

Anexo

Cálculo aproximado del número de estaciones bases requeridas para cubrir la Provincia de Lima utilizando tecnología LTE y banda de frecuencia AWS.

Para el cálculo de número de estaciones bases necesitaremos determinar las características de la TX presente en la estación base y las características de los equipos móviles receptores. A continuación se presentaran los datos utilizados en este ejercicio:

Tabla N° A1: Parámetro de los equipos para el canal de Downlink

Características de TX de la Base Station LTE	Unidad	Valor	OBSERVACION
Banda de trabajo LTE	NA	1	G1: Otorgada por el regulador al operador
Identificador de canal (N_{DL} , N_{UL})	NA	(50, 18050)	G2: Seleccionada por el operador en función del ancho de banda asignado al operador
Frecuencia de portadora DL	MHz	2115	G3: De acuerdo al plan de frecuencia
Frecuencia de portadora UL	MHz	1925	G4: De acuerdo al plan de frecuencia
Ancho de Banda	MHz	10	G5: En función de la capacidad y de los equipos que están en el mercado
Potencia de transmisión PTX	dBm	41.46	G6: Especificaciones del equipo. No debe superar los límites de la regulación regional [4], pp. 17, Table 4.6.
Ganancia elemento radiante	dBi	15	G7: Especificaciones del equip y del estándar [4]
Elementos del arreglo de antenas	NA	2	G6: Especificaciones del equipo
Ganancia por elementos del arreglo	dB	3.010299957	G7=10*log(G6)
Ganancia por Beam Forming	dB	0	G8: Especificaciones del equipo
Ganancia por sistema MIMO	dB	3.010299957	G9: Especificaciones del equipo
Figura de ruido	dB	5	G10: Definida en el estándar [4]
Altura de la antena	m	33	G11: Dada por el tipo de ambiente. Valor usado para ambiente urbano
Características de Rx del Móvil LTE			
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en Reception	dBi	0	G12: Definida en el estándar
Cantidad de Elementos del Arreglo	NA	2	G13: Especificaciones del Equipo
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	dB	3.010299957	G14=10*log(G13)
Cantidad de RBs asignados al UE	NA	10	
Ancho de Banda	MHz	1.8	
Figura de Ruido en el Receptor	dB	9	G15: Definido en el estándar [4]

Tabla N° A2: Parámetro de los equipos para el canal de Uplink

Características de TX de Mobile Station	Unidad	Valor	OBSERVACION
Banda de trabajo LTE	NA	1	G1: Otorgada por el regulador al operador
Identificador de canal (N_{DL} , N_{UL})	NA	(50, 18050)	G2: Seleccionada por el operador en función del ancho de banda asignado al operador
Frecuencia de portadora DL	MHz	2115	G3: De acuerdo al plan de frecuencia
Frecuencia de portadora UL	MHz	1925	G4: De acuerdo al plan de frecuencia
Cantidad de RBs asignados al UE	NA	10	
Ancho de Banda	MHz	1.8	G5: En función de la capacidad y de los equipos que están en el mercado
Potencia de transmisión P_{TX}	dBm	23	G6: Especificaciones del equipo. No debe superar los límites de la regulación regional [2].
Ganancia elemento radiante	dBi	0	G7: Especificaciones del equipo y del estándar [4]
Elementos del arreglo de antenas	NA	1	G6: Especificaciones del equipo
Ganancia por elementos del arreglo	dB	0	G7= $10 \cdot \log(G7)$
Ganancia por Beam Forming	dB	0	G8: Especificaciones del equipo
Ganancia por sistema MIMO	dB	0	G9: Especificaciones del equipo
Figura de ruido	dB	9	G10: Definida en el estándar [4]
Altura de la antena	m	1.7	G11: Altura promedio de una persona
Características de Rx de la Base Station			
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en Reception	dBi	15	G12: Definida en el estándar
Cantidad de Elementos del Arreglo en RX	NA	2	G13: Especificaciones del Equipo
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	dB	3.010299957	G14= $10 \cdot \log(G13)$
Figura de Ruido en el Receptor	dB	5	G16: Especificaciones del Equipo [4]

El siguiente paso en el proceso de determinar el número de estaciones base es el cálculo del Link Budget. Esto determinará el alcance máximo de la señal LTE utilizando la banda de AWS (2100 MHz para el downlink y 1900 MHz para el uplink) y el modelo de propagación Okumura-Hata para este ejercicio.

