

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Implementación e impacto de transmisión en vivo
con cámaras 360, 180VR y 4K desde el Laboratorio

Movistar 5G UCSC

Gustavo N. Herrera Vergara

Informe de Introducción a la Habilitación Profesional
Ingeniería Civil Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Profesores Guía:
Dr. Jaime A. Cariñe C.
Dra. Silvia E. Restrepo M.

Concepción, Agosto del año 2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Implementación e impacto de transmisión en vivo con cámaras 360, 180VR y 4K desde el Laboratorio Movistar 5G UCSC

Gustavo N. Herrera Vergara

Informe de Introducción a la Habilitación Profesional

Ingeniería Civil Eléctrica

Agosto 2025

Resumen

Este informe tuvo como objetivo analizar y evaluar el uso y funcionamiento de experiencias inmersivas a través de transmisiones instaladas en el Laboratorio 5G de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC), mediante la implementación de transmisiones en vivo utilizando cámaras 360°, 180VR y resolución 4K, en plataformas compatibles como YouTube y Facebook360. El proyecto se enfocó en explorar la capacidad de las redes 5G comerciales para sostener flujos de video de alta resolución y baja latencia, así como en evaluar la efectividad de estas tecnologías para generar entornos educativos y de exploración remota de espacios físicos.

Para ello, se realizaron pruebas de conexión tanto alámbricas como inalámbricas, con el fin de obtener múltiples ángulos y formatos de visualización dentro de una misma transmisión. Estas experiencias fueron reproducidas mediante lentes de realidad virtual, televisores de alta definición, dispositivos móviles y computadores, permitiendo evaluar la percepción inmersiva desde distintas perspectivas y fortalecer la interacción del usuario con el contenido visual. La inclusión de lentes VR resultó particularmente relevante, ya que permitió analizar directamente la calidad de la experiencia inmersiva, la percepción de profundidad y la interacción con los entornos transmitidos.

En la implementación del proyecto se emplearon diversas herramientas de software, como OBS Studio, DaVinci Resolve, Matterport, CameraFi Live y Kuula, entre otras. Estas plataformas facilitaron la captura, edición, transmisión y generación de recorridos virtuales asíncronos, incluyendo imágenes estilo Street View que permitieron explorar entornos desde distintos ángulos. La combinación de hardware y software permitió validar la compatibilidad de los dispositivos, la estabilidad de las transmisiones y la capacidad de las redes 5G para sostener experiencias inmersivas en tiempo real, incluso cuando la transmisión no siempre alcanzó niveles óptimos de fluidez o calidad visual debido a las limitaciones del hardware implementado.

La investigación demostró el potencial de las tecnologías de transmisión inmersiva apoyadas en redes 5G, evidenciando que estas soluciones pueden enriquecer los procesos educativos, facilitar la exploración remota de espacios físicos y promover nuevas formas de aprendizaje experiencial. Además, permitió visibilizar los recursos disponibles en la UCSC para el desarrollo de soluciones innovadoras desde la perspectiva de un estudiante tesista de Ingeniería Civil Eléctrica, sentando las bases para futuras investigaciones en áreas como educación, turismo virtual, ingeniería, salud y accesibilidad digital.

En resumen, el proyecto consolidó la viabilidad técnica y educativa de las transmisiones inmersivas sobre redes 5G comerciales, destacando la importancia de la correcta integración de hardware y software, así como el valor de la visualización mediante lentes de realidad virtual, para generar experiencias significativas y de alto impacto académico y social.

Agradecimientos

El camino universitario ha estado lleno de desafíos, aprendizajes, aciertos y errores que, con el tiempo, se transformaron en lecciones valiosas. Aún conservo la memoria de aquellos primeros días en la universidad, y hoy me encuentro dando los últimos pasos de esta etapa, con esperanza por lo que vendrá.

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental en este proceso. A mi madre, por su compañía constante; a mi hermana mayor, por sus enseñanzas; a mi hermana menor, por ayudarme a salir de la rutina y acompañarme incluso en la distancia; y a mi padrastro, quien, a pesar de la distancia actual, sé que comparte con orgullo este logro. A todos ellos, mi gratitud profunda por ser mi motor y mi razón de seguir adelante.

Agradezco también a Linda, mi gata, quien ya no está conmigo, pero cuya compañía fue incondicional en tantas horas de estudio. Su presencia fue un consuelo silencioso que acompañó muchos de los momentos más exigentes de este camino.

A mis amigos de siempre, de mi querido Talcahuano —Eduardo, Carlos, Angelo, Bruno, entre otros—, gracias por estar presentes sin pedir nada a cambio, por sacarme del encierro mental en los momentos difíciles, y por recordarme siempre quién soy. Este logro también les pertenece.

Extiendo mi reconocimiento a mis compañeros del Laboratorio 5G UCSC, Cristóbal Leiva y Hernán Abarzúa, por su apoyo, colaboración y amistad en este proceso. Compartimos no solo el trabajo técnico, sino también las dudas, alegrías y momentos de incertidumbre que nos formaron como futuros profesionales. A quienes se sumaron a mi vida en estos últimos años, gracias por ser personas íntegras y comprometidas, dentro y fuera de la carrera.

Mi especial agradecimiento al profesor Ricardo Bustos Placencia, no solo por su guía académica, sino por su calidad humana. Su apoyo constante y generosidad en este proyecto fueron clave para su desarrollo. A veces, más allá del conocimiento, se requiere humanidad, y él la supo entregar con sabiduría y empatía.

Finalmente, agradezco a todo lo vivido: a la soledad, a la compañía, a la alegría y a la tristeza, porque cada experiencia me formó como persona y como profesional. Hoy, con humildad y satisfacción, puedo decir: gracias vida, gracias, por tanto. Y gracias, Dios, por permitirme llegar hasta aquí.

Tabla de Contenidos

Índice General

Resumen	iii
Agradecimientos	iv
Lista de tablas	viii
Lista de figuras	viii
Glosario	xi
Abreviaciones	xi

Capítulo 1. Introducción	13
1.1 Introducción general	13
1.2 Análisis técnico de equipos y transmisión inmersiva en redes 5G	14
1.3 Planteamiento del problema	15
1.4 Justificación	15
1.5 Revisión bibliográfica	16
1.6 Hipótesis de trabajo	19
1.7 Objetivos	19
1.7.1 Objetivo general	19
1.7.2 Objetivos específicos	19
1.8 Alcances y limitaciones	19
1.8.1 Alcances	19
1.8.2 Limitaciones	20
1.9 Metodología	20
1.9.1 Diseño metodológico	20
1.9.2 Etapas de desarrollo experimental	20
1. Revisión de equipos y software disponibles	20
2. Configuración inicial del entorno	21
3. Establecimiento de entorno de red	21
4. Integración y manejo de transmisiones en vivo mediante software de transmisión.....	21
1.9.3 Escenarios de transmisión	21
Caso 1: Inalámbrica indirecta (Qoocam 360 180VR)	
Caso 2: Conexión alámbrica directa al computador (Qoocam 360 180VR)	
Caso 3: Conexión inalámbrica por Wi-Fi y datos móviles (Insta360 X3)	
Caso 4: Conexión alámbrica cámara-celular (Insta360 X3)	
Caso 5: Conexión alámbrica directa al computador (Insta360 X3)	
1.9.4 Transmisiones con contenido pregrabado	23
1.9.5 Generación de recorridos virtuales	23
1.9.6 Recolección y análisis de datos	23

