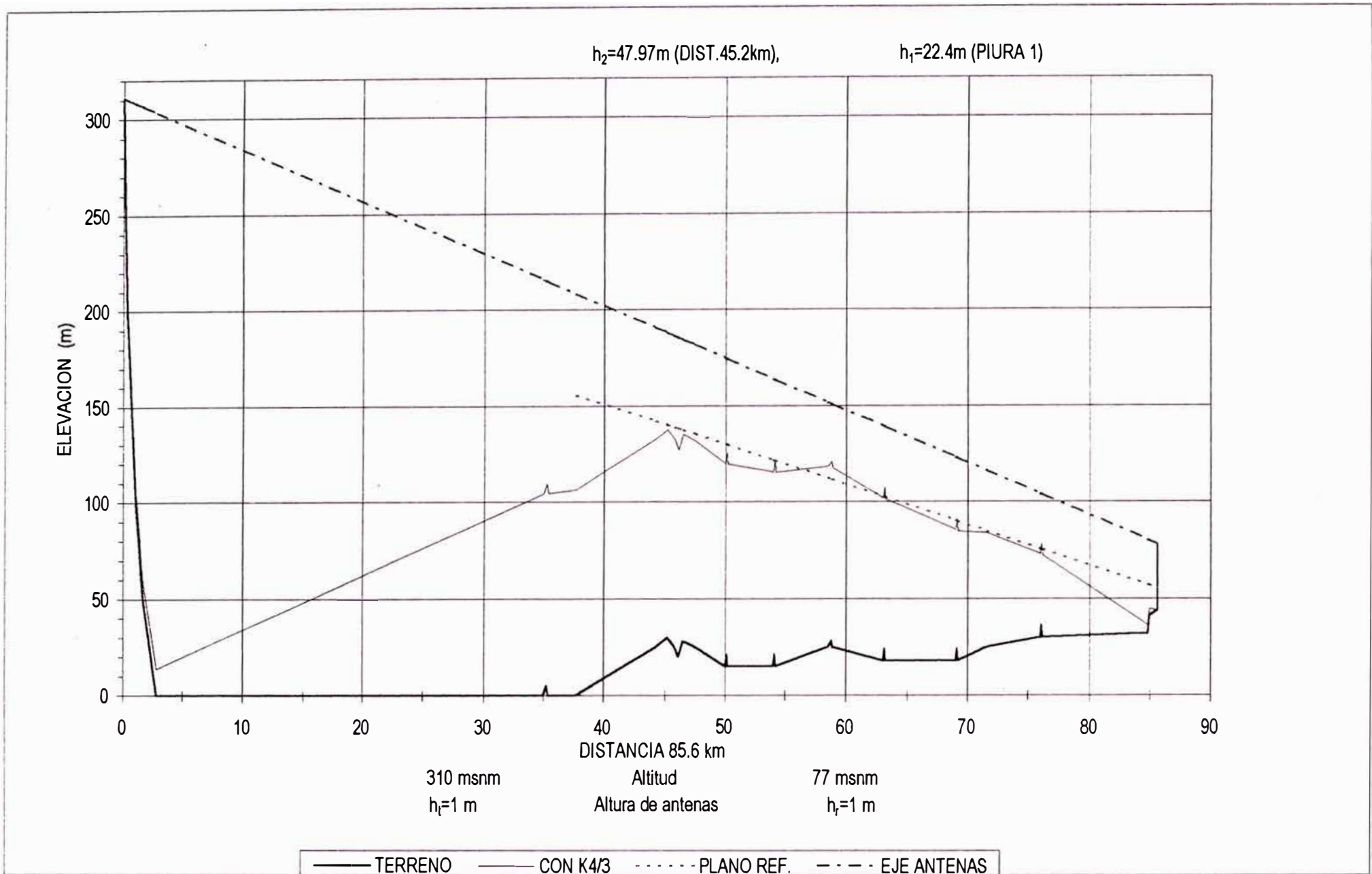


Figura N° 20 .- Perfil Topográfico del Radioenlace de Prueba, Bayóvar 1 - Piura 1

de altura entre el eje de antenas y el plano de tierra. Esta altura  $h_2$  es ficticia, puesto que ese punto está en realidad a la mitad del recorrido y no existe antena montada ahí. Este artificio, permite simular la condición de ingreso de la onda electromagnética a la zona de difracción sobre tierra plana, para estimar la atenuación producida en ella.

Los datos de entrada para aplicación del nomograma de la Figura N° 17, son:

$$h_1 = 22.4\text{m} \quad h_2 = 47.97\text{m} \quad D = 85.6 - 45.2 = 40.4 \text{ km}$$

Para estos datos, el valor de atenuación por radiopropagación, obtenido del nomograma es de:  $L_t = 124 \text{ dB}$

En la misma distancia, el valor de atenuación por radiopropagación de espacio libre, dado por la fórmula N° 2 es:

$$L_{\text{free}} = 32.5 + 20\log 381 + 20\log 40.4 = 116.24 \text{ dB}$$

Al valor de atenuación por radiopropagación del enlace, se le resta la atenuación de espacio libre, que ha sido calculada para la misma distancia en que se produce la difracción sobre tierra plana, con el objeto de deducir el componente de atenuación atribuible sólo a difracción. Tal diferencia permite separar el valor para la atenuación por difracción en tierra plana, en el radioenlace Bayóvar 1 - Piura 1, en tratamiento similar a los casos de difracción allende el horizonte de tierra esférica y en obstáculo aislado:

$$L_d = L_t - L_{\text{free}} = 124 - 116.24 = 7.76 \text{ dB}$$

### 3.3.2 Bayóvar 1 - Piura 2

Para este caso, caracterizado en la sección 3.1 anterior, con dos condiciones de difracción diferente, proyectaremos la aplicación del llamado método Wilkerson referido a la difracción en dos obstáculos aislados. El método se encuentra descrito en la referencia [7], páginas 167-171. Este método, resulta aplicable cuando el eje de antenas corta a un obstáculo, definiendo claridad relativa menor o igual que cero, y existe claridad relativa menor que 0.6, pero mayor que cero, en el otro obstáculo. El método Wilkerson establece que la atenuación total por difracción es igual a la producida por el primer obstáculo en la distancia total, más la atenuación producida por el segundo obstáculo en el tramo de distancia comprendido entre el primer obstáculo y el terminal del radioenlace, en el cual se interpone ese segundo obstáculo.

En Bayóvar 1 - Piura 2, el primer obstáculo lo constituye la cúpula de la catedral de Piura, y el segundo la tierra con leve ondulación presente entre las distancias 45.2km y 85.6km, identificados en el perfil topográfico de la Figura N° 21.

Para el cálculo de la difracción tipo filo de cuchilla en la catedral de Piura, aplicamos el método de la Technical Note 101, (apartado 2.5.1.1). Los siguientes datos se obtienen de la gráfica del perfil topográfico:

$d_2=85.6\text{km}$ ,  $d_1=0.24\text{km}$ ,  $D=85.84\text{km}$ ,  $H=13.48\text{m}$ , y  $f=0.381\text{Ghz}$

Con estos datos, la fórmula ( 4 ) define el radio de la primera zona de Fresnel en  $F_1= 13.71\text{m}$ .



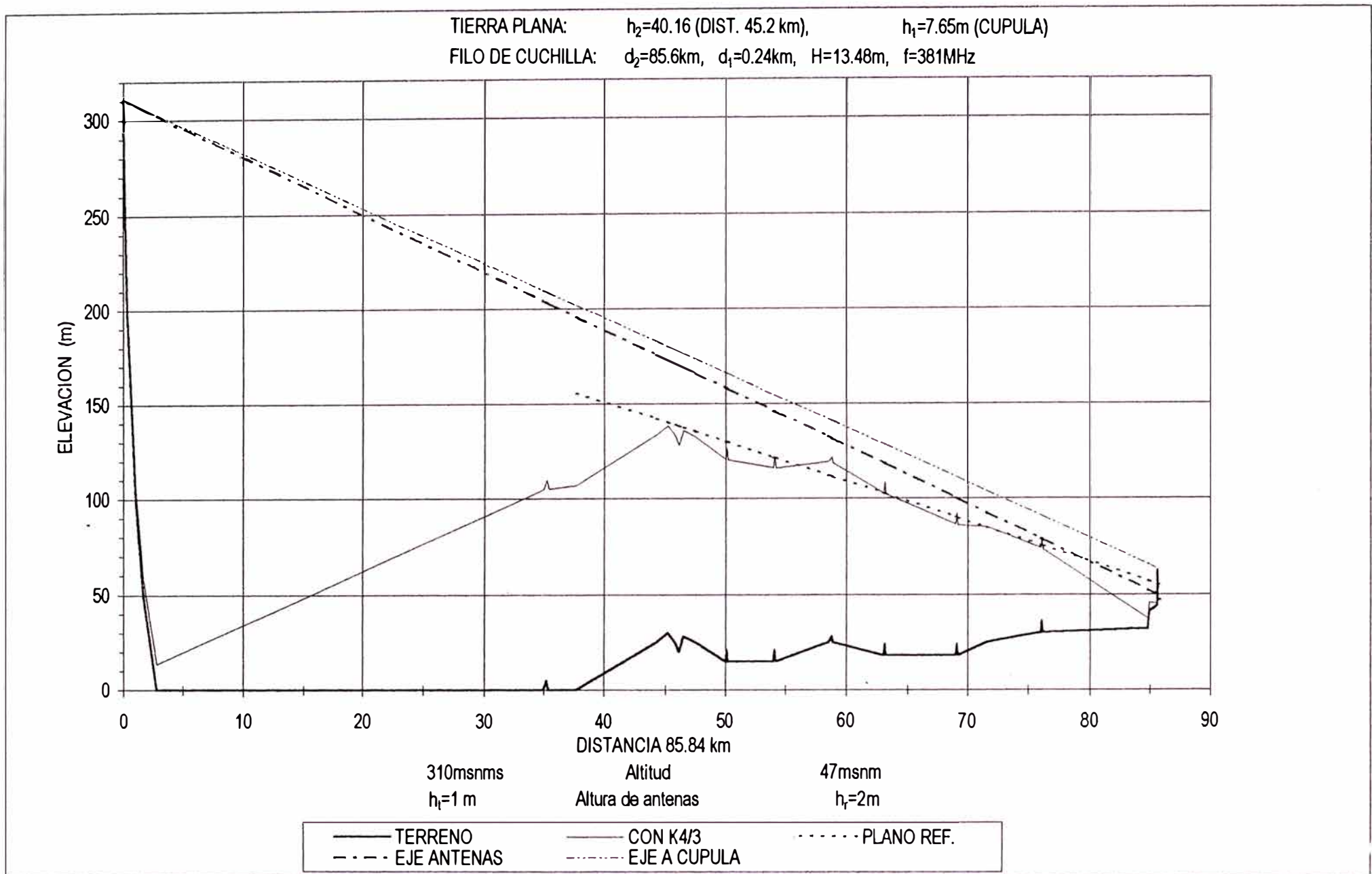


Figura Nº 21 .- Perfil Topográfico del Radioenlace de Prueba, Bayóvar 1 - Piura 2

Con este valor, la fórmula ( 11 ) arroja el siguiente resultado correspondiente al parámetro  $v$ :

$$v = \sqrt{2} (13.48/13.71) = 1.39$$

El gráfico de la Figura N° 6, permite obtener el valor de atenuación,  $A(v) = 16$  dB.