Tabla N° A3: Datos recopilados para el cálculo de Link Budget del Downlink

Características Típicas de los Equipos y Parámetros de OFDMA para 1024 Subportadoras y 10 MHz de Ancho de Banda				
Características de TX de la BS	Signo	Unidades	Valor	OBSERVACION
Potencia de transmisión PTX	+	dBm	41.46	G1
Ganancia elemento radiante	+	dBi	15.00	G2
Elementos del arreglo de antenas	+	NA	2	
Ganancia por elementos del arreglo	+	dB	3.01	G3
Ganancia por Beam Forming	+	dB	0.00	G4
Ganancia por sistema MIMO	+	dB	3.01	G5
EIRP: Potencia Efectiva Radiada Isotrópica		dBm	62	G6=G1+G2+G3+G4+G5
Características de RX del Móvil				
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en Reception	+	dBi	0.00	G7
Cantidad de Elementos del Arreglo		NA	2.00	G8
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	+	dB	3.01	G9
Figura de Ruido en el Receptor	+	dB	9.00	G10
Márgenes				
Margen de Fading Log Normal	-		6.0	G11
Fast Fading Margin	-		2.00	G12
Interference Margin	-		2.00	G13
Pérdidas debido a Penetración	-		2.00	G14
Margen Total			12.00	G15

Tabla N° A4: Cálculo de sensibilidad para la modulación QPSK 1/8 y 16QAM 1/2 para el canal de Downlink

SE CALCULA LA SENSIBILIDAD PARA LOS DOS VALORES EXTREMOS DE CADA MODULACIÓN				
Sensibilidad en la Mobile Station				
Densidad Espectral de Ruido Térmico No	-	dBm/Hz	-174.00	G16=10log(N ₀)
Ancho de Banda BW	+	MHz	10.00	G17
Modulación y Codificación		QPSK 1/8		G18: Define la SINR, ver Tabla 4-6.
Relación señal a Interferencia-Ruido SINR Requerida. VALOR INFERIOR	+	dB	-5.10	G19: Definida de acuerdo a la modulación y codificación seleccionada
Pérdidas de Implementación	+	dB	2.50	G:20 Depende directamente de G18
Sensibilidad en el UE		dBm	-100.60	G21=G16+10log(G17*E6)+G10+G19++G20-3
Ganancia del Sistema		dB	166.09	G22=G6+G7+G9-G21
Maximun Allowable Path Loss (MAPL)		dB	154.09	G23=G22-G15
Modulación y Codificación				
		16QAM 1/2		G24: Define la SINR, ver Tabla 4-6.
Relación señal a Interferencia-Ruido SINR Requerida. VALOR SUPERIOR	+	dB	7.90	G25: Definida de acuerdo a la modulación y codificación seleccionada
Pérdidas de Implementación	+	dB	3.00	G:26 Depende directamente de G18
Sensibilidad en el UE		dBm	-87.10	G27=G16+10log(G17*E6)+G10+G19++G20-3
Ganancia del Sistema		dB	152.59	G28=G6+G7+G9-G21
Maximun Allowable Path Loss (MAPL)		dB	140.59	G29=G22-G15