Capítulo 2. Marco Teórico	24
2.1 Arquitecturas 5G	24
2.1.1 5G Non-Stand Alone (NSA)	24
2.1.2 5G Stand Alone (SA)	24
2.2 Laboratorio Movistar 5G UCSC	26

2.3 Rack 5G UCSC	26
2.3.1 Componentes del Rack 5G	27
2.3.2 Transformación de señal (CPE)	28
2.3.3 Arquitectura de la red 5G	29
2.4 Conexión a Internet	29
2.5 Mapas de cobertura digital y antenas según operador.....	31
2.5.1 Movistar	31
2.5.2 Entel	31
2.5.3 Claro	32
2.5.4 WOM	32
2.5.5 Regulación y bandas de frecuencia	33
2.5.6 Bandas de frecuencia utilizadas en redes móviles.....	33
2.5.7 Relación entre frecuencia, cobertura y propagación	34
2.6 Mapa de coberturas adjudicadas de licitaciones 5G	35
2.7 Antenas autorizadas y normativa aplicable	36
2.7.1 Antenas en servicio según Ley de Torres	37
2.8 Herramientas implementadas	39
2.8.1 Cámaras 360°	39
2.8.2 Lentes de realidad virtual	40
2.8.3 Televisores	42
2.9 Software de transmisiones	43
Capítulo 3. Análisis y Aplicación	44
3.1 Especificaciones mínimas según plataforma	44
3.2 Equipo utilizado Conectividad y especificaciones técnicas	45
3.3 Configuración del sistema emisor 1	47
3.3.1 Transmisión inalámbrica mediante software en dispositivos móviles	
3.4 Configuración del sistema emisor 2	48
3.4.1 Caso 1: Inalámbrica indirecta (Qoocam 360 180VR)	48
3.4.2 Caso 2: Conexión alámbrica directa al computador (Qoocam 360 180VR)	49
3.4.3 Caso 3: Conexión inalámbrica por Wi-Fi y datos móviles (Insta360 X3)	49
3.4.4 Caso 4: Conexión alámbrica cámara-celular (Insta360 X3)	50
3.4.5 Caso 5: Conexión alámbrica directa al computador (Insta360 X3)	50
3.4 Caso receptor/usuario	51
Capítulo 4. Resultados Experimentales	52
4.1 Características y pruebas en distintos servidores	52
4.2 Resultados de conexión con cámaras Qoocam 360/180VR	54
4.2.1 Conexión inalámbrica	54
4.2.2 Conexión alámbrica	55
4.3 Resultados de conexión con Insta360 X3	57
4.3.1 Inalámbrica 1 Transmisión en exteriores	57
4.3.2 Inalámbrica 2 – Transmisión en red Wi-Fi	58
4.3.3 Alámbrica – Transmisión directa a computador	59
4.4 Estadísticas en transmisiones	60
4.4.1 Transmisión en Full HD	60
4.4.2 Transmisión en 2K	61
4.4.3 Transmisión en 4K.....	61

4.4.4 Consideraciones adicionales.....	62
Síntesis del análisis comparativo.....	63
Capítulo 5. Creación de Imágenes 360° (Street View)	64
5.1 Inmersión vía imágenes	64
5.1.1 Imágenes con software Matterport	64
5.1.2 Imágenes con software Kuula	66
5.1.3 Consideraciones técnicas	67
5.1.4 Imágenes con fotogrametría y Reality Capture	67
5.1.5 Herramientas complementarias para modelado inmersivo	71
Capítulo 6. Importancia Social	72
6.1 Impacto social y educativo de la tecnología inmersiva	72
6.2 Participación en instancias de innovación e impacto	72
6.2.1 Falling Walls Lab Chile 2024.....	72
6.2.2 Idea e Innova UCSC- Julio 2024	73
6.2.3 Modelo de negocio propuesto	73
6.2.4 Impacto y proyección	74
6.2.5 Valor educacional de transmisiones inmersivas	74
Capítulo 7. Valor Monetarios para equipamiento	75
7.1 Presupuesto base de equipos digitales	75
7.2 Composición del set de trabajo inmersivo	75
7.3 Presupuesto para mejora y ensamble de hardware	76
7.4 Consideraciones finales	76
Capítulo 8. Conclusiones y Proyecciones	77
8.1 Conclusiones generales	78
8.2 Trabajos futuros	78
Bibliografía	79
Anexos	80
Anexo A. Vistas Generales	80
A.1. Vista OBS Studio	80
A.2. Vista Matterport	80
A.3. Vista Kuula	81
A.4. Vista de Reality Capture	81
A.5. Vistas de avances de trabajos futuros	82
Anexo B. Referencias conceptuales complementarias	83
B.1 Ley de Ohm	83
B.2 Leyes de Murphy	83
B.3 Leyes de percepción visual	83

Lista de tablas

Tabla 2.1 Comparativa de redes 5G SA y NSA	25
Tabla 2.4.1. Velocidades teóricas de internet.....	30
Tabla 2.5.1. Bandas de frecuencia según tecnología.....	33
Tabla 2.8.1. Características específicas de lentes.....	39
Tabla 2.8.2. Vista humana.....	39
Tabla 3.1. Especificaciones por plataforma	44
Tabla 4.1. Estadísticas de transmisión según resolución (1)	62
Tabla 4.2. Estadísticas de transmisión según resolución (2)	62
Tabla 4.3. Comparativa de escenarios de transmisión 360°	63
Tabla 5.1.1. Ventajas y desventajas de software Matterport.....	65
Tabla 5.1.1. Ventajas y desventajas de software Kuula	67
Tabla 5.1.2. Ventajas y desventajas de software RealityCapture.....	70
Tabla 6.1. Comparativa con iniciativas chilenas.....	73
Tabla 7.1. Equipos digitales según proveedores comerciales.....	74
Tabla 7.2. Equipos digitales, cantidades y valores.....	75
Tabla 7.3. Valores de componentes para mejoramiento de hardware.....	75