Para el cálculo de la atenuación sobre tierra plana, según Bullington (apartado 2.5.2.1), el plano de tierra usado es el mismo aplicado en el apartado 3.3.1 anterior, entre las distancias 45.2km y 85.6km, ya que el terreno es el mismo en ambos radioenlaces.

La altura menor de antena  $h_1$ , corresponde a la del ápice de la cúpula de la catedral, aumentada en el valor dado por la fórmula ( 3 ) , para valor  $k=4/3$ . Ello quiere decir que consideramos a la altura de este obstáculo predominante, como punto de recepción parcial, en donde se produce la atenuación por difracción filo de cuchilla, ya calculada. La altura de antena  $h_2$ , para la distancia 45.2 km, como se explicó en el apartado anterior, corresponde a la diferencia de altura entre el eje de antenas y el plano de tierra. Esta altura  $h_2$  es ficticia, puesto que ese punto está en realidad a la mitad del recorrido y no existe antena montada ahí. Este artificio, permite simular la condición de ingreso de la onda electromagnética a la zona de difracción sobre tierra plana. Los parámetros de entrada para aplicación del nomograma de la Figura N° 17, son:

$$h_1 = 7.65\text{m}, \quad h_2 = 40.16\text{m}, \quad D = 40.4 \text{ km}$$

El valor de atenuación por radiopropagación, obtenido del nomograma es de:  $L_t = 135$  dB, el cual puede suponerse resultante de la suma de un término relativo a la propagación en espacio libre, correspondiente a la distancia del tramo, más otro término relativo a difracción exclusivamente, correspondiente a las alturas de antenas sobre el plano de tierra y también a la distancia del tramo. Ello permite separar el término relativo a difracción, en tratamiento similar a los casos de difracción allende el horizonte de tierra esférica, y en obstáculo aislado.

Al valor de atenuación por radiopropagación, se le resta la atenuación de espacio libre, ya obtenida en el apartado anterior,  $L_{free} = 116.24$  dB, calculada para la misma distancia en que se produce la difracción sobre tierra plana, con el objeto de deducir el componente de atenuación atribuible sólo a difracción. Tal diferencia arroja el siguiente valor para la atenuación por difracción en tierra plana:

$$L_d' = L_t - L_{free} = 135 - 116.24 = 18.76 \text{ dB}$$

La atenuación por difracción total en el radioenlace,  $L_d$ , se obtiene de la suma de las atenuaciones para los dos tipos de difracción calculados:

$$L_d = A(v) + L_d' = 16 + 18.76 = 34.76 \text{ dB}$$

### 3.3.3 Resumen de Valores Estimados

Los valores de atenuación calculados en los dos apartados anteriores, junto con el valor de atenuación para el enlace analógico Bayóvar - Piura, estimado en el apartado 2.5.2.2 del capítulo anterior, se presentan en la Tabla Nº 6 , siguiente. Estos valores corresponden a la aplicación del valor  $k=4/3$  en los procedimientos de estimación.

Tabla N° 6 .- Valores de Atenuación por Difracción Estimados, para los Radioenlaces de Prueba

RADIOENLACE DE PRUEBA	ATENUACION POR DIFRACCION, ESTIMADA (k=4/3) dB
BAYOVAR – PIURA ANALOGICO	22.3
BAYOVAR 1 - PIURA 1	7.76
BAYOVAR 1 - PIURA 2	34.76

### 3.4 Registros de Niveles de Recepción

Los niveles de recepción promedio, registrados en los radioenlaces de prueba, se indican en la Tabla N° 7. Cabe destacar que se observaron fluctuaciones de los niveles de recepción, de corta duración, del orden de segundos, en amplitudes menores que  $\pm 2$ dB, respecto de los valores listados.

Tabla N° 7 .- Niveles de Recepción registrados en los Radioenlaces de Prueba

RADIOENLACE DE PRUEBA	NIVEL DE RECEPCION dBm
PIURA - BAYOVAR	-70
BAYOVAR 1 - PIURA 1	-64
BAYOVAR 1 - PIURA 2	-82

Los datos presentados sirven, para deducir los valores de atenuación por difracción realmente producidos en cada uno de los radioenlaces, los que a su vez son referencia para establecer el grado de precisión de los métodos aplicados en secciones anteriores.

El nivel de portadora recibida, en función de las ganancias y atenuaciones presentes en el radioenlace, viene dado por la siguiente ecuación:

$$C = -L_{free} - L_d - L_f - L_{du} - L_m + P_t + (G_t + G_r) \quad (27)$$

$C$  = nivel de portadora recibida, dBm

$L_{free}$  = atenuación por propagación en espacio libre, dB  
 $= 32.5 + 20\log f + 20\log D$   
 $f$  = frecuencia de operación, MHz  
 $D$  = distancia del radioenlace, km

$L_d$  = atenuación por difracción, dB

$L_f$  = atenuación de alimentadores de antena, dB

$$= l_t \times \alpha_t + l_r \times \alpha_r$$

$l_t, \alpha_t$  = longitud (m), atenuación (dB/m), de alimentador de antena en transmisión

$l_r, \alpha_r$  = longitud (m), atenuación (dB/m), de alimentador de antena en recepción

$\alpha_t$  o  $\alpha_r$  = 0.1476 dB/m en Bayóvar 1 (coaxial RG-8A/U)  
 0.0256 dB/m en Piura 1, Piura 2 y Piura (coaxial 7/8")  
 0.0158 dB/m en Bayóvar (coaxial 1 5/8")

$L_{du}$  = atenuación en duplexores, dB

$$= L_{dubx} + L_{durx} + L_{divrx}$$

$$= 2.5 + 2 + 3 = 7.5\text{dB (sólo en Piura-Bayóvar)}$$

$L_{dubx}, L_{durx}$  = atenuación del duplexor en transmisión y en recepción

$L_{divrx}$  = atenuación del divisor de señal en recepción

$L_m$  = atenuaciones misceláneas, dB

$$= 2 \text{ dB}$$

$P_t$ = potencia del transmisor, dBm  
 = 43 dBm (20watts) en Piura-Bayóvar  
 = 37.63 dBm (5.8watts) en Bayóvar 1

$G_t$ = ganancia de antena transmisora, dBi  
 = 16.6 dBi ( $6'\phi$ ), en Bayóvar 1  
 = 24.6 dBi ( $15'\phi$ ), en Bayóvar

$G_r$ = ganancia de antena receptora, dBi  
 = 16.6 dBi ( $6'\phi$ ), en Piura 1  
 = 21.1 dBi ( $10'\phi$ ), en Piura 2 y Piura

Dando los valores numéricos indicados a los términos de la ecuación ( 27 ), se obtienen los valores de atenuación por difracción  $L_d$ , listados en la Tabla N° 8 .

Tabla N° 8.- Datos Numéricos para el Cálculo de los valores de Atenuación por Difracción en los Radioenlaces de Prueba

PARAMETRO	PIURA - BAYOVAR	BAYOVAR 1 - PIURA 1	BAYOVAR 1 - PIURA 2
C (dBm)	-70	-64	-82
f (MHz)	400	381	381
D (km)	83.55	85.6	85.84
$L_{free}$ (dB)	122.98	122.76	122.79
$l_t$ (m)	56	5	5
$l_r$ (m)	52	12	12
$L_f$ (dB)	2.21	1.045	1.045
$L_{du}$ (dB)	7.5	-	-
$L_m$ (dB)	2	2	2
$P_t$ (dBm)	43	37.63	37.63
$G_t$ (dB)	24.6	16.6	16.6
$G_r$ (dB)	21.1	16.6	21.1
<b><math>L_d</math> (dB)</b>	<b>24</b>	<b>9.025</b>	<b>31.49</b>

Los valores de atenuación estimados, listados en la Tabla N° 6, y los deducidos de las pruebas, listados en la última fila de la Tabla N° 8, demuestran buena aproximación. En la Tabla N° 9 , siguiente, se listan comparativamente ambos juegos de valores, indicándose la desviación incurrida en la estimación. Si se toma en cuenta que es normal encontrar fluctuaciones del nivel de recepción del orden de  $\pm 2$ dB en mediciones de campo, se puede afirmar que los métodos de estimación aplicados producen resultados en concordancia con la experiencia.

Tabla N° 9.- Comparación de Valores de Atenuación Experimentales con los Estimados

RADIOENLACE DE PRUEBA	ATENUACION POR DIFRACCION (dB)		
	PRUEBA	ESTIMADA	DESVIACION
PIURA-BAYOVAR	24	22.3	-1.7
BAYOVAR 1-PIURA 1	9.025	7.76	-1.265
BAYOVAR 1-PIURA 2	31.49	34.76	+3.27

## **CAPITULO IV DISEÑO DEL RADIOENLACE**

En el presente Capítulo se enfoca el diseño del radioenlace digital Bayóvar-Piura, teniendo como partida a los requerimientos operativos expuestos en la sección 1.4 del Capítulo I. El procedimiento de diseño seguido, corresponde a la práctica aceptada en la Ingeniería de Radiocomunicación, presentada en la referencia [9], páginas 424-433. Basado en él, se determina el mayor valor permisible para la atenuación por difracción, relativo a los criterios de diseño asignados y a las características técnicas preestablecidas para los equipos de radiotransmisión. El procedimiento se complementa luego, con los desarrollos de los capítulos II y III anteriores, para proceder a determinar la altura de antena en el terminal de Bayóvar, tomando en cuenta el requerimiento operativo de limitar, la altura de torre en el terminal de Piura, a 25m sobre nivel de cuarto piso. Finalmente, se describe la composición del equipamiento, su interconexión y los aspectos de establecimiento de los servicios hacia los usuarios.