Tabla N° A5: Aplicación del modelo Okumura-Hata para el canal de Downlink

MODELO OKUMURA-HATA		
PARÁMETRO		UNIDADES
Frecuencia	2100	MHz
Altura de la Antena BS	33	m
Altura de la Antena UE	1.7	m
Máximas Pérdidas Permitidas Cerca de la BS	140.59	dB
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	154.09	dB
Resultados para la Zona Urbana		
Factor de Corrección Urbano (Gran Ciudad)	1.578582	dB
Log(d) cerca de la BS	0.20	
Log(d) borde de la Celda	0.58	
Radio de cobertura Inicio del Anillo	1.573422	Km
Radio de cobertura fin del Anillo	3.821492	Km
Area Cubierta por la celda Hexagonal	31.508911	Km ²
Separación entre Centros BS (2ap)	6.031950	Km
Resultados para la Zona Suburbana		
Factor de Correccion Suburbano	12.43	
Log(d) cerca de la BS	0.51	
Log(d) borde de la Celda	0.89	
Radio de cobertura Inicio del Anillo	3.211235	Km
Radio de cobertura fin del Anillo	7.799374	Km
Area Cubierta por la celda Hexagonal	131.246290	Km ²
Separación entre Centros BS (2ap)	12.310752	Km

Es importante resaltar que para el ejercicio de cálculo actual se están tomando en cuenta dos arquetipos básicos: las zonas urbanas y las zonas suburbanas. Esto permitirá optimizar el cálculo de estaciones bases en áreas geográficas donde la propagación de la señal se vea menos afectada por elementos obstructivos y el número de clientes a atender sea más reducido.

Tabla N° A6: Datos recopilados para el cálculo de Link Budget del Uplink

Característica Típicas de los Equipos y Parámetros de OFDMA para 1024 Subportadoras y 10 MHz de Ancho de Banda				
Características de TX del Móvil LTE	Signo	Unidades	Valor	OBSERVACION
Potencia de transmisión PTX	+	dBm	23	G1
Ganancia elemento radiante	+	dBi	0.00	G2
Elementos del arreglo de antenas	+	NA	1	
Ganancia por elementos del arreglo	+	dB	0.00	G3
Ganancia por Beam Forming	+	dB	0.00	G4
Ganancia por sistema MIMO	+	dB	0.00	G5
EIRP: Potencia Efectiva Radiada Isotrópica		dBm	23	G6=G1+G2+G3+G4+G5
Características de RX de la BS				
Ganancia de cada Elemento Radiante de la Antena en Reception	+	dBi	15.00	G7
Cantidad de Elementos del Arreglo	+	NA	2.00	G8
Ganancia debida al Arreglo (Diversidad de Antenas)	+	dB	3.01	G9
Figura de Ruido en el Receptor	+	dB	5.00	G10
Márgenes				
Margen de Fading Log Normal	-		6.0	G11
Fast Fading Margin	-		2.00	G12
Interference Margin	-		2.00	G13
Pérdidas debido a Penetración	-		2.00	G14
Margen Total			12.00	G15

Tabla N° A7: Cálculo de sensibilidad para la modulación QPSK 1/8 y 16QAM 1/2 para el canal de Uplink

Sensibilidad en la Mobile Station				
Densidad Espectral de Ruido Térmico No	-	dBm/Hz	-174.00	G16=10log(N0)
Ancho de Banda BW	+	MHz	1.80	G17
Modulación y Codificación	+	QPSK 1/8		G18: Define la SINR, ver Tabla 4-6.
Relación señal a Interferencia-Ruido SINR Requerida. VALOR SUPERIOR	+		-5.10	G19: Definida de acuerdo a la modulación y codificación seleccionada
Pérdidas de Implementación	+		2.50	G:20 Depende directamente de G18
Sensibilidad en la BS		dBm	-112.05	G21=G16+10log(G17)+G10+G19++G20-3
Ganancia del Sistema		dB	153.06	G22=G6+G7+G9-G21
Maximun Allowable Path Loss (MAPL)		dB	141.06	G23=G22-G15
Modulación y Codificación		16QAM 1/2		G24: Define la SINR, ver Tabla 4-6.
Relación señal a Interferencia-Ruido SINR Requerida. VALOR SUPERIOR	+	dB	7.90	G25: Definida de acuerdo a la modulación y codificación seleccionada
Pérdidas de Implementación	+	dB	3.00	G:26 Depende directamente de G18
Sensibilidad en la BS		dBm	-98.55	G27=G16+10log(G17)+G10+G19++G20-3
Ganancia del Sistema		dB	139.56	G28=G6+G7+G9-G21
Maximun Allowable Path Loss (MAPL)		dB	127.56	G29=G22-G15