Lista de figuras

Capítulo 1. Introducción	13
Figura 1.9.1. Vista OBS Studio.....	21
Capítulo 2. Marco Teórico	24
Figura 2.3.1. BBU (Baseband Unit)	27
Figura 2.3.2. AAU MIMO (Active Antenna Unit con tecnología MIMO)	27
Figura 2.3.3. RAN (Radio Access Network)	28
Figura 2.3.4. CPE (Customer Premises Equipment)	28
Figura 2.3.5. Arquitectura de red 5G.....	29
Figura 2.5.1. Coberturas operador Movistar.....	31
(a) Cobertura 2G.....	31
(b) Cobertura 3G.....	31
(c) Cobertura 4G.....	31
Figura 2.5.2. Coberturas operador Entel.....	31
(a) Cobertura 2G.....	31
(b) Cobertura 3G.....	31
(c) Cobertura 4G.....	31
Figura 2.5.3. Coberturas operador Claro.....	32
(a) Cobertura 2G.....	32
(b) Cobertura 3G.....	32
(c) Cobertura 4G.....	32
Figura 2.5.4. Coberturas operador WOM.....	32
Figura 2.5.5. Frecuencias y anchos de banda en telefonía móvil.....	33
Figura 2.5.6. Longitud de onda.....	34
Figura 2.6.1. Coberturas 5G adjudicadas por operador	35

(a) Operador Movistar.....	33
(b) Operador Entel.....	33
(c) Operador WOM.....	33
(d) Operador Claro.....	33
Figura 2.7.1. Mapa de antenas totales en servicio para distintas tecnologías	36
Figura 2.7.2. Antenas, infraestructura y territorios urbanos saturados	36
(a) Antenas en servicio.....	36
(b) Densidad de potencia.....	36
Figura 2.7.3. Emisiones permitidas según zona.....	36
Figura 2.8.1. Visor estereoscópico.....	40
Figura 2.8.2. Fotografía estereoscópica.....	40
Figura 2.8.3. Lentes Oculus Quest 2.....	41
Figura 2.8.4. Imagen visualizada en lentes Oculus Quest 2.....	41
Figura 2.8.5. Resolución de pantallas.....	42
Figura 2.9.1. Vista previa OBS Studio.....	43
Capítulo 3. Análisis y Aplicación	44
Figura 3.2.1. Cámara Qoocam 360 180VR.....	45
Figura 3.2.2. Cámara Insta 360 X3.....	45
Figura 3.2.3. Computador portátil lenovo para transmisiones	46
Figura 3.2.4. Smartphone apple iPhone 11.....	46
Figura 3.3.1. Elementos necesarios para conexión de cámaras Qoocam	47
(a) Cámaras Qoocam 360 180VR.....	47
(b) Cam link 4K elgato.....	47
(c) Adaptadores y cables	47
(d) Smartphone y computador portatil.....	47
Figura 3.3.2. Software CameraFi live	48
Figura 3.4.1. Conexión alámbrica con uso de software	48
Figura 3.4.2. Conexión alámbrica directa a computador	49
Figura 3.4.3. Conexión de cámara insta 360 X3 y dispositivo móvil	49
Figura 3.4.4. Conexión desde dispositivo móvil a cámara insta 360 X3.....	50
Figura 3.4.5. Conexión directa de cámara insta 360 X3 a computador	50
Figura 3.5.1. Accesorios necesarios para mayor experiencia en realidad virtual.....	51
Capítulo 4. Resultados Experimentales	52
Figura 4.1.1. Velocidades de carga, descarga y latencia para distintos operadores	52
Figura 4.2.1 Resultados de conexión con cámaras Qoocam 360 180VR	54
(a) Conexiones inalámbricas.....	54
(b) Conexiones alámbricas.....	54
Figura 4.2.2. Lectura de dispositivos externos conectados	54
Figura 4.2.3. Visualización de cámaras	55
Figura 4.2.4. Adición de fuentes de capturadora de video	55
Figura 4.2.5. Emisión de video 360 en vivo.....	56
Figura 4.3.1. Selfie Stick usado.....	57
Figura 4.3.2. Interfaz Insta 360 X3	57
(a)Vinculación de cámara Insta 360 X3.....	57
(b) Configuración de directo	57
Figura 4.3.3. Interfaz insta 360 X3	58

(a) Vinculación de cámara Insta 360 X3 con datos móviles	58
(b) Configuración de directo	58
Figura 4.3.4. Transmisión 360 con vista de cable de conexión	58
Figura 4.3.5. Conexión a computador alámbrica	59
Figura 4.3.6. Vista de errores ocasionados en conexión alámbrica	59
Figura 4.4.1. Estadísticas de transmisión (Facebook y Youtube) FHD	60
Figura 4.4.2. Estadísticas de transmisión (Facebook y Youtube) 2K	61
Figura 4.4.3. Estadísticas de transmisión (Facebook y Youtube) 4K	61
Capítulo 5. Creación de Imágenes 360° (Street View)	64
Figura 5.1.1. Software Matterport.....	64
Figura 5.1.2. Puntos pivote 3D.....	65
Figura 5.1.3. Plano 3D recorrido virtual Teatro UCSC Matterport.....	65
Figura 5.1.4. Plano 3D recorrido virtual Teatro UCSC Kuula.....	66
Figura 5.1.5. Reality Capture.....	67
Figura 5.1.6. Espacio escaneado para realidad virtual.....	68
(a) Espacio escaneado a 3D.....	68
(b) División de videos a fotogramas	68
Figura 5.1.7. Vista frontal de realidad virtual.....	68
Figura 5.1.8. Vista 3/4 de realidad virtual.....	69
Figura 5.1.9. Ejemplo de superposición de objetos.....	69
Figura 5.1.10. Mapa de sólidos escaneo de espacio.....	70
Figura 5.1.11. Mapas 3D de realidad virtual.....	70
(a) Vértices.....	70
(b) Sólidos.....	70
(c) Texturas suavizadas.....	70
Capítulo 6. Importancia Social	72
Figura 6.1.1. Presentación en Falling Walls Lab Chile.....	72
Figura 6.1.2. Presentación Idea e Innova UCSC.....	73
Anexos	80
Figura A.1.1. Vista de OBS Studio con sistema de transmisión implementado.....	80
Figura A.2.1. Trabajos de inmersión en software Matterport y creación de espacios 3D.....	80
Figura A.2.1. Trabajos de inmersión en software Kuula y creación de espacios 3D.....	81
Figura A.3.1. Software Reality Capture e interfaz para la creación de espacios 3D.....	81
Figura A.4.1. Interfaz software Revit (a) y unreal engine (b)	82

Glosario

Ping: Tiempo que tardan en viajar entre dos dispositivos o a través de una red.

Espectro radioeléctrico: Distribución energética del conjunto de todas las ondas electromagnéticas.

Plugins: Programas complementarios que amplían funciones de aplicaciones.

Renderizado: El renderizado es el proceso de finalización de una imagen digital o un modelo 3D mediante software informático.

Network slicing: Tecnología de comunicaciones que permite dividir una única infraestructura de red física en múltiples redes lógicas y virtuales independientes sobre la misma infraestructura compartida.

Uplink: Enlace de comunicación que transmite datos desde un dispositivo de red de menor capacidad a una red o dispositivos de mayor capacidad.