### **4.1 Criterios de Diseño**

El diseño del radioenlace Bayóvar - Piura, se ha basado en los criterios enunciados a continuación.

**4.1.1** Para la relación del radio de curvatura del rayo en la atmósfera, al radio de la tierra, se aplicará el valor  $k=1.2$ . Ello resulta de la estimación



practicada en los estudios de campo, descrita en la sección 3.2, del capítulo anterior.

**4.1.2** La tasa de bitios errados (BER) para la transmisión digital, no excederá el valor de  $10^{-6}$ , con una confiabilidad de 99.99%.

La elección del valor  $BER = 10^{-6}$ , como máximo valor tolerable (umbral práctico), para definir la confiabilidad de sistema, guarda relación con los niveles de BER requeridos para la operación eficaz de procesadores de datos o equipos digitales que establecerán comunicación. Tal valor es evidentemente, más exigente que  $BER = 10^{-3}$ , usado en las recomendaciones G.821 del CCITT y N° 557 del CCIR, para definir la condición de sistema inoperativo. Por otro lado, la confiabilidad de 99.99% asignada, referida a la probabilidad de desvanecimiento de la señal radioeléctrica en la atmósfera, resulta superior al valor 99.98% que se asignaría a la distancia de 83.55 km que media entre Piura y Bayóvar, de conformidad con la recomendación del CCIR N° 594 (modificada en Mayo de 1984). Tal recomendación establece, para circuito hipotético de referencia de 2500 km, que el BER será mayor que  $10^{-6}$  en no más que 0.4% de cualquier mes, promediado en intervalos de 1 minuto; y será mayor que  $10^{-3}$  en no más que 0.054% de cualquier mes, promediado en intervalos de 1 segundo.

## **4.2 Cálculos de Radiopropagación**

### **4.2.1 Confiabilidad**

La confiabilidad asignada en el criterio 4.1.2, expresa la probabilidad, o porcentaje de tiempo, que el radioenlace experimente desvanecimiento, por debajo del umbral de recepción. El desvanecimiento consiste en la variación

del nivel de recepción en el tiempo, debido a cambios en las condiciones atmosféricas. Existen dos tipos generales de desvanecimiento, conocidos como desvanecimiento de potencia, y desvanecimiento por multicamino en la atmósfera.

El desvanecimiento de potencia, se caracteriza por variar lentamente en el tiempo y ser independiente de la frecuencia. Es causado principalmente por variaciones en el gradiente de la refractividad, a lo largo del espacio que separa a los terminales del radioenlace, determinando cambio en el valor de  $k$ . Ello provoca variación en la curvatura del rayo, o en otras palabras, variación en el abultamiento del terreno, que afecta la claridad de la primera zona de Fresnel. Como se explicó en la sección 3.2 del capítulo anterior, se previene la existencia de desvanecimiento de potencia, al seleccionar un valor de  $k$  cuyo valor sea excedido con probabilidad de ocurrencia igual a la confiabilidad global requerida. El valor de  $k=1.2$ , elegido en el criterio 4.1.1, se ha identificado como el mínimo valor experimentado en la prueba, de largo período, del radioenlace analógico Bayóvar - Piura. Al aplicarlo en el diseño del radioenlace, se asume que no se producirán desvanecimientos de potencia para el nivel de recepción calculado, puesto que no se espera experimentar valores inferiores de  $k$ .

El desvanecimiento por multicamino en la atmósfera, se debe a interferencia destructiva entre el rayo directo y uno o más rayos refractados o reflejados. Estos caminos múltiples tienen diferentes longitudes, y por lo tanto diferentes ángulos de fase al arribar a la antena. Tales componentes varios, se suman para producir desvanecimientos de corta duración y selec-

tivos a la frecuencia. Desvanecimientos profundos ocurren cuando el rayo primario y el secundario son iguales en amplitud pero opuestos en fase, produciendo cancelación de la señal. Es respecto a este tipo de desvanecimiento que se establece el objetivo de confiabilidad  $R=99.99\%$ , el cual equivale a 8.6 segundos de interrupción al día, o 4.3 minutos al mes, o 53 minutos al año.

El valor de confiabilidad  $R$  expresa, en porcentaje, la probabilidad de que las comunicaciones no se interrumpan. El análisis estadístico del desvanecimiento por multicamino en la atmósfera, aplica para el mismo concepto, probabilidad fraccional  $A$  (de módulo 1), llamada disponibilidad. La relación entre disponibilidad y confiabilidad, se da por  $R=100A$ . Así, la disponibilidad indicada por el criterio 4.1.2, tiene el valor  $A=0.9999$ .

#### **4.2.2 Margen de Desvanecimiento**

La indisponibilidad  $U$  de un radioenlace, definida por  $U=1-A$ , es la probabilidad de ocurrencia de desvanecimiento, por debajo del nivel de umbral; en otras palabras, es la probabilidad de corte de las comunicaciones. El nivel de umbral, es el nivel de señal de recepción correspondiente a la máxima tasa de bitios errados BER aceptable; teniendo esta última el valor  $10^{-6}$ , según el criterio 4.1.2. La diferencia entre el nivel normal de señal recibida y el nivel de umbral, es el margen de desvanecimiento  $M$ .

La distribución probabilística de los valores de desvanecimiento en la atmósfera, sigue la distribución de Rayleigh. Del análisis de ella, y de datos

experimentales, W.T. Barnett, en su artículo "Multipath Propagation at 3, 6 and 11 GHz", Bell System Technical Journal 51(2), de Febrero 1972, páginas 321-361, desarrolló la fórmula para la indisponibilidad, designada  $U_{ndp}$ , o también llamada probabilidad de corte anual sin diversidad. En la referencia [9], se presenta la siguiente expresión para tal fórmula:

$$U_{ndp} = a \times b \times 6 \times 10^{-7} \times f \times D^3 \times 10^{-M/10} \quad (28)$$

$U_{ndp}$  = probabilidad de corte =  $1 - 99.99/100 = 0.0001$

a= factor de terreno:2 en Piura-Bayóvar (llano con leve ondulación)

b= factor de clima:0.5 en Piura-Bayóvar (caluroso, algo húmedo)

f= 0.4 GHz

D= distancia del enlace = 83.55 km

M= margen de desvanecimiento en dB

Los valores numéricos indicados para los parámetros, corresponden al radioenlace Bayóvar-Piura. Con ellos, la fórmula arroja el valor para el margen de desvanecimiento de  $M = 31.46$  dB.

#### 4.2.3 Nivel de Portadora Recibida

Por definición, el margen de desvanecimiento M, el nivel de portadora recibida C, y el nivel de umbral de recepción TH (referido a  $BER = 10^{-6}$ ), se relacionan por:

$$M = C - TH \quad (29)$$

C = nivel de portadora recibida

TH= -95 dBm, Umbral de equipo, marca MDS, modelo LEDR 400S-256kbps, para  $BER=10^{-6}$

M = 31.46 dB, margen calculado en apartado 4.2.2

De ahí se obtiene el valor de  $C = -63.54$  dBm, que se aplica en la ecuación (27), presentada en la Sección 3.4.

$$C = -L_{free} - L_d - L_f - L_{du} - L_m + P_t + (G_t + G_r) \quad (27)$$

C = nivel de portadora recibida, dBm

$L_{free}$  = atenuación por propagación en espacio libre, dB  
 $= 32.5 + 20\log f + 20\log D$   
 $f = 400$  MHz, frecuencia de operación  
 $D = 83.55$  km, distancia del radioenlace

$L_d$  = atenuación por difracción, dB

$L_f$  = atenuación de alimentadores de antena, dB

$$= l_t \times \alpha_t + l_r \times \alpha_r$$

$l_t = 80$  m, longitud de alimentador de antena en Bayóvar, para torre de 70m de altura

$l_r = 35$  mm, longitud de alimentador de antena en Piura, para torre de 25m de altura

$\alpha_t = 0.0158$  dB/m (coaxial 1 5/8")

$\alpha_r = 0.0256$  dB/m (coaxial 7/8")

$L_{du}$  = atenuación en duplexores, dB

$$= L_{dubx} + L_{durx} = 2.5 + 2.5 = 5 \text{ dB}$$

$L_m$  = atenuaciones misceláneas, dB

$$= 2 \text{ dB}$$

$P_t$  = potencia del transmisor, dBm

$$= 46 \text{ dBm (40watts)}$$

$G_t$  = ganancia de antena transmisora, dBi

$$= 24.6 \text{ dBi (15'\phi), en Bayóvar}$$

$G_r$  = ganancia de antena receptora, dBi

$$= 21.1 \text{ dBi (10'\phi), en Piura}$$

Dando los valores numéricos indicados a los términos de la ecuación (27), se puede obtener el valor de atenuación por difracción  $L_d$ , como se indica en la Tabla N° 10.

Tabla N° 10 .- Datos Numéricos para el Cálculo del valor de Atenuación por Difracción en el Radionlace Digital Bayóvar-Piura

PARAMETRO	VALOR
C (dBm)	-63.54
f (MHz)	400
D (km)	83.55
L <sub>free</sub> (dB)	122.98
l <sub>t</sub> (m)	80
l <sub>r</sub> (m)	35
L <sub>f</sub> (dB)	2.16
L <sub>du</sub> (dB)	5
L <sub>m</sub> (dB)	2
P <sub>t</sub> (dBm)	46
G <sub>t</sub> (dB)	24.6
G <sub>r</sub> (dB)	21.1
L <sub>d</sub> (dB)	23.1

#### 4.2.4 Resultados

Los cálculos de radiopropagación efectuados, permiten concluir que para cumplir con el criterio de confiabilidad  $R=99.99\%$ , enunciado en el apartado 4.1.2, la difracción producida, no deberá ser mayor que  $L_d=23.1$  dB. La atenuación por difracción indicada, siendo menor que el valor 24 dB, experimentado en el enlace de prueba Bayóvar - Piura, implica que la altura de antena en Bayóvar deberá ser mayor que la permitida por la torre de 48.7m existente en ese terminal.