Tabla N° A8: Aplicación del modelo Okumura-Hata para el canal de Uplink

MODELO OKUMURA-HATA		
PARÁMETRO		UNIDADES
Frecuencia	1900	MHz
Altura de la Antena BS	33	m
Altura de la Antena UE	1.7	m
Máximas Pérdidas Permitidas Cerca de la BS	127.56	
Máximas Pérdidas Permitidas Borde de la Celda	141.06	

Resultados para la Zona Urbana		
Factor de Corrección Urbano (Gran Ciudad)	1.57858151	dB
Log(d) cerca de la BS	-0.14	
Log(d) borde de la Celda	0.24	
Radio de cobertura Inicio del Anillo	0.719723	Km
Radio de cobertura fin del Anillo	1.748047	Km
Area Cubierta por la celda Hexagonal	6.592857	Km2
Separación entre Centros BS (2ap)	2.75916629	Km

Resultados para la Zona Suburbana		
Factor de Corrección Suburbano	12.11	
Log(d) cerca de la BS	0.16	
Log(d) borde de la Celda	0.54	
Radio de cobertura Inicio del Anillo	1.438115	Km
Radio de cobertura fin del Anillo	3.492860	Km
Area Cubierta por la celda Hexagonal	26.322675	Km2
Separación entre Centros BS (2ap)	5.513229	Km

Con el cálculo del Link Budget se ha determinado que el alcance del canal de Uplink es mucho más limitado que el canal de Downlink (siendo el primero de 1.74 Km en zonas urbanas y de 3.49 Km en zonas suburbanas, mientras que el segundo es de 3.82 Km en zonas urbanas y de 7.79 Km en zonas suburbanas). Por tanto, para los cálculos de número de estaciones base se tomará en cuenta el alcance geográfico del canal de Uplink, de manera que se asegure una conexión constante entre los equipos móviles y las estaciones de servicio.

Una vez determinado el alcance de la señal a utilizar, se debe proceder a calcular la capacidad necesaria que la red LTE deberá soportar, de manera que se pueda abastecer al mayor número de clientes posibles manteniendo una alta calidad de servicio. El primer paso requerido es el establecimiento de las zonas urbanas y suburbanas dentro de la Provincia de Lima:

Tabla N° A9: Zonas urbanas y suburbanas de la Provincia de Lima

	Distrito	Población	Extensión (Km ²)
Urbano	Ate Vitarte	478,278	77.72
	Barranco	33,903	3.33
	Breña	81,909	3.22
	Cercado de Lima	299,493	21.98
	Chaclacayo	41,110	2.80
	Chorrillos	286,977	38.94
	Comas	486,977	48.75
	El Agustino	180,262	12.54
	Independencia	207,647	14.56
	Jesús María	66,171	4.57
	La Molina	132,498	65.75
	La Victoria	192,724	8.74
	Lince	55,242	3.03
	Los Olivos	318,140	18.25
	Magdalena del Mar	50,764	3.61
	Miraflores	85,065	9.62
	Pueblo Libre	74,164	4.38
	Puente Piedra	233,602	71.18
	Rimac	176,169	11.87
	San Borja	105,076	9.96
	San Isidro	58,056	11.10
	San Juan de Lurigancho	898,443	131.25
	San Juan de Miraflores	362,643	23.98
	San Luis	54,634	3.49
	San Martín de Porres	579,561	36.91
	San Miguel	129,107	10.72
	Santa Anita	184,614	10.69
	Santiago de Surco	289,597	34.75
Surquillo	89,283	4.49	
Villa El Salvador	378,470	35.46	
Villa María del Triunfo	381,790	70.57	
Suburbano	Ancón	33,367	299.22
	Carabaylo	213,386	346.88
	Cieneguilla	26,725	240.33
	Lurigancho-Chosica	169,359	236.47
	Lurín	62,940	181.12
	Pachacámac	68,441	160.23
	Pucusana	10,633	37.83
	Punta Hermosa	5,762	119.50
	Punta Negra	5,284	130.50
	San Bartolo	6,412	45.01
	Santa María del Mar	161	9.81
	Santa Rosa	10,903	21.50
Total	7,605,742	2,636.61	

Con dicha información se procede a calcular la capacidad requerida en cada una de las zonas estudiadas, tomando en cuenta que se desea cubrir el 90% y el 70% de la población de las zonas urbanas y suburbanas, respectivamente.