Abreviaciones

SA: Stand Alone, es una infraestructura 5G que opera forma autónoma, sin depender de la estructura 4G existente.

NSA: Non-Standalone. Es una implementación de 5G a partir de la infraestructura 4G para proporcionar servicios 5G.

eMBB: Banda ancha móvil mejorada

URLLC: Comunicaciones Ultra Confiables de Baja Latencia

mMTC: Comunicaciones Masivas Tipo Máquina, es una tecnología de las redes 5G que permite la conexión de una gran cantidad de dispositivos con necesidades de bajo consumo de datos y batería.

3GPP: Es una colaboración internacional de organizaciones que desarrollan especificaciones técnicas para redes móviles

LTE: Long Term Evolution (evolución a largo plazo). Es un estándar de comunicación inalámbrica de cuarta generación (4G) para redes móviles

RTMP: Real-Time Messaging Protocol (RTMP) transmite medios a partir de los protocolos TCP (Transmission Control Protocol) y UDP (User Datagram Protocol).

RTMPS: Es una variación del protocolo RTMP, con una capa de seguridad añadida, con cifrados TLS (Transport Layer Security) o SSL (Secure Sockets Layer).

RTSP: Real-Time Streaming Protocol, es un protocolo bastante antiguo, conocido por su baja latencia, pero a su vez el más limitado. EL protocolo RTSP es la arquitectura principal en sistemas de vigilancia y la conexión con cámaras IP.

SRT: Secure Reliable transport, es un sistema de transporte de señal, es de código abierto, que tiene como objetivo disminuir los cambios de ancho de banda y la pérdida de información para optimizar la experiencia en streaming. Admite todo tipo de códecs de video y audio.

HLS: HTTP live Streaming, a base del protocolo HTTP, permite la transmisión de contenido multimedia. Permite desplegar contenido mediante navegadores y redes de distribución de contenido. Su principal desventaja es la compatibilidad y su alta latencia

CPE: Customer Premises Equipment para conexión del cliente a la red del proveedor.

Fps: “Fotogramas por segundo” frecuencia con la que se actualiza una imagen em pantalla.

BBU: Base Band Unit (unidad de banda base).

AAU MIMO: Active Antena Unit Multiple-input Multiple-output. Antena de múltiples entradas y múltiples salidas

PING: Packet internet Groper. Herramienta que mide el tiempo que tarda en enviar y recibir datos

MIB: Management Information Base (base de datos virtual). Unidad de medida de almacenamiento de datos

Kbps: Kilobits por segundo.

Capítulo 1 Introducción

1.1. Introducción General

La comunicación fue una necesidad fundamental del ser humano a lo largo de la historia. Desde los primeros sistemas basados en la escritura manual, transportada por mensajeros a pie o a caballo, hasta la invención del telégrafo que permitió el envío de mensajes codificados a largas distancias casi en tiempo real, los avances tecnológicos transformaron profundamente la manera en que las personas se conectaban entre sí.

En ese período, el desarrollo de las telecomunicaciones alcanzó niveles que superaron con creces la simple transmisión de textos o imágenes estáticas. Ya era posible visualizar lugares remotos en tiempo real, interactuar mediante plataformas digitales e incluso experimentar entornos inmersivos gracias al uso de tecnologías como la realidad virtual y las transmisiones en 360 grados.

En este contexto, la implementación de redes móviles de quinta generación (5G) representó un hito relevante. Su alta velocidad de transferencia de datos, mayor capacidad de ancho de banda y menor latencia permitieron nuevas posibilidades en el ámbito del streaming en vivo y la interacción inmersiva. Estas características técnicas abrieron la puerta a experiencias de transmisión en tiempo real con alta resolución, múltiples ángulos de visión y mayor estabilidad de conexión.

La presente tesis se enmarcó en el estudio y desarrollo de transmisiones inmersivas tanto dentro como fuera del Laboratorio 5G UCSC, utilizando cámaras 360°, realidad virtual y plataformas compatibles con este tipo de contenido, con el propósito de explorar las capacidades técnicas y operativas que ofreció la red 5G para este tipo de aplicaciones.

1.2. Análisis técnico de equipos y Transmisión inmersiva en redes 5G

El desarrollo de este proyecto requirió, como punto de partida, una comprensión adecuada de los dispositivos y tecnologías involucradas. Entre estos destacaron las cámaras 360°, los lentes de realidad virtual (VR) y los distintos protocolos de transmisión en tiempo real, los cuales conformaron la base operativa del sistema inmersivo propuesto.

En esta línea, se consideró relevante el estudio previo de las características técnicas de cámaras como la Qoocam 360/180VR y la Insta360 X3, analizando sus capacidades de captura, resolución, conectividad (alámbrica e inalámbrica), compatibilidad con plataformas de streaming y formatos de salida. Asimismo, se revisaron sus requerimientos operativos, como velocidad de transmisión, tasa de bits, autonomía, codificación de video y soporte para entornos inmersivos 3D o 180VR.

Paralelamente, se trabajó en la exploración de software especializado en transmisión en vivo, tales como OBS Studio y CameraFi Live, los cuales permitieron la configuración personalizada de transmisiones en tiempo real, la gestión de múltiples fuentes de entrada (audio, video, gráficos) y el cumplimiento de estándares exigidos por plataformas como YouTube, Facebook Live y similares. También se consideró la utilización de software complementario de edición y procesamiento, como DaVinci Resolve, Matterport y Reality Capture, para la generación de contenidos inmersivos asíncronos y recorridos virtuales.

Otro aspecto fundamental fue el conocimiento previo de las especificaciones mínimas de hardware necesarias para una transmisión fluida y de calidad. Esto implicó comprender el rendimiento del CPU, GPU, consumo de memoria RAM y capacidad de red, además de las exigencias de procesamiento de imágenes en tiempo real en altas resoluciones (2K, 4K, 8K).

Finalmente, se revisaron proyectos similares, normativas nacionales (como la Ley de Torres en Chile), estudios de cobertura digital publicados por SUBTEL y comparativas entre redes 5G de diferentes operadores, para contextualizar técnica y normativamente el presente trabajo dentro del ecosistema de telecomunicaciones de ese período.

1.3. Planteamiento del Problema

Las transmisiones en vivo de contenido inmersivo, como videos 360° y 180VR, requirieron condiciones técnicas exigentes para asegurar calidad visual, continuidad de señal y baja latencia. A pesar de su avance internacional, su implementación en universidades chilenas, especialmente con soporte 5G, fue aún incipiente y escasamente documentada. En la UCSC, el Laboratorio 5G en colaboración con Movistar ofreció una infraestructura adecuada, pero no se contó con protocolos validados, parámetros técnicos definidos ni evidencia clara sobre la suficiencia del equipamiento disponible (cámaras Qoocam, Insta360, visores Oculus Quest 2, etc.) para realizar transmisiones inmersivas en tiempo real y con calidad comprobada.