Procederemos a estimar la altura de antena requerida en Bayóvar. En la Figura N° 22, está graficado el perfil topográfico del radioenlace Digital Bayóvar - Piura, indicándose la elevación adicional de las cotas considerando  $k=1.2$ , conforme a lo enunciado en el criterio 4.1.1. Para mayor detalle en el análisis de la claridad relativa, en el Anexo se presentan los datos numéricos del perfil graficado. Como regla práctica, se asume que el enlace sobre tierra esférica con eje de antenas rasante, presenta atenuación por difracción del orden de 20 dB. La atenuación requerida de 23 dB, siendo mayor, permite deducir que la caracterización del radioenlace, será de difracción por claridad negativa sobre tierra esférica, lo cual se confirma de la observación del perfil topográfico.

El plano de tierra es el mismo elegido que en el enlace de prueba Bayóvar - Piura, y determina altura  $h_1= 30.29$  m, correspondiente al terminal Piura. El valor de  $h_2$  lo obtendremos por proceso de prueba y error, de modo de lograr la atenuación por difracción de 23.1 dB requerida. Asumimos primeramente una altura  $h_2=200$ m, es decir 13.6m mayor que

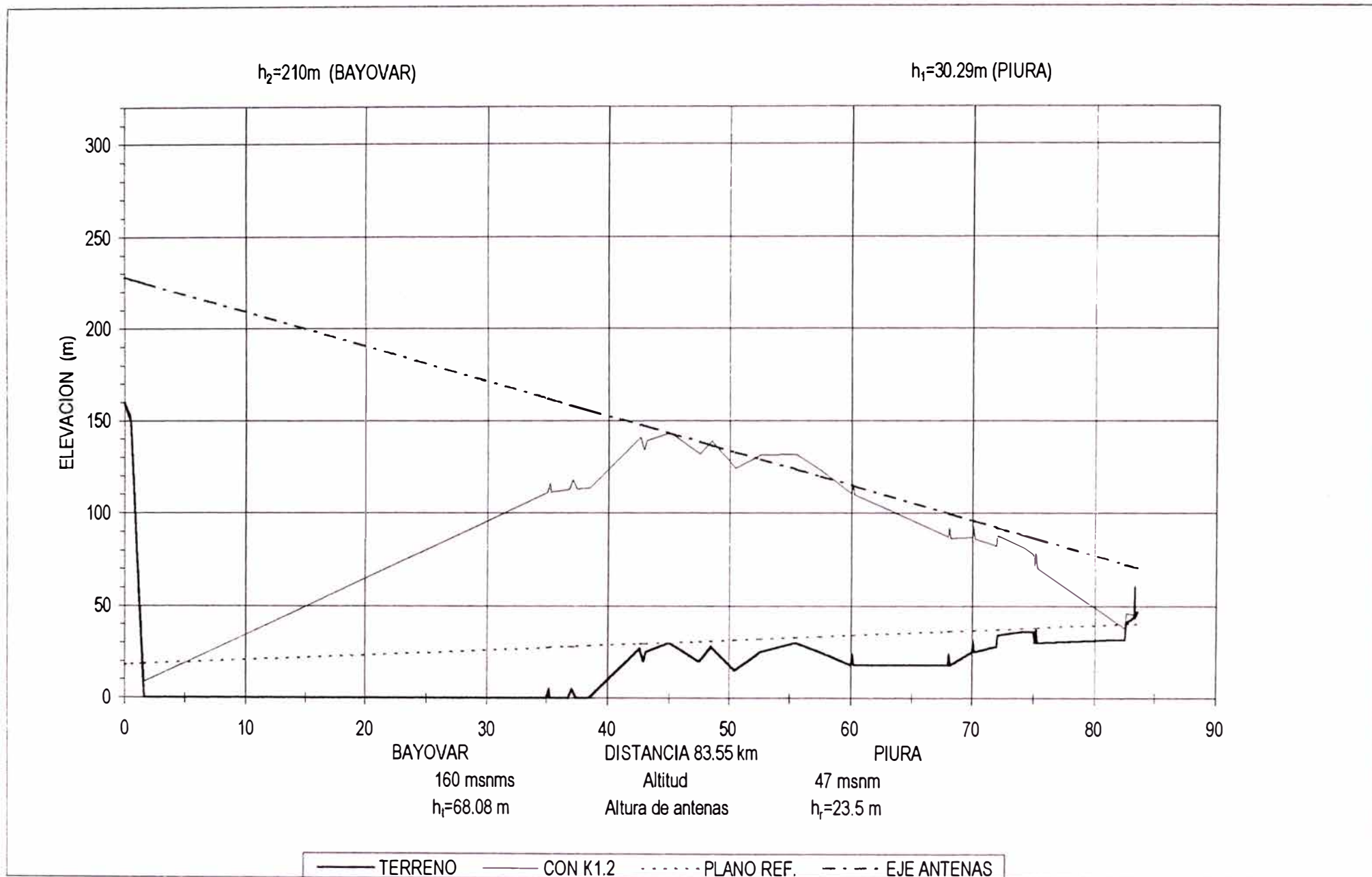


Figura N° 22.- Perfil Topográfico del Radioenlace Digital Bayóvar-Piura



la altura de antena en el enlace de prueba Bayóvar-Piura. Las distancias de horizonte, usando  $k=1.2$ , resultan ser:

$$d_1 = 21.52\text{km}, \quad d_2 = 55.3\text{km}, \quad d_3 = 6.73 \text{ km}, \quad \text{y} \quad D = 83.55\text{km}$$

Del nomograma de Figura N° 16 , se obtienen las atenuaciones parciales:

$$L_1 = 18.6\text{dB}, \quad L_2 = 2.25\text{dB}, \quad L_3 = 2.9\text{dB}$$

La atenuación por difracción total resulta  $L_d = 23.75 \text{ dB}$ , que es algo superior al objetivo de  $23.1 \text{ dB}$ . Proseguimos con otro cálculo de prueba para el valor  $h_2=210\text{m}$ , para obtener las nuevas distancias de horizonte:

$$d_1 = 21.52\text{km}, \quad d_2 = 56.67\text{km}, \quad d_3 = 5.36 \text{ km}, \quad \text{y} \quad D = 83.55\text{km}$$

Las tres atenuaciones parciales son ahora:

$$L_1 = 18.6\text{dB}, \quad L_2 = 2.2\text{dB}, \quad L_3 = 2.23\text{dB}$$

La nueva atenuación por difracción total es ahora,  $L_d = 23.03 \text{ dB}$ , valor que cumple con el objetivo de ser menor que  $23.1 \text{ dB}$ .

La altura de antena en Bayóvar sobre el nivel del mar, se obtiene sumando la altura  $h_2 = 210\text{m}$  más la altura del plano de tierra, que según la gráfica de Figura N° 20 es de  $18.08 \text{ m.s.n.m}$ . La altitud de la antena en Bayóvar será entonces de  $228.08 \text{ m.s.n.m}$ . La altura de la antena sobre el terreno, es la diferencia entre la altitud indicada y la cota del terreno de  $160 \text{ m.s.n.m}$ . en el terminal de radio Bayóvar. La altura de antena sobre el terreno resulta ser de  $68.08 \text{ m}$ , lo cual define una altura de torre de  $70\text{m}$  en

Bayóvar.

Los resultados de los Cálculos de Radiopropagación efectuados, que definen el dimensionamiento de los equipos que se aplicarán en el radioenlace digital Bayóvar - Piura, se resumen en la Tabla N° 11. Cabe destacar que, a diferencia del procedimiento de diseño aplicado en radioenlaces con claridad de espacio libre, donde las alturas de antenas quedan determinadas con la aplicación del criterio de claridad relativa mayor que 0.6, en el radioenlace por difracción las alturas de antenas son parámetros materia de cálculo, que intervienen en la obtención de los objetivos de diseño, conjuntamente con las ganancias y pérdidas de los elementos de radiotransmisión, transmisor, receptor, antenas, etc.

Tabla N° 11.- Dimensionamiento de equipos conformantes del Radioenlace Digital Bayóvar-Piura

ITEM	PARAMETRO	VALOR
1	Frecuencia de operación	400 MHz
2	Capacidad de transmisión	256 kbps
3	Umbral de recepción, BER=10 <sup>-6</sup>	-95 dBm
4	Potencia de transmisión	46dBm (40w)
5	Ganancia de antena en Bayóvar	24.6 dBi (15'φ)
6	Ganancia de antena en Piura	21.1 dBi (10'φ)
7	Altura de torre, sobre terreno en terminal Bayóvar	70m
8	Altura de torre, sobre nivel 4to piso, Oficina PETROPERU en Piura	25m

### **4.3 Configuración de Sistema**

Para el establecimiento del radioenlace digital Bayóvar-Piura, así como de los servicios que funcionarán a través de él, se requiere de la operación de equipos específicos, con capacidades y parámetros de operación compatibles entre sí. En la Figura N° 23 , se ilustra la configuración del sistema de telecomunicaciones propuesto, cuyo enfoque conceptual se describe en la presente sección.

El sistema consiste en un radioenlace digital, en la banda de frecuencias de 400 MHz y capacidad 256 kbps. Su configuración será redundante, 1+1, realizable, de manera autónoma, en cada uno de los bloques principales indicados en la Figura N° 23: Amplificador, Transmisor-receptor y Multiplexor. En el Capítulo I, sin embargo, para efectos de comparación económica, se han considerado como no equipados los módulos redundantes de cada bloque, en lo que sería etapa inicial de implantación.