Para ambas zonas, el número de empresas atendidas fue realizado mediante el 1% de la población total de la zona.

Tabla N° A10: Parámetros requeridos para el cálculo de capacidad y cantidad de suscriptores – Zona urbana

CALCULO PARA AREA URBANA			
Poblacion Total - Zona Urbana		6,992,369	
Numero de Clientes a atender (90%)		6,293,133	
Numero de Empresas a atender		62,931	
AREA DE COBERTURA Km2		808.21	
Probabilidad de Bloque VoIP		1%	
CAPACIDAD POR SERVICIO Mbps	CAPACIDAD Mbps	FACTOR DE SOBRE VENTA	CANTIDAD TOTAL CLIENTES POTENCIALES
Internet	0.1280	40	6,293,133
VoIP (AMR FR 12.2 Kbps)	0.1071	1	6,293,133
PYME Regular	0.5120	1	44,052
PYME Premiun	2.0000	1	18,879

Tabla N° A11: Calculo de capacidad y densidad de datos – Zona urbana

Geografía a Cubrir Km2		808.21	
CIENTES RESIDENCIALES			
TIPO DE SERVICIO	CAPACIDAD Mbps	CANTIDAD DE CLIENTES	FACTOR DE REVENTA DE CLIENTES CONCURRENTES
Internet	0.128	6,293,133	40
VoIP	0.107119	6,293,133	1
PARAMETROS DE TRAFICO			
Tiempo de Promedio de Llamada	3.5		
Tráfico Individual ofrecido VoIP en Erlangs	0.058		
Tráfico total ofrecido	367,100		
Cantidad de circuitos según Erlang B	363,526		
CIENTES COMERCIALES			
TIPO DE SERVICIO	CAPACIDAD Mbps	CIR	CANTIDAD DE CLIENTES
PYME Regular	0.512		44,052
PYME Premium	2		18,879
RESULTADOS - AREA URBANA			
CAPACIDAD RESIDENCIAL Mbps	59,078.65		
CAPACIDAD COMERCIAL Mbps	60,312.62		
CAPACIDAD TOTAL Mbps	119,391.28		
DENSIDAD DE DATOS Mbps/Km2	147.7231		

Tabla N° A12: Parámetros requeridos para el cálculo de capacidad y cantidad de suscriptores – Zona suburbana

CALCULO PARA AREA SUBURBANA			
Poblacion Total - Zona Suburbana		613,373	
Numero de Clientes a atender (70%)		429,362	
Numero de Empresas a atender		4,294	
AREA DE COBERTURA Km2		1,828.40	
Probabilidad de Bloque VoIP		1%	
CAPACIDAD POR SERVICIO Mbps	CAPACIDAD Mbps	FACTOR DE SOBRE VENTA	CANTIDAD CLIENTES POTENCIALES TOTAL
Internet	0.1280	40	429,362
VoIP (AMR FR 12.2 Kbps)	0.1071	1	429,362
PYME Regular	0.5120	1	3,006
PYME Premiun	2.0000	1	1,288