Tampoco se documentaron diferencias entre transmitir en 4G o 5G, ni entre contenido en vivo y pregrabado, lo que limitó la generación de guías replicables. Esta situación planteó la necesidad de diseñar, ejecutar y validar un sistema de transmisión inmersiva sobre red 5G, explorando diferentes escenarios técnicos, evaluando el desempeño del hardware y documentando las variables que afectaron la estabilidad y calidad de la experiencia.

1.4. Justificación

La implementación del 5G en Chile abrió nuevas oportunidades de innovación tecnológica, especialmente en educación y comunicaciones. Sin embargo, su uso efectivo en contextos universitarios siguió en etapa inicial. Esta tesis permitió evaluar técnicamente las capacidades de redes 4G, fibra óptica y 5G en la UCSC, considerando latencia, ancho de banda, estabilidad y la integración de múltiples dispositivos, lo que representó un aporte práctico al área de Ingeniería Civil Eléctrica. Desde lo académico, el trabajo fortaleció la formación profesional al aplicar tecnologías emergentes, optimizar recursos de red y analizar el rendimiento en tiempo real. Institucionalmente, contribuyó a posicionar a la UCSC como referente en el uso experimental de 5G, generando contenidos inmersivos aplicables en docencia, divulgación y vinculación con el medio. Socialmente, promovió la accesibilidad educativa para públicos remotos o con movilidad reducida, validando así la pertinencia y proyección de este proyecto.

1.5. Revisión Bibliográfica

♣ P. Pérez de Arce, “*Transmisión inmersiva en tiempo real mediante cámaras 360° y plataformas digitales*”, 2023, [1].

En este trabajo se analiza la transmisión inmersiva en tiempo real utilizando cámaras 360° y plataformas digitales, destacando la necesidad de la convergencia de redes móviles de alta velocidad, hardware de captura, visores de realidad virtual y software especializado. El estudio identificó como problema central la falta de un protocolo validado que garantizara la estabilidad y calidad de las transmisiones sobre redes 5G. Asimismo, se señaló que la transmisión en 180° y 360° con alta resolución exigió más de 20 Mbps sostenidos y baja latencia, condiciones que las redes 4G no aseguraron.

♣ Meta Platforms Inc., “*Oculus Quest 2: autonomía y experiencia inmersiva*”, 2023, [2].

En este trabajo se presenta el dispositivo Oculus Quest 2 como referente en la reproducción inmersiva, destacando por su autonomía al no requerir conexión constante a un computador externo. Su diseño integra hardware optimizado para experiencias de realidad virtual de alta calidad, lo que permitió al usuario final acceder a contenidos 360° y aplicaciones interactivas con mayor portabilidad y facilidad de uso. Estas características consolidaron al Oculus Quest 2 como uno de los dispositivos más representativos en la masificación de la realidad virtual.

♣ Qoocam, “*Especificaciones técnicas de cámaras Qoocam 360/180VR*”, 2023, [3].

Este dispositivo se caracterizó por ofrecer grabación en 360° y en 180VR, un formato que, a diferencia del 360°, se centra únicamente en la mitad del campo visual, pero con mayor nivel de detalle y realismo estereoscópico, generando una experiencia más inmersiva para el usuario. Además, incorporó conectividad versátil y compatibilidad con visores de realidad virtual, lo que lo convirtió en una herramienta eficaz para capturas inmersivas en tiempo real.

♣ Insta360, “*Insta360 X3: características y compatibilidad con VR*”, 2023, [4].

La cámara Insta360 X3 destacó por su portabilidad y calidad de imagen en 360°, junto con funciones de edición integradas y amplia compatibilidad con plataformas VR. Su diseño optimizado facilitó su aplicación en entornos académicos y de transmisión inmersiva.

♣ Cambridge in Colour, “*Optical Comparisons and Human Visual Perception*”, 2020, [5].

Este trabajo abordó la relación entre las capacidades de captura de imagen y la percepción visual humana, utilizando comparaciones ópticas como referencia. El análisis permitió comprender los límites de resolución y nitidez que el ojo puede percibir, aportando un marco teórico esencial para evaluar la calidad de las transmisiones inmersivas.

♣ SUBTEL, “*Ley N° 20.599: Protección de los derechos de los consumidores en telecomunicaciones*”, 2012, [6].

La Ley N° 20.599 estableció lineamientos para proteger los derechos de los usuarios de telecomunicaciones, regulando calidad de servicio, transparencia e responsabilidad de los proveedores. Esta normativa condicionó el despliegue de infraestructura móvil, incluyendo redes 4G y 5G, asegurando cobertura y continuidad del servicio, y proporcionando un marco legal clave para la implementación de tecnologías de transmisión inmersiva en tiempo real, como VR y 360°, con estándares mínimos de confiabilidad y accesibilidad.

♣ SUBTEL, “Mapas de cobertura digital y directrices regulatorias para redes móviles 5G”, 2024, [7].

SUBTEL publicó mapas de cobertura digital que proporcionaron una guía estratégica para la expansión de redes móviles de alta velocidad en Chile, identificando zonas prioritarias y brechas de conectividad. Estas directrices facilitaron la planificación de infraestructura 5G, permitiendo que operadores e instituciones académicas evaluaran la viabilidad de transmisiones de contenido inmersivo en tiempo real, incluyendo 360°, 180VR y 4K. Asimismo, los documentos regulatorios fomentaron la interoperabilidad entre diferentes tecnologías y plataformas, contribuyendo a un despliegue más eficiente y seguro de servicios avanzados de comunicación.

♣ Leiva Espinoza, “Campus 5G de la Universidad de Concepción y entornos de prueba 5G en Chile”, 2024, [8].

A nivel institucional, el Laboratorio Movistar 5G UCSC dispuso de un entorno de pruebas avanzado que permitió evaluar la transmisión de contenido inmersivo en tiempo real con cámaras 360°, 180VR y 8K. Este laboratorio se comparó con iniciativas similares, como el Campus 5G de la Universidad de Concepción, destacando por su infraestructura de última generación, conectividad de alta velocidad y capacidad para simular escenarios complejos de transmisión. La implementación de este entorno facilitó pruebas controladas de redes móviles, optimización de latencia y análisis de la experiencia de usuario en entornos VR, contribuyendo significativamente al desarrollo de aplicaciones académicas y experimentales en el ámbito de las comunicaciones avanzadas.

♣ Gupta, et al., “Herramientas de transmisión y edición para contenido inmersivo en redes 5G”, 2021, [9].

Respecto al software, se revisaron herramientas como OBS Studio, CameraFi Live, DaVinci Resolve, Matterport, Kuula y Reality Capture, las cuales permitieron evaluar distintas etapas del flujo de producción de contenido inmersivo, desde la captura y edición hasta la transmisión en tiempo real. Se destacó la importancia de arquitecturas optimizadas que garantizaran sincronización precisa entre dispositivos, codificación adaptativa para distintos anchos de banda y mínima latencia, especialmente en redes 5G. Estas plataformas facilitaron la creación de experiencias inmersivas asíncronas y sincrónicas de alto valor académico, permitiendo la reconstrucción digital de espacios, la generación de recorridos virtuales interactivos y la evaluación de la calidad de la transmisión bajo condiciones controladas.