#### **4.3.1 Equipos de Transmisión**

Los equipos transmisores-receptores UHF digitales requeridos, son catalogados como de baja velocidad, sin trama digital, y se encuentran disponibles comercialmente desde 1990. Su buen rendimiento ha sido probado en numerosos radioenlaces instalados a nivel mundial. Sucesivas innovaciones en los tipos de modulación aplicados, han llevado a los fabricantes a desarrollar productos de gran eficiencia y flexibilidad, en cuanto a la relación entre velocidad de transmisión y ancho de banda. De manera que en la actualidad, existen transmisores-receptores con capacidad expandible desde 64 hasta 768 kbps, para operación en canal de 200 KHz

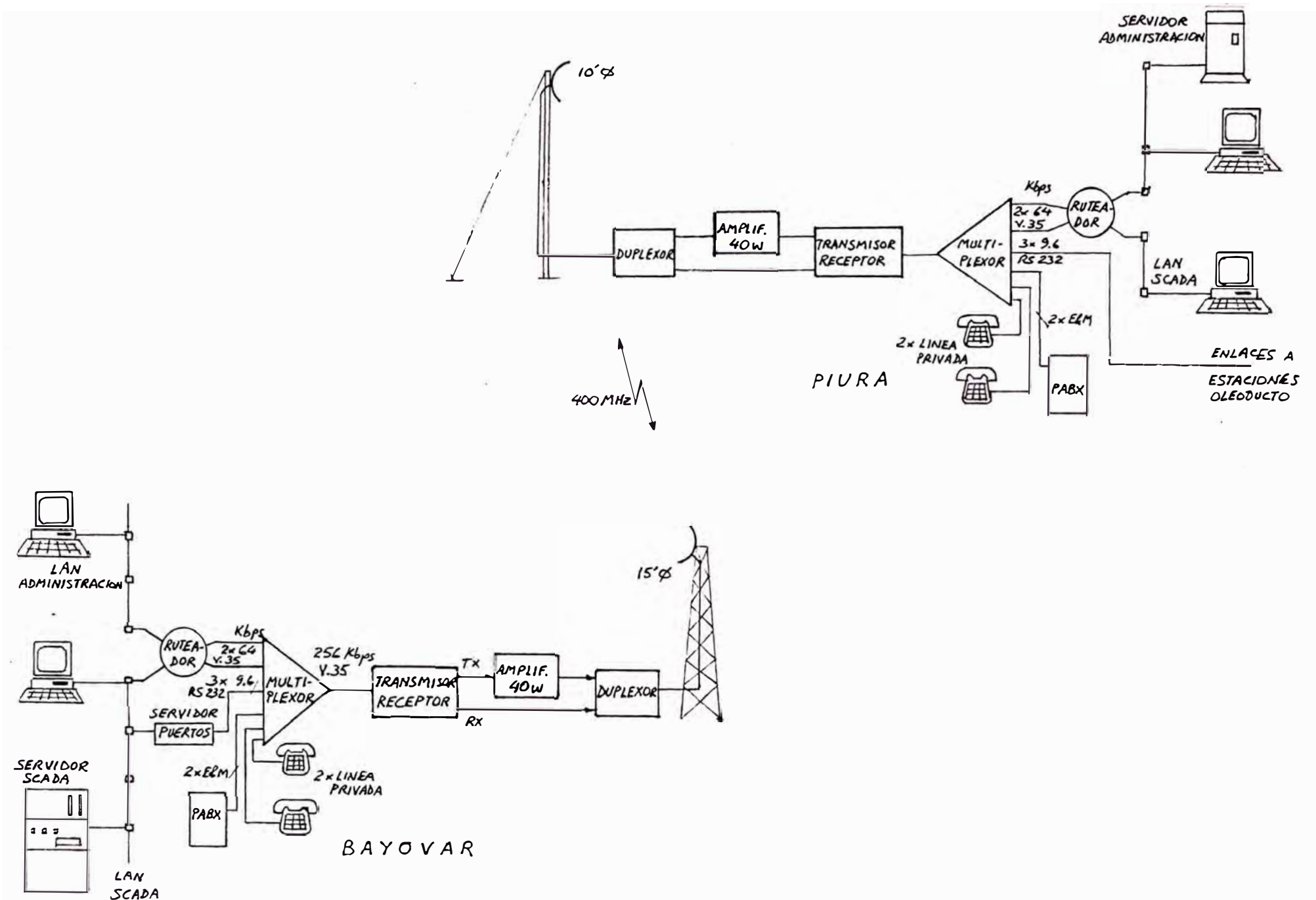


Figura N° 23.- Configuración del Sistema de Telecomunicaciones Bayóvar - Piura

de ancho de banda. Estos desarrollos han devenido también en la obtención de excelente sensibilidad del orden de  $-95$  dBm, muy apropiada para el establecimiento de radioenlaces de gran distancia o con obstrucciones a la línea de vista.

Los tipos de modulación usados son, por corrimiento de frecuencia FSK, por amplitud en cuadratura QAM de 16 o 32 niveles, o por corrimiento de fase en cuadratura QPSK. Adicionalmente se dispone de algoritmos de corrección de errores FEC. La potencia de transmisión se ofrece de 1 watt o 5 watts, con posibilidad de regulación del nivel de potencia a valores menores. Los equipos de radio incorporan además, facilidades de configuración y diagnóstico, mediante computador personal conectado a puerto de datos asincrónico, o mediante protocolo SNMP para acceso por puerto de red ETHERNET. Estas facilidades son muy ventajosas para las labores de puesta en funcionamiento y mantenimiento de los equipos, limitando la aplicación de instrumentos de medición sólo para casos inusuales. Se aplicará interfaz V.35 para conexión del transmisor-receptor hacia el multiplexor digital.

Los cálculos de radiopropagación efectuados han definido la aplicación de amplificadores de potencia de 40 watts, para ciclo de trabajo continuo. Estos equipos también se encuentran disponibles y con muchos años de operación en instalaciones. Los niveles de potencia comunmente ofrecidos comercialmente, para la banda de 400 MHz, son: 10, 20, 40, y 100 watts.

Los multiplexores digitales para voz y datos, aplican técnica de división de tiempo TDM, en bajas velocidades, con valores seleccionables, que van

desde 19.2 kbps hasta 2048 Kbps. Las capacidades de canal ofrecidas por estos equipos, son variables según el fabricante; por lo general operan hasta un máximo de 12 canales de voz, y 16 canales de datos.

Los multiplexores digitales aplican técnicas avanzadas de compresión de voz, para transformar las señales analógicas de la voz o facsímil, a su representación equivalente digital de muy baja velocidad, como de 4.8 kbps, 8 kbps, o 9.6 kbps. De esta manera muchos canales de voz, pueden ser multiplexados conjuntamente con otros canales de datos, para producir una señal digital compuesta bidireccional. En el otro extremo del enlace, los canales de voz son descomprimidos y separados hacia sus módulos de interconexión, al igual que los canales de datos son dirigidos a sus respectivos puertos.

Los canales de voz pueden ser configurados para operación en diversos tipos de conexión telefónica, como son: abonado extendido (FXS/FXO), enlace "tie line" entre centrales telefónicas, o teléfono punto a punto "ring down". Similarmente los canales de datos pueden ser configurados para operar en todas las velocidades usualmente aplicadas, tanto asincrónicamente como sincrónicamente, y en interfaces RS-232 o V.35. También los multiplexores incorporan facilidades de configuración y diagnóstico, mediante computador personal conectado a puerto de datos asincrónico, o mediante protocolo SNMP para acceso por puerto de red ETHERNET.

Se estima que para las operaciones de PETROPERU S.A. en Piura y Bayóvar, se requerirán habilitar 4 canales de voz, distribuidos de la siguiente manera:

- 2 canales, codificados a 9.6kbps, para teléfonos punto a punto dedicados a las coordinaciones de operación, mantenimiento y de movimiento de crudo del Oleoducto Norperuano.
- 2 canales, codificados a 5.3kbps, para interconexión "tie line" de las centrales telefónicas existentes en Piura y Bayóvar, y que cursarán el tráfico administrativo.

La distribución de canales de datos, estará relacionada a la topología que adoptará un futuro Sistema de control SCADA del Oleoducto, según se explica en la sección 4.3.2 siguiente. La capacidad de transmisión será apta para establecer los siguientes canales:

- 3 canales, a 9.6 kbps asincrónicos, para el acceso de datos del centro de control SCADA, hacia 3 grupos de estaciones de bombeo del Oleoducto: Occidente, Oriente y Ramal Norte. Dentro de un grupo el acceso a cada estación de bombeo, será del tipo compartido.
- 1 canal de datos a 64 kbps sincrónico, para acceso entre las redes LAN de estaciones de trabajo, dedicadas al Sistema de control SCADA del Oleoducto, que funcionarán en Piura y Bayóvar.
- 1 canal de datos a 64 kbps sincrónico, para acceso entre redes LAN de computadoras personales en Piura y Bayóvar, usadas para comunicación administrativa de la empresa.
- 1 canal de datos a 64 kbps sincrónico, de respaldo, para el acceso entre redes LAN dedicadas al Sistema de Control.

La capacidad agregada neta de los puertos de voz y datos indicados, asciende a 250.6 kbps. Si consideramos un "overhead", o gasto extra de

camino para la trama TDM, del orden de 8 kbps, la capacidad usada excede en 2.6 kbps a la velocidad de 256 kbps, establecida en el radioenlace. Sin embargo, aplicando la facilidad de asignación dinámica de ancho de banda, disponible en los multiplexores, será posible destinar el ancho de banda de los canales de voz inactivos, de manera instantánea, al canal de datos de respaldo. Ello equivale a disminuir la capacidad total usada en por lo menos 5.6 kbps, con lo que se logra saldar, eventualmente, el déficit de 2.6 kbps referido. Adicionalmente, el canal de datos de respaldo podrá configurarse para que reduzca automáticamente su velocidad al valor de 56 kbps, cuando todos los canales de voz estén activos, de modo de asegurar continuidad de la transmisión en todo momento. Esta modalidad de operación será compatible con la de los equipos ruteadores, que se enlazarán a través del canal de datos de respaldo, y es a su vez inherente a la presencia por ráfagas de bites, de la señal digital en protocolo TCP/IP, de las redes LAN, que en este caso irá encapsulada en paquetes frame relay.

La ubicación del equipo multiplexor en Bayóvar, será en la sala de Telecomunicaciones del edificio de control, que se encuentra distante aproximadamente 1 km de la caseta de equipos donde se alojará el equipo transmisor-receptor con el amplificador de potencia. El enlace entre esos dos lugares, se establecerá mediante equipos de línea de abonado digital de alta velocidad HDSL, que realizan transmisión por dos pares telefónicos a velocidad de 2.048 Mbps, y presentan interfaz G.703. En cada extremo de este enlace metálico, se instalarán convertidores de velocidad e interfaz, para posibilitar el flujo de datos a 256 kbps en interfaz V.35, aplicados en la



banda base digital de los equipos transmisores-receptores y multiplexores.

#### **4.3.2 Telemedición y Control SCADA**

El futuro Sistema de Control SCADA para la Operación del Oleoducto Norperuano, llevará a cabo la adquisición de datos, su procesamiento, monitoreo de alarmas, presentación y archivo de la información concerniente a la operación. También cubrirá funciones de programación de la operación del Oleoducto, el pronóstico de movimiento de crudo y análisis del sistema de bombeo.