Tabla N° A13: Calculo de capacidad y densidad de datos – Zona suburbana

Geografía a Cubrir Km2		1,828.40	
CIENTES RESIDENCIALES			
TIPO DE SERVICIO	CAPACIDAD Mbps	CANTIDAD DE CLIENTES	FACTOR DE REVENTA DE CLIENTES CONCURRENTES
Internet	0.128	429,362	40
VoIP	0.107119	429,362	1
PARAMETROS DE TRAFICO			
Tiempo de Promedio de Llamada	3.5		
Tráfico Individual ofrecido VoIP en Erlangs	0.058		
Tráfico total ofrecido	25,047		
Cantidad de circuitos según Erlang B	24,877		
CIENTES COMERCIALES			
TIPO DE SERVICIO	CAPACIDAD Mbps	CANTIDAD DE CLIENTES	FACTOR DE REVENTA DE CLIENTES CONCURRENTES
PYME Regular	0.512	3,006	1
PYME Premium	2	1,288	1
RESULTADOS - AREA SUBURBANA			
CAPACIDAD RESIDENCIAL Mbps	4,038.88		
CAPACIDAD COMERCIAL Mbps	4,115.01		
CAPACIDAD TOTAL Mbps	8,153.88		
DENSIDAD DE DATOS Mbps/Km2	4.4596		

Finalmente, obtenidos el alcance máximo óptimo de la estación base, y encontrada la capacidad y densidad de datos proyectada, se puede calcular el número aproximado de estaciones bases requeridas para cubrir el territorio de la Provincia de Lima.

Tabla N° A14: Número estimado de estaciones base – Zona urbana

CALCULO DE BTS TOTALES Y TAMAÑO DEL CLUSTER (AREA URBANA)		
PARÁMETRO		UNIDADES
Poblacion	6,992,369	
Extension	808.21	Km2
Area de BTS	6.59286	Km2
# Sectores	3	
C/l	5	
Path Loss (n)	3.495373	

CAPACIDAD Y DENSIDAD DE DATOS		
Capacidad Residencial	59,078.65	Mbps
Capacidad Comercial	60,312.62	Mbps
Capacidad Total	119,391.28	Mbps
Densidad de Datos	147.7231	Mbps/Km2

CAPACIDAD MAXIMA & CANTIDAD DE BS		
Capacidad Maxima de la BS	1,145.79	Mbps
Cantidad de BS (según capacidad)	104	#
Cantidad de BS (según area geo.)	123	#
Cantidad de BS	162	#

Tabla N° A15: Número estimado de estaciones base – Zona suburbana

CALCULO DE BTS TOTALES Y TAMAÑO DEL CLUSTER (AREA SUBURBANA)		
PARÁMETRO		UNIDADES
Poblacion	613,373	
Extension	1,828.40	Km2
Area de BTS	26.32268	Km2
# Sectores	3	
C/l	5	
Path Loss (n)	3.495373	

CAPACIDAD Y DENSIDAD DE DATOS		
Capacidad Residencial	4,038.88	Mbps
Capacidad Comercial	4,115.01	Mbps
Capacidad Total	8,153.88	Mbps
Densidad de Datos	4.4596	Mbps/Km2

CAPACIDAD MAXIMA & CANTIDAD DE BS		
Capacidad Maxima de la BS	138.11	Mbps
Cantidad de BS (según capacidad)	59	#
Cantidad de BS (según area geo.)	70	#
Cantidad de BS	92	#

Cabe resaltar que la cantidad de estaciones bases fue obtenida mediante el criterio del valor resultante de obtener la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los valores de estaciones base calculados tanto para cobertura geográfica como para cobertura del tráfico de voz. De esta manera, se determina que serán necesarias al menos 254 estaciones base para cubrir la Provincia de Lima en su totalidad, siendo utilizadas 162 estaciones en las zonas urbanas y 92 estaciones en las zonas suburbanas.

Este resultado es solo un valor de referencia, y en realidad está sujeto a un número de condiciones pre-establecidas en el ejercicio. Es posible obtener resultados distintos si se utiliza otro modelo de propagación distinto al Okumura-Hata, y si se obtiene una banda de radiofrecuencia distinta a la banda AWS el radio de alcance se vería afectado en su totalidad. Sin embargo, este ejercicio permite visualizar una cantidad aproximada de infraestructura necesaria para la implementación de una red LTE y por tanto permite obtener una idea del nivel de inversión requerido por los operadores móviles para establecer nuevas tecnologías en el territorio nacional.