♣ Arnheim, R., “Arte y percepción visual: psicología de la visión en el arte”, 1974, [10].

Las teorías de Arnheim sobre psicología de la percepción y diseño visual fueron utilizadas para fundamentar la evaluación de la experiencia inmersiva en este informe. Postula que la percepción visual no es pasiva, sino que implica procesos cognitivos que organizan el espacio, la forma y el color, influyendo directamente en cómo los usuarios interpretan y se sienten dentro de un entorno visual. Esta perspectiva fue aplicada para analizar cómo los contenidos capturados con cámaras 360° y 180VR afectan la percepción del observador, permitiendo vincular las decisiones técnicas de captura, codificación y transmisión con la respuesta visual y cognitiva. De esta manera, la obra de Arnheim proporcionó un marco teórico que sustentó la planificación de recorridos virtuales y la optimización de la experiencia inmersiva en escenarios de alta fidelidad.

♣ Palmer, S. E., “Vision Science: Photons to Phenomenology”, 1999, [11].

Palmer postula principios fundamentales de la ciencia de la visión, incluyendo cómo los humanos perciben el color, la forma, la profundidad y el movimiento en entornos visuales complejos. En este informe, su obra se utilizó para comprender cómo la percepción humana interactúa con contenidos inmersivos capturados con cámaras 360° y 180VR. Esto permitió vincular los parámetros técnicos de captura, como resolución, rango dinámico y ángulos de visión, con la experiencia perceptual de los usuarios, optimizando la fidelidad y la efectividad de los recorridos virtuales y transmisiones en tiempo real.

♣ Lidwell, W., Holden, K., & Butler, J., “Universal Principles of Design”, 2010, [12]. Lidwell, Holden y Butler presentan principios universales del diseño que incluyen jerarquía visual, consistencia, equilibrio y guía del enfoque del observador. En este informe, su obra se aplicó para estructurar la presentación de contenidos inmersivos y recorridos virtuales, asegurando que los usuarios percibieran la información de manera clara y coherente dentro de entornos VR. Estos principios guiaron decisiones de composición, encuadre y navegación en escenarios de 360° y 180VR, contribuyendo a mejorar la experiencia inmersiva y la interpretación visual de los espacios digitales generados.

♣ Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I., “A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda”, 2020, [13].

Radianti et al. postulan que la realidad virtual posee un alto valor pedagógico al aumentar la motivación, la participación activa y la retención del aprendizaje en entornos educativos. En este informe, su obra se utilizó para fundamentar la incorporación de transmisiones inmersivas en contextos académicos, demostrando cómo experiencias en 360° y 180VR pueden potenciar la comprensión de contenidos complejos. Además, permitió analizar las ventajas de la interactividad y la presencia en entornos virtuales, justificando la implementación de recorridos y laboratorios virtuales dentro de la investigación, como una herramienta complementaria a la enseñanza tradicional y al aprendizaje práctico.

♣ Jensen, L., & Konradsen, F., “A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education: Benefits, challenges and future directions”, 2018, [14].

Jensen y Konradsen postulan que la realidad virtual favorece la inclusión educativa, permitiendo que estudiantes con distintas capacidades accedan a experiencias de aprendizaje inmersivas. En este informe, se utilizó para respaldar la implementación de entornos 360° y 180VR en contextos académicos, demostrando cómo estas tecnologías facilitan la participación equitativa y mejoran la accesibilidad en la educación.

♣ Fowler, C., “Virtual learning environments in higher education: A review of the research literature”, 2015, [15].

Fowler enfatiza la importancia de metodologías activas en entornos de aprendizaje virtual, destacando cómo la interacción y la participación mejoran la comprensión y retención de contenidos. En este informe, su obra se utilizó para sustentar la implementación de transmisiones inmersivas 360° y 180VR como herramientas de aprendizaje activo, promoviendo experiencias educativas más dinámicas y efectivas.

1.6. Hipótesis de Trabajo

Utilizando una red 5G NSA (Non-Stand alone) instalada en Chile, es posible realizar transmisiones en vivo con cámaras 360, 180 VR y 4K que permita el desarrollo de plataformas para exploración y aprendizaje de espacios remotos.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Implementar un sistema de transmisión de video en vivo utilizando cámaras 360 180VR 4K. sobre una red 5G comercial chilena con el fin de potenciar el aprendizaje y promover la exploración de espacios remotos mediante experiencias inmersivas.

1.7.2. Objetivos Específicos

1. Generar transmisiones en vivo mediante cámaras 360° para desarrollar experiencias inmersivas.
2. Realizar la transmisión de imágenes en tiempo real a través de redes 5G comerciales, evaluando su desempeño y estabilidad.
3. Facilitar la visualización de contenido en vivo mediante lentes de realidad virtual, optimizando la inmersión del usuario.
4. Analizar el impacto del sistema en los procesos de aprendizaje y su efectividad para la exploración de espacios remotos.

1.8. Alcances y Limitaciones

1.8.1. Alcances

- El proyecto contempla pruebas experimentales reales dentro del laboratorio 5G de la UCSC, con cámaras 360° y visores de realidad virtual, utilizando principalmente software de código abierto o gratuito.
- Se considerará la configuración y transmisión en plataformas seleccionadas que permitan video inmersivo (como YouTube y Facebook 360).
- Se desarrollarán imágenes y recorridos 360° estilo Street View mediante software especializado, como Matterport o Reality Capture.
- Se elaborarán esquemas de conexión, planos de instalación básica y propuestas de canalización para replicabilidad futura del sistema.
- Se medirá la latencia, estabilidad y tasa de transferencia de las transmisiones en vivo.

1.8.2. Limitaciones

- El trabajo no contempla el diseño de hardware propio ni la implementación de redes 5G a nivel técnico, ya que se utilizará la infraestructura ya instalada en la UCSC.
- Las pruebas estarán limitadas por la disponibilidad horaria y técnica del laboratorio, así como por los recursos computacionales accesibles (equipos sin GPU dedicada).
- Las transmisiones en vivo serán de tipo demostrativo, no permanentes ni a escala masiva.
- El proyecto no incluye validación de experiencia de usuario final a través de encuestas o métricas, ya que su enfoque es técnico-experimental.

1.9. Metodología

La metodología del presente trabajo se estructuró en función de la hipótesis y objetivos planteados, orientada a implementar y evaluar un sistema de transmisión en vivo utilizando cámaras 360°, 180VR y resolución 4K sobre redes 5G NSA, además se consideró la arquitectura SA disponible en el laboratorio, aunque sin señal activa en este caso.