Para la realización de las funciones mencionadas se instalará una estructura de procesamiento distribuido, conformada por Unidades Terminales Remotas UTR, instaladas a razón de una por cada estación de bombeo. Cada UTR deberá recolectar datos de la estación correspondiente desde cierto número de puntos de telemedición, que serán interrogados según una frecuencia de barrido. A su vez cada UTR, transmitirá periódicamente los datos recolectados, hacia el procesador central del sistema SCADA, el cual interrogará a las UTR, agrupándolas en tres segmentos, correspondientes a las zonas operativas Oriente, Ramal Norte y Occidente, del Oleoducto Norperuano. Tal agrupamiento implicará la conexión para uso compartido, en la estación terrena Piura, de los puertos de datos vía satélite direccionados hacia las UTR de un mismo segmento.

Considerando la topología de transmisión actual, en que cada estación de bombeo, además de la estación terminal de Bayóvar, se enlazan vía satélite con las oficinas de PETROPERU S.A. en Piura, resultaría más económico y confiable ubicar el centro de control en esta ciudad. Sin

embargo, desde el punto de vista de disponibilidad de ambientes apropiados, y cercanía de las instalaciones terminales del Oleoducto, sería preferible instalar el centro de control en Bayóvar, y establecer acceso a las funciones de control, desde estaciones de trabajo ubicadas tanto en Bayóvar como en Piura.

El radioenlace digital Bayóvar-Piura, se ha diseñado con la capacidad necesaria para lograr tal esquema de funcionamiento, como se ha descrito en el apartado anterior. En efecto, la capacidad de transmisión de 256 kbps, permitirá retransmitir los datos recibidos en Piura vía satélite, a través de 3 canales a 9.6kbps, para su procesamiento en Bayóvar. Asimismo, permitirá establecer acceso desde estaciones de trabajo en oficinas de Piura, a través de 1 canal de datos a 64 kbps de extensión de red ETHERNET, a las facilidades de interfaz de usuario del Centro de Control SCADA. Con ello, las funciones de control de la operación del Oleoducto se podrían ejercer indistintamente desde Piura o desde Bayóvar.

El acceso del procesador central a los tres canales de recolección de datos, provenientes de las estaciones de bombeo, se implementará a través de la red ETHERNET del Centro de Control SCADA. Para ello, se instalará un Servidor de Puertos, que tendrá como función encapsular el formato asincrónico de los tres canales de recolección de datos, en protocolo TCP/IP, para su transmisión vía cable UTP, por la red ETHERNET, hacia el procesador central. La identificación y recuperación del formato asincrónico de cada uno de los canales, la efectuará el procesador central, mediante software específico del fabricante del equipo Servidor de Puertos

mencionado. Este esquema de acceso a los canales de datos, permite la ubicación distante del multiplexor respecto del procesador central, ya que el alcance de señales ETHERNET por cable UTP llega hasta 100m de distancia. Además, este esquema no requiere de habilitación física de puertos RS 232, en el procesador, gracias al encapsulamiento del formato asincrónico en protocolo TCP/IP.

#### **4.3.3 Interconexión de Redes LAN**

El canal de datos a 64 kbps, sincrónico, que funcionará entre Piura y Bayóvar, servirá de vínculo entre las redes de área local LAN, que funcionarán en ambos lugares, para servicio del Sistema de Control SCADA. Para ello, el puerto de datos correspondiente en cada multiplexor, irá conectado a un equipo ruteador, que cumplirá la función de encapsular el protocolo TCP/IP de la red LAN, en protocolo frame-relay a velocidad de 64kbps, para su transmisión por el radioenlace.

La ubicación del equipo ruteador será adjunta al multiplexor en cada terminal, para facilitar su conexión en interfaz V.35. Hacia el lado de la red LAN, el ruteador se conectará mediante cable UTP, el que tendrá recorrido en el interior del edificio hacia el dispositivo Switch o Hub, de servicio de la red LAN.

Similar configuración que la descrita tendrá la habilitación del otro canal de 64 kbps, para el acceso entre redes LAN de Piura y Bayóvar, dedicadas a las comunicaciones administrativas. Los ruteadores dispondrían para esta aplicación, de un puerto V.35 y otro UTP, adicionales a los indicados en el párrafo anterior.

La utilización de canales independientes de datos a 64 kbps, obedece a la necesidad de evitar el acceso entre la red LAN dedicada a SCADA, y la red LAN para aplicaciones de administración, de modo que las funciones de automatización se presenten libre de posibles influencias externas que pudieran afectarlas. Opcionalmente, un mayor nivel de disponibilidad de equipo, podrá alcanzarse con la instalación de ruteadores de respaldo, en las redes LAN (SCADA) de Piura y Bayóvar, que se enlazarán a través del canal de datos de respaldo a 64 kbps, referido en el apartado 4.3.1.

#### **4.3.4 Acceso al INTERNET**

Este acceso resulta fundamental para permitir al personal operador y de mantenimiento del Sistema de Control SCADA, el uso del soporte brindado por los fabricantes de equipos y software instalados, concerniente a información y software actualizados, disponibles en la red global, así como comunicación por correo electrónico con especialistas, listos para analizar estados críticos de operación del Sistema.

En el ruteador principal de Piura se habilitará un tercer puerto V.35, para conexión del servicio INFOVIA de la empresa TELEFONICA DEL PERU, a velocidad sincrónica de 64 kbps. Esta conexión será también en protocolo Frame-relay, y permitirá acceder a INTERNET y sus servicios a través de un proveedor que proporcione tal acceso.

La apropiada asignación de direcciones IP a las estaciones de trabajo de las redes en Piura y en Bayóvar, y la correspondiente programación de enrutamientos en los ruteadores, asegurará acceso al INTERNET a las estaciones de trabajo ubicadas tanto en Piura como en Bayóvar.

## CONCLUSIONES

- 1.** El radioenlace digital UHF directo Bayóvar - Piura está técnicamente definido, para funcionar con confiabilidad de 99.99%. Su comparación económica con las alternativas de transmisión vía satélite, y de alquiler de servicio de transmisión de datos, indica que el radioenlace es el esquema de transmisión más conveniente, con valor actual neto menor que la mitad que el de cualquiera de las otras alternativas.
- 2.** El valor de atenuación por difracción, en un enlace con claridad relativa menor que 0.6, calculado según la metodología "Technical Note 101", también llamada Longley-Rice, o según la metodología de Bullington, ensayadas en el presente estudio, ofrece suficiente grado de confianza para el diseño radioeléctrico.
- 3.** El análisis del registro de nivel de recepción en el radioenlace analógico UHF Bayóvar - Piura, que funcionó de 1991 a 1998, a la luz de las metodologías arriba mencionadas, permite deducir que el valor de  $k$ , en esa zona geográfica, se mantiene por encima de 1.2.

## **ANEXO**

### **DATOS NUMERICOS DE LOS PERFILES TOPOGRAFICOS**

En las tablas siguientes, se presentan los datos de distancia y cotas del terreno, para los siguientes radioenlaces de prueba, materia de los cálculos realizados: Analógico Bayóvar - Piura,

Bayóvar 1 - Piura 1,

Bayóvar 1 - Piura 2, y

Digital Bayóvar – Piura

Los datos presentados han sido procesados en hoja de cálculo EXCEL de Microsoft, e incluyen los valores correspondientes para la producción de los gráficos versus distancia, presentados en el texto de la tesis, con designaciones de leyenda:

**TERRENO:** Cotas del terreno

**CON  $k=4/3$  :** Cotas del terreno corregidas para  $k=4/3$

**PLANO REF.:** Plano de tierra en la metodología de K. Bullington

**EJE ANTENAS:** Línea recta entre las antenas

**EJE- $0.6F_1$ :** Cotas del eje de antenas, disminuídas en el valor  $0.6F_1$ .

Se incluyen también los valores del radio de la primera zona de Fresnel,

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>RADIOENLACE ANALOGICO BAYOVAR-PIURA (FIG.4)</b>							
2								
3	Dist.(Km)/Cota Final(m)		83.55	49.7	PT 1º pto	45.000	30.000	0.00
4	Altura ant. Tx, ht (m)		44.5		PT 2º pto	75.200	38.000	0.00
5	Altura ant. Rx, hr (m)		23.5					
6	h2 (m)		186.42					
7	h1(m)		32.99					
8	H		0.00					
9	ds		0					
10	Frecuencia (MHz)		381					
11								
12	<b>ENLACE : A-B</b>							
13	DIST.(Km)	ALTITUD (m)	PL.TIERRA	EJE ANT.	h(k=4/3)	CON k4/3	F1	EJE-0.6F1
14	0.000	160.00	18.08	204.50	0.00	160.00	0.00	204.50
15	0.530	150.00	18.22	203.67	2.59	152.59	20.34	191.46
16	1.230	50.00	18.41	202.57	5.96	55.96	30.85	184.05
17	1.650	0.00	18.52	201.91	7.95	7.95	35.64	180.52
18	35.000	0.00	27.35	149.50	99.96	99.96	126.40	73.66
19	35.200	5.00	27.40	149.18	100.11	105.11	126.50	73.28
20	35.300	0.00	27.43	149.03	100.19	100.19	126.55	73.10
21	36.800	0.00	27.83	146.67	101.20	101.20	127.18	70.36
22	37.100	5.00	27.91	146.20	101.37	106.37	127.29	69.82
23	37.450	0.00	28.00	145.65	101.56	101.56	127.41	69.20
24	38.500	0.00	28.28	144.00	102.03	102.03	127.70	67.38
25	42.600	27.00	29.36	137.55	102.62	129.62	128.07	60.71
26	42.900	20.00	29.44	137.08	102.58	122.58	128.05	60.25
27	43.100	25.00	29.50	136.77	102.55	127.55	128.03	59.95
28	45.000	30.00	30.00	133.78	102.04	132.04	127.71	57.16
29	47.500	20.00	30.66	129.85	100.73	120.73	126.88	53.72
30	48.500	28.00	30.93	128.28	100.00	128.00	126.42	52.43
31	50.500	15.00	31.46	125.14	98.18	113.18	125.27	49.98
32	52.600	25.00	32.01	121.84	95.76	120.76	123.72	47.61
33	55.500	30.00	32.78	117.28	91.58	121.58	120.98	44.69
34	57.500	25.00	33.31	114.14	88.11	113.11	118.67	42.93
35	60.000	18.00	33.97	110.21	83.12	101.12	115.26	41.05
36	60.100	24.00	34.00	110.05	82.90	106.90	115.11	40.99
37	60.200	18.00	34.03	109.89	82.69	100.69	114.96	40.92
38	68.000	18.00	36.09	97.64	62.20	80.20	99.71	37.81
39	68.100	24.00	36.12	97.48	61.89	85.89	99.46	37.80
40	68.200	18.00	36.15	97.32	61.58	79.58	99.21	37.80
41	70.000	25.00	36.62	94.49	55.79	80.79	94.43	37.83
42	70.100	31.00	36.65	94.34	55.46	86.46	94.15	37.85
43	70.200	25.00	36.68	94.18	55.13	80.13	93.87	37.86
44	72.000	28.00	37.15	91.35	48.92	76.92	88.42	38.30
45	72.100	34.00	37.18	91.19	48.56	82.56	88.10	38.33
46	74.00	36.00	37.68	88.21	41.57	77.57	81.51	39.30
47	75.00	36.00	37.95	86.64	37.72	73.72	77.65	40.05
48	75.1	30	37.97	86.48	37.33	67.33	77.24	40.13
49	75.2	38	38.00	86.32	36.94	74.94	76.84	40.22
50	75.3	30	38.03	86.16	36.54	66.54	76.42	40.31
51	82.5	32	39.93	74.85	5.10	37.10	28.54	57.73
52	82.6	41	39.96	74.69	4.62	45.62	27.16	58.40
53	83.3	44	40.15	73.59	1.23	45.23	13.99	65.20
54	83.31	62	40.15	73.58	1.18	63.18	13.71	65.35
55	83.33	62	40.15	73.55	1.08	63.08	13.13	65.67
56	83.34	44	40.16	73.53	1.03	45.03	12.83	65.83
57	83.55	49.7	40.21	73.20	0.00	49.70	0.00	73.20

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>RADIOENLACE DE PRUEBA BAYOVAR 1-PIURA 1 (FIG. 20)</b>							
2								
3	<b>Dist.(Km)/Cota Final(m)</b>		85.6	77	<b>PT 1° pto</b>	45.200	140.000	0.00
4	<b>Altura ant.Tx, ht (m)</b>		1		<b>PT 2° pto</b>	85.600	55.600	0.00
5	<b>Altura ant.Rx, hr (m)</b>		1					
6	<b>h2 (m) en dist.45.2km</b>		47.97					
7	<b>h1 (m) Piura</b>		22.40					
8	<b>H</b>							
9	<b>ds</b>							
10	<b>Frecuencia (MHz)</b>		381					
11								
12	<b>ENLACE : A-B</b>							
13	<b>DIST. (km)</b>	<b>ALTITUD (m)</b>	<b>PL.TIERRA</b>	<b>EJE ANT.</b>	<b>h(K=4/3)</b>	<b>CON K4/3</b>	<b>F1</b>	<b>EJE-0.6F1</b>
14	0.000	310.00	234.43	311.00	0.00	310.00	0.00	311.00
15	0.350	200.00	233.70	310.05	1.76	201.76	16.55	300.12
16	1.070	100.00	232.19	308.09	5.32	105.32	28.81	290.80
17	1.700	50.00	230.88	306.37	8.39	58.39	36.18	284.67
18	2.820	0.00	228.54	303.32	13.73	13.73	46.28	275.55
19	34.950	0.00	161.41	215.87	104.13	104.13	127.46	139.39
20	35.200	5.00	160.89	215.19	104.36	109.36	127.59	138.63
21	35.400	0.00	160.47	214.64	104.53	104.53	127.70	138.02
22	37.700	0.00	155.67	208.38	106.23	106.23	128.73	131.14
23	44.250	25.00	141.98	190.55	107.63	132.63	129.58	112.80
24	45.200	30.00	140.00	187.97	107.42	137.42	129.45	110.30
25	45.800	25.00	138.75	186.33	107.23	132.23	129.34	108.73
26	46.100	20.00	138.12	185.52	107.11	127.11	129.27	107.96
27	46.500	28.00	137.28	184.43	106.95	134.95	129.17	106.93
28	47.500	25.00	135.20	181.71	106.46	131.46	128.87	104.38
29	50.000	15.00	129.97	174.90	104.71	119.71	127.81	98.22
30	50.100	21.00	129.76	174.63	104.62	125.62	127.76	97.98
31	50.200	15.00	129.55	174.36	104.53	119.53	127.70	97.74
32	54.000	15.00	121.62	164.01	100.38	115.38	125.14	88.93
33	54.100	21.00	121.41	163.74	100.24	121.24	125.05	88.71
34	54.200	15.00	121.20	163.47	100.11	115.11	124.97	88.49
35	58.500	25.00	112.21	151.77	93.26	118.26	120.62	79.39
36	58.800	28.00	111.59	150.95	92.70	120.70	120.25	78.80
37	58.900	25.00	111.38	150.68	92.51	117.51	120.13	78.60
38	63.000	18.00	102.81	139.52	83.75	101.75	114.31	70.93
39	63.100	24.00	102.60	139.24	83.51	107.51	114.14	70.76
40	63.200	18.00	102.40	138.97	83.28	101.28	113.98	70.58
41	69.000	18.00	90.28	123.18	67.38	85.38	102.52	61.67
42	69.100	24.00	90.07	122.91	67.07	91.07	102.29	61.54
43	69.200	18.00	89.86	122.64	66.76	84.76	102.05	61.41
44	71.600	25.00	84.85	116.11	58.96	83.96	95.91	58.56
45	76.000	30.00	75.66	104.13	42.92	72.92	81.83	55.04
46	76.10	36.00	75.45	103.86	42.53	78.53	81.45	54.99
47	76.20	30.00	75.24	103.59	42.13	72.13	81.08	54.94
48	84.8	32	57.27	80.18	3.99	35.99	24.95	65.21
49	84.9	41	57.06	79.91	3.50	44.50	23.35	65.89
50	85.59	44	55.62	78.03	0.05	44.05	2.80	76.35
51	85.6	77	55.60	78.00	0.00	77.00	0.00	78.00



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>RADIOENLACE DE PRUEBA BAYOVAR 1-PIURA2 (FIG.21)</b>								
2									
3	<b>Dist.(Km)/Cota Final(m)</b>		85.84	47.00	<b>PT 1º pto</b>	45.200	140.000	0.00	
4	<b>Altura antena Tx (ht)</b>		1		<b>PT 2º pto</b>	85.600	55.600	0.00	
5	<b>Altura antena Rx (hr)</b>		2						
6	<b>h1 (m)</b>		7.65						
7	<b>h2 (m) en dist.45.2km</b>		40.16						
8	<b>H en Cúpula</b>		13.48						
9	<b>d1</b>		0.24						
10	<b>Frecuencia (MHz)</b>		381						
11									
12	<b>ENLACE : A-B</b>								
13	<b>DIST. (km)</b>	<b>ALTITUD (m)</b>	<b>PL.TIERRA</b>	<b>EJE ANT.</b>	<b>EJE CUP.</b>	<b>h(K=4/3)</b>	<b>CON K4/3</b>	<b>F1</b>	<b>EJE-0.6F1</b>
14	0.000	310.00	234.43	311.00	311.00	0.00	310.00	0.00	311.00
15	0.350	200.00	233.70	309.93	309.99	1.76	201.76	16.55	300.00
16	1.070	100.00	232.19	307.73	307.90	5.34	105.34	28.81	290.45
17	1.700	50.00	230.88	305.81	306.08	8.41	58.41	36.18	284.10
18	2.820	0.00	228.54	302.39	302.84	13.77	13.77	46.29	274.62
19	34.950	0.00	161.41	204.33	209.83	104.62	104.62	127.58	127.78
20	35.200	5.00	160.89	203.56	209.10	104.85	109.85	127.72	126.93
21	35.400	0.00	160.47	202.95	208.53	105.03	105.03	127.83	126.26
22	37.700	0.00	155.67	195.93	201.87	106.76	106.76	128.87	118.61
23	44.250	25.00	141.98	175.94	182.91	108.26	133.26	129.77	98.08
24	45.200	30.00	140.00	173.04	180.16	108.05	138.05	129.65	95.25
25	45.800	25.00	138.75	171.21	178.42	107.87	132.87	129.54	93.48
26	46.100	20.00	138.12	170.29	177.55	107.77	127.77	129.48	92.61
27	46.500	28.00	137.28	169.07	176.39	107.61	135.61	129.38	91.44
28	47.500	25.00	135.20	166.02	173.50	107.13	132.13	129.10	88.56
29	50.000	15.00	129.97	158.39	166.26	105.41	120.41	128.06	81.56
30	50.100	21.00	129.76	158.09	165.97	105.33	126.33	128.01	81.28
31	50.200	15.00	129.55	157.78	165.68	105.24	120.24	127.96	81.01
32	54.000	15.00	121.62	146.18	154.68	101.14	116.14	125.44	70.92
33	54.100	21.00	121.41	145.88	154.39	101.01	122.01	125.35	70.66
34	54.200	15.00	121.20	145.57	154.10	100.88	115.88	125.27	70.41
35	58.500	25.00	112.21	132.45	141.66	94.08	119.08	120.98	59.86
36	58.800	28.00	111.59	131.53	140.79	93.53	121.53	120.62	59.16
37	58.900	25.00	111.38	131.23	140.50	93.34	118.34	120.50	58.92
38	63.000	18.00	102.81	118.71	128.63	84.64	102.64	114.75	49.86
39	63.100	24.00	102.60	118.41	128.34	84.41	108.41	114.59	49.65
40	63.200	18.00	102.40	118.10	128.05	84.17	102.17	114.43	49.44
41	69.000	18.00	90.28	100.40	111.26	68.35	86.35	103.12	38.53
42	69.100	24.00	90.07	100.09	110.97	68.04	92.04	102.89	38.36
43	69.200	18.00	89.86	99.79	110.68	67.73	85.73	102.65	38.20
44	71.600	25.00	84.85	92.46	103.74	59.98	84.98	96.59	34.51
45	76.000	30.00	75.66	79.03	91.00	43.99	73.99	82.73	29.40
46	76.10	36.00	75.45	78.73	90.71	43.60	79.60	82.36	29.31
47	76.20	30.00	75.24	78.42	90.42	43.21	73.21	81.99	29.23
48	84.8	32	57.27	52.17	65.52	5.19	37.19	28.41	35.13
49	84.9	41	57.06	51.87	65.23	4.69	45.69	27.02	35.65
50	85.59	44	55.62	49.76	63.24	1.26	45.26	13.99	41.37
51	85.6	62	55.60	49.73	63.21	1.21	63.21	13.71	41.51
52	85.62	62	55.56	49.67	63.15	1.11	63.11	13.13	41.79
53	85.63	47	55.54	49.64	63.12	1.06	48.06	12.83	41.94
54	85.84	47	55.10	49.00	62.51	0.00	47.00	0.00	49.00