1.9.1. Diseño metodológico

Se adoptó un diseño experimental descriptivo y controlado, que permitió validar de forma empírica la viabilidad de transmisiones inmersivas bajo distintas condiciones de red, hardware y software. Este enfoque posibilitó analizar la calidad de transmisión, la compatibilidad de los dispositivos y el impacto potencial del sistema en aprendizaje y exploración de espacios remotos.

1.9.2. Etapas de desarrollo experimental

1. Revisión de equipos y softwares disponibles

Se realizó un catastro de los recursos disponibles en el laboratorio:

- Cámaras: Qoocam 360/180VR, Insta 360X3
- Dispositivos de visualización: Lentes Oculus Quest 2, pantallas 8K
- Redes: Conexión 5G NSA comercial y conocimiento de arquitectura 5G SA.
- Softwares: OBS Studio, CameraFi live, DaVinci Resolve, Matterport y Reality Capture.

Se verificó la compatibilidad de cada dispositivo y software con plataformas de transmisión (YouTube Live 360, Facebook Live 360) y protocolos de comunicación (RTMP, HLS), asegurando un entorno técnico adecuado para las pruebas.

2. Configuración inicial del entorno

Se configuraron las redes domésticas para pruebas de conectividad, además, de la instalación y actualización de los programas requeridos. Se ajustaron las cámaras 360° según sus capacidades nativas de resolución, fotogramas por segundo (fps) y bitrate. Se definen parámetros base para las pruebas con calidad de imagen mínima Full HD (1920x1080), tasa de bits recomendada (20 a 100Mbps). Se evaluaron limitaciones físicas del entorno, tales como interferencias y obstáculos, para garantizar consistencia en los ensayos.

3. Establecimiento de entorno de red

Se utilizaron redes 5G NSA de distintos operadores comerciales para garantizar velocidad de subida estable y baja latencia. Se documentó la arquitectura 5G SA disponible en el laboratorio, aunque no se contó con señal activa, para futuras comparaciones y análisis teóricos.

4. Integración y manejo de transmisiones en vivo mediante software de transmisión

OBS Studio se utilizó como plataforma central de emisión, integrando todas las fuentes de video y audio, y ajustando escenas para cada cámara y resolución. Se aplicaron filtros de corrección de color y composición en tiempo real, configurando la conexión hacia plataformas de streaming mediante protocolos RTMP y HLS. Esta etapa permitió consolidar los flujos de transmisión generados en los escenarios anteriores, registrar métricas de desempeño y garantizar la emisión estable y de alta calidad. Adicionalmente, se incorporaron plugins para rotación en 3D, superposición de gráficos y control de escenas en tiempo real. (ver Figura 1.9.1)



Figura 1.9.1. Vista de OBS Studio. Fuente: OBS

1.9.3. Escenarios de transmisión

Se diseñaron cinco posibles escenarios de transmisión, combinando los distintos tipos de conexión posible (alámbrica, inalámbrica, directa y vía software), cada uno con sus respectivas condiciones:

Caso 1: Qoocam 360/180VR+ Celular 5G vía capturadora

- Se configuró la cámara Qoocam conectada a capturadora de video (Elgato Cam Link 4K) que a su vez se conecta a teléfono inteligente con software CameraFi Live. Con el objetivo de explorar una alternativa móvil, sin uso de computadores que simulara un flujo de video inmersivo desde terreno hacia plataformas de transmisión.

Caso 2: Qoocam 360/180VR conexión directa a Computador

- Conexión a computador mediante la misma capturadora. Se configuró el software OBS Studio, como plataforma de emisión. Prueba de distintas resoluciones de entrada y salida de video.

Caso 3: Conexión inalámbrica de cámara Insta360 X3 a smartphone mediante app oficial

- Uso de aplicación oficial Insta360 para vincular cámara a smartphone a través de red Wifi interna. Desde el dispositivo móvil se configuró una transmisión directa a distintas plataformas con las opciones integradas en la app. Representando una configuración completamente portátil sin intervención de softwares externos.

Caso 4: Conexión alámbrica de cámara Insta360 X3 a smartphone

- Conexión de cámara directa a smartphone mediante cable USB-C utilizando funciones de transmisión directa desde la app oficial.

Caso 5: Conexión de cámara Insta360 X3 directa a computador con OBS Studio

- En este escenario se conectó la cámara directa al computador por cable y se configura OBS Studio orientada para transmisiones en vivo de alta calidad desde un punto fijo.

Estos escenarios permitieron evaluar la viabilidad de transmisión inmersiva en distintos contextos técnicos y de movilidad.

1.9.4. Transmisiones con contenido pregrabado

- Se grabaron escenas inmersivas con ambas cámaras.
- Procesamiento y edición en Davinci Resolve y software oficial. (stitching, ajustes de color, corrección de imagen).
- Se ejecutaron transmisiones desde OBS Studio para verificar consistencia, resolución y compatibilidad con protocolos de transmisión.

1.9.5. Generación de recorridos virtuales

Se usó el software Matterport y Kuula para escanear espacios cerrados para generar recorridos 3D interactivos. En paralelo se usó Reality Capture con fotogrametría dividiendo videos en cuadros para reconstruir digitalmente habitaciones completas.

Estos métodos permiten crear experiencias inmersivas asíncronas de alto valor para actividades académicas de aprendizaje y exploración remota.

1.9.6. Recolección y análisis de datos

Durante las transmisiones se registraron métricas técnicas como velocidad de carga y descarga, latencia, porcentaje de fotogramas utilizados y perdidos, estabilidad de conexión y errores de codificación. Además, se recopilieron indicadores de interacción en entornos 3D y participación en programas de innovación académica, permitiendo evaluar de manera bibliográfica el impacto del sistema en el aprendizaje y la exploración de espacios remotos. Esta etapa aseguró el cumplimiento del Objetivo Específico 1, al contar con datos empíricos sobre la calidad de los servicios 5G NSA y la funcionalidad de la infraestructura utilizada.

Finalmente, se consideró que la metodología aplicada proporcionó un marco adecuado para alcanzar los objetivos específicos planteados. Cada etapa fue diseñada para permitir: evaluar la calidad de transmisión de redes 5G NSA; integrar cámaras y dispositivos audiovisuales en experiencias inmersivas; y analizar, mediante indicadores de interacción y revisión bibliográfica, el impacto potencial en aprendizaje y exploración de espacios remotos. En conjunto, se estimó que estas acciones permitirían cumplir con el objetivo general del proyecto, proporcionando una base sólida para la implementación del sistema y la obtención de resultados experimentales y analíticos posteriores.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Arquitecturas 5G

El despliegue de la tecnología 5G representó un cambio trascendental en las telecomunicaciones, orientado a cubrir demandas de baja latencia, mayor capacidad de transmisión y habilitación de nuevos casos de uso como la realidad aumentada, realidad virtual, Internet de las Cosas masivo (mMTC) y comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC). Sin embargo, durante la transición hacia una red plenamente 5G, coexistieron dos arquitecturas diferenciadas: Non-Stand Alone (NSA) y Stand Alone (SA).

La primera constituyó una solución intermedia, sustentada en la infraestructura 4G LTE ya existente, mientras que la segunda correspondió a la implementación nativa y completa del núcleo y acceso de quinta generación. La comparación entre ambas arquitecturas fue determinante para comprender la evolución de las redes móviles y los beneficios que progresivamente se consolidaron en el ecosistema 5G.

2.1.1 5G Non-Stand Alone (NSA)

El enfoque NSA utilizó la red 4G LTE como ancla para el plano de control, mientras que el acceso a datos de alta capacidad se gestionó mediante portadoras 5G New Radio (NR). Es decir, el dispositivo móvil permaneció conectado simultáneamente a LTE (control) y a NR (datos), generando un modelo de dual connectivity.

Este despliegue fue particularmente atractivo en las primeras fases de la adopción de 5G, ya que permitió:

- Aprovechar infraestructura existente: reutilizando estaciones base LTE y el EPC (Evolved Packet Core).
- Reducir costos iniciales: al no requerir un reemplazo inmediato del núcleo de red.
- Acelerar el time-to-market: facilitando la comercialización de servicios 5G tempranos.

No obstante, la arquitectura NSA presentó limitaciones técnicas que restringieron el aprovechamiento pleno de las capacidades 5G:

- Dependencia del núcleo 4G EPC, lo cual impidió alcanzar latencias inferiores a 10 ms de manera consistente.
- Escasa flexibilidad en la segmentación de red (network slicing).
- Limitaciones para soportar mMTC y URLLC, orientándose principalmente a eMBB (Enhanced Mobile Broadband).

En consecuencia, el NSA fue un punto de transición hacia una arquitectura definitiva, más que un modelo sostenible a largo plazo.

2.1.2 5G Stand Alone (SA)

El despliegue SA correspondió a la arquitectura totalmente independiente, en la cual tanto el plano de control como el de usuario operaron sobre el núcleo 5G Core (5GC). Este modelo eliminó la dependencia del EPC y de las redes LTE, habilitando de manera nativa todas las funcionalidades definidas en las especificaciones 3GPP Release 15 y posteriores.

Entre sus principales características técnicas se destacaron:

- 5G Core (5GC): arquitectura basada en servicios (SBA, Service-Based Architecture) que permitió mayor modularidad y escalabilidad.
- Soporte completo de network slicing: con segmentación lógica de la red para diferentes aplicaciones (ejemplo: vehículos autónomos, IoT masivo, servicios críticos).
- Ultra baja latencia (<1 ms): habilitando aplicaciones URLLC en tiempo real.
- Optimización para IoT masivo: con soporte para millones de dispositivos por kilómetro cuadrado.
- Mayor seguridad y gestión avanzada: con nuevas funciones de autenticación, control de acceso y monitoreo del tráfico.

Si bien la implementación de SA demandó altos costos de inversión y mayor complejidad operativa, representó la consolidación plena del ecosistema 5G, habilitando no solo mejoras incrementales en capacidad, sino también la creación de nuevos modelos de negocio basados en conectividad confiable, masiva y de baja latencia.

En proyectos como el propuesto “transmisión en vivo 360°, 180VR y 4K desde el Laboratorio Movistar 5G UCSC” la elección entre SA y NSA impacta directamente en la experiencia del usuario final.

- SA es la opción preferente cuando se busca garantizar latencia mínima, uplink estable y segmentación de red para priorizar flujos de video críticos.
- NSA puede ser útil en fases de prueba o despliegues preliminares donde la infraestructura LTE ya está consolidada y los requerimientos de latencia no sean tan estrictos. (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Comparativa de redes 5G SA y NSA.

Característica	5G NSA	5G SA
Núcleo de red	Basado en núcleo 4G LTE	5G Core (Arquitectura nativa SBA)
LTE	Requerido para plano de control	No requerido, operación independiente
Latencia	10-20 ms	<1ms
Costos de despliegue	Moderados (reutilización de LTE y EPC)	Altos, infraestructura completamente nueva
Velocidad de implementación	Rápida, de transición	Lenta, requiere de infraestructura completa
Escalabilidad y futuro	Transitorio, enfocado a cobertura inicial	Alta escalabilidad, sostenible, con arquitectura definitiva

2.2 Laboratorio Movistar 5G UCSC

El Laboratorio Movistar 5G UCSC, ubicado en el tercer piso de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, tiene como propósito principal el desarrollo, experimentación y validación de soluciones tecnológicas basadas en tecnología 5G con un despliegue SA (Stand Alone).

Esta iniciativa forma parte del proyecto nacional impulsado por Movistar Empresas y la UCSC, en el marco del “Observatorio Nacional 5G”, el cual busca fomentar la colaboración entre la academia, el sector productivo y las telecomunicaciones. A través de este laboratorio, se espera facilitar la ejecución de proyectos de investigación aplicada, actividades de vinculación con empresas, y el desarrollo de trabajos de titulación de pre y posgrado, fortaleciendo el ecosistema de innovación tecnológica en torno al 5G.

Actualmente, el laboratorio cuenta con equipamiento avanzado, incluyendo:

- Cámaras 360° de alta resolución (hasta 4K)
- Lentes de realidad virtual (VR)
- Pantallas y televisores 8K
- Dispositivos móviles (celulares y notebooks)
- Equipos de infraestructura de red para conexión directa con 5G Stand Alone 5G Core

Este entorno permite realizar pruebas de velocidad, latencia, capacidad de transmisión en tiempo real, y simulaciones de experiencias inmersivas con contenido 360°. El laboratorio se encuentra en constante actualización, incorporando nuevos dispositivos para mantenerse a la vanguardia tecnológica.

2.3 Rack 5G UCSC

El núcleo del Laboratorio 5G es el Rack 5G UCSC, que actúa como el sistema central de conexión y procesamiento de la señal 5G. Este rack se encuentra directamente conectado por fibra óptica al centro de datos (CORE) de Movistar (Telefónica) ubicado en Santiago, lo que permite alcanzar velocidades de transmisión altamente superiores a las redes convencionales.

La banda de frecuencia empleada por la señal Movistar es de 3.5 GHz, dentro del rango asignado por SUBTEL para el servicio 5G, comprendido entre 3.2 y 3.6 GHz.

2.3.1. Componentes del Rack 5G

El rack 5G consta de 3 equipos principales para su funcionamiento:

- BBU (Baseband Unit): Se encarga de procesar las señales digitales que serán transmitidas a través de la unidad AAU MIMO, convirtiendo datos en señales de radio (ver Fig. 2.3.1).



Figura 2.3.1. BBU (Baseband unit). Fuente: Laboratorio 5G UCSC

- AAU MIMO (Active Antenna Unit con tecnología MIMO): Es un sistema de