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>RADIOENLACE DIGITAL BAYOVAR-PIURA (FIG.22)</b>							
2								
3	<b>Dist.(Km)/Cota Final(m)</b>		83.55	47	<b>PT 1° pto</b>	45.000	30.000	0.00
4	<b>Altura antena Tx (ht)</b>		68.08		<b>PT 2° pto</b>	75.200	38.000	0.00
5	<b>Altura antena Rx (hr)</b>		23.5					
6	<b>h1</b>		210.00					
7	<b>h2</b>		30.29					
8	<b>H</b>							
9	<b>ds</b>							
10	<b>Frecuencia (MHz)</b>		400					
11								
12	<b>ENLACE : A-B</b>							
13	<b>DIST. (Km.)</b>	<b>ALTITUD (m)</b>	<b>PL.TIERRA</b>	<b>EJE ANT.</b>	<b>h(k=1.2)</b>	<b>CON k1.2</b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>EJE-0.6F<sub>1</sub></b>
14	0.000	160.00	18.08	228.08	0.00	160.00	0.00	228.08
15	0.530	150.00	18.22	227.08	2.88	152.88	19.85	215.17
16	1.230	50.00	18.41	225.76	6.62	56.62	30.11	207.69
17	1.650	0.00	18.52	224.97	8.83	8.83	34.79	204.10
18	35.000	0.00	27.35	162.07	111.06	111.06	123.36	88.05
19	35.200	5.00	27.40	161.69	111.24	116.24	123.46	87.62
20	35.300	0.00	27.43	161.50	111.32	111.32	123.50	87.40
21	36.800	0.00	27.83	158.67	112.44	112.44	124.12	84.20
22	37.100	5.00	27.91	158.11	112.63	117.63	124.23	83.57
23	37.450	0.00	28.00	157.45	112.84	112.84	124.34	82.84
24	38.500	0.00	28.28	155.47	113.36	113.36	124.63	80.69
25	42.600	27.00	29.36	147.73	114.02	141.02	124.99	72.74
26	42.900	20.00	29.44	147.17	113.98	133.98	124.97	72.19
27	43.100	25.00	29.50	146.79	113.95	138.95	124.95	71.82
28	45.000	30.00	30.00	143.21	113.38	143.38	124.64	68.42
29	47.500	20.00	30.66	138.49	111.92	131.92	123.83	64.19
30	48.500	28.00	30.93	136.61	111.11	139.11	123.38	62.58
31	50.500	15.00	31.46	132.83	109.09	124.09	122.26	59.48
32	52.600	25.00	32.01	128.87	106.40	131.40	120.74	56.43
33	55.500	30.00	32.78	123.40	101.75	131.75	118.07	52.56
34	57.500	25.00	33.31	119.63	97.90	122.90	115.82	50.14
35	60.000	18.00	33.97	114.92	92.35	110.35	112.49	47.42
36	60.100	24.00	34.00	114.73	92.11	116.11	112.34	47.32
37	60.200	18.00	34.03	114.54	91.87	109.87	112.20	47.22
38	68.000	18.00	36.09	99.83	69.11	87.11	97.31	41.44
39	68.100	24.00	36.12	99.64	68.77	92.77	97.07	41.40
40	68.200	18.00	36.15	99.45	68.42	86.42	96.83	41.36
41	70.000	25.00	36.62	96.06	61.99	86.99	92.16	40.76
42	70.100	31.00	36.65	95.87	61.62	92.62	91.89	40.73
43	70.200	25.00	36.68	95.68	61.25	86.25	91.61	40.71
44	72.000	28.00	37.15	92.28	54.35	82.35	86.30	40.51
45	72.100	34.00	37.18	92.10	53.96	87.96	85.98	40.51
46	74.00	36.00	37.68	88.51	46.19	82.19	79.55	40.78
47	75.00	36.00	37.95	86.63	41.91	77.91	75.78	41.16
48	75.1	30	37.97	86.44	41.48	71.48	75.39	41.21
49	75.2	38	38.00	86.25	41.04	79.04	74.99	41.26
50	75.3	30	38.03	86.06	40.60	70.60	74.59	41.31
51	82.5	32	39.93	72.48	5.66	37.66	27.85	55.77
52	82.6	41	39.96	72.29	5.13	46.13	26.51	56.39
53	83.3	44	40.15	70.97	1.36	45.36	13.66	62.78
54	83.31	62	40.15	70.95	1.31	63.31	13.38	62.92
55	83.33	62	40.15	70.91	1.20	63.20	12.81	63.23
56	83.34	44	40.16	70.90	1.14	45.14	12.52	63.38
57	83.55	47	40.21	70.50	0.00	47.00	0.00	70.50

## ACRONIMOS

- BER Tasa/razón de errores de bit, (*Bit Error Rate*). Relación de la cantidad de bits errados, a la cantidad total de bits transmitidos.
- CCIR Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones, parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, con sede en Ginebra, Suiza.
- CCITT Comité Consultivo Internacional de Telefonía y Telegrafía, parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, con sede en Ginebra, Suiza.
- FEC Control de errores hacia adelante, (*Forward Error Correction*). Protocolo de transmisión digital, por la que se agregan suficientes bits de verificación a cada mensaje transmitido, para que el receptor pueda detectar, localizar y corregir bits erróneos, sin tener que retransmitir el mensaje.
- FXO Circuito trasladador de señalización de línea de abonado a canal de larga distancia, en el lado de central telefónica, (*Foreign Exchange Office*).
- FXS Circuito trasladador de señalización de línea de abonado a canal de larga distancia, en el lado de abonado, (*Foreign Exchange Subscriber*).
- HDSL Abonado digital de alta tasa de bits, (*High Bit Rate Digital Subscriber Line*). Técnica de transmisión en tasa E1, 2.048 kbps, por par telefónico, en el rango de 3 km.
- LAN Red de área local, (*Local Area Network*). Red de comunicaciones de datos entre computadoras, de corta distancia, vg. dentro de un edificio o un campus.
- NBS Oficina Nacional de Estándares, (*National Bureau of Standards*), agencia del gobierno de los Estados Unidos, encargada de producir estándares de procesamiento de información.
- QAM Modulación de amplitud en cuadratura, (*Quadrature Amplitude Modulation*). Técnica de modulación por la que los símbolos

codificados de datos, son representados por 16, 32 o 64 combinaciones diferentes, de amplitud y fase de la señal modulante.

- QPSK** Modulación de fase en cuadratura, (*Quadrature Phase Shift Keying*). Técnica de modulación en la que se emplean cuatro cambios de fase, para representar los estados de dos bits de datos.
- SCADA** Supervisión control y adquisición de datos, (*Supervisory, Control and Data Acquisition*). Término aplicado a las funciones de control automático de operaciones, por las que se obtiene información sobre el estado de los elementos de un proceso, y sobre sus parámetros de funcionamiento, desde una posición central.
- SNMP** Protocolo simple de gestión de red, (*Simple Network Management Protocol*). Protocolo de aplicación de TCP/IP, de soporte en la gestión de fallos y de rendimiento de los diversos equipos conectados en una red.
- TCP** Protocolo de control de transmisión, (*Transmission control Protocol*). Protocolo de transporte, orientado a conexión entre usuarios finales, que provee comunicación confiable de bytes, entre dos procesos residentes en computadoras conectadas en red.
- TDM** Múltiplex por división de tiempo, (*Time division Multiplex*). Técnica por la que se intercalan sucesivamente, códigos digitales, constituyentes de fuentes de datos distintas, uno después de otro, para conformar una sola señal digital.
- UHF** Ultra alta frecuencia, (*Ultra High Frequency*). Rango del espectro radioeléctrico, comprendido entre 300 MHz y 3 GHz, con designación de ondas decimétricas.
- UIT-R PN 370** Recomendación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, para estimar la intensidad de campo eléctrico a una distancia determinada, mediante curvas de propagación normalizadas que toman en cuenta, someramente y de forma estadística, las características del terreno. Método destinado a la planificación de servicios de radiodifusión sonora y TV.
- UTP** Par trenzado no blindado, (*Unshielded Twisted Pair*). Medio de transmisión por conductores de cobre, aplicado en redes de área local LAN.
- UTR** Unidad terminal remota. Equipo constituyente de un sistema SCADA, encargado de la recolección e integración de señales, provenientes de los elementos conformantes de un proceso operativo, en una localización distante del centro de control.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] "Engineering Considerations for Microwave Communications Systems", Lenkurt electric Co., Inc., San Carlos, California, 1970.
- [2] KINASE, AKIRA: "Ground Wave Propagation in the VHF, UHF and SHF Bands ", Ed. Nippon Hoso Kyokai (NHK), Tokio, 1972.
- [3] JOHNS, CARL T.A.: "Engineering Electromagnetic Fields and Waves", John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- [4] KERR, DONALD E., editor: "Propagation of Short Radio Waves", MIT Radiation Laboratory Series, Vol.13, McGraw-Hill Book Co.,Inc.,1951. Republicado por Peter Peregrinus Ltd., London, U.K., 1987.
- [5] WHITTEKER, J.H.:"Calculation by Numerical Integration of Diffraction Attenuation at VHF and UHF", Fifth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 87). Institute of Electrical Engineers, London, 1987, pag. 2.31-2.34.
- [6] FREEMAN, ROGER L.: "Radio System Design for Telecommunications (1-100 GHz)", John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [7] HERNANDO, JOSE MARIA: "Transmisión por Radio", Editorial Centro de Estudios Ramón Areces S.A., Madrid, España, 1998.
- [8] PICQUENARD, ARMEL: "Radio Wave Propagation", Philips Technical Library, N.V.Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1974.
- [9] SMITH, DAVID R.: "Digital Transmission Systems", Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1985.
- [10] HALL, M.P.M. y BARCLAY, L.W., editores: "Radiowave Propagation", IEE Electromagnetic Waves Series 30, Peter Peregrinus Ltd., London, U.K., 1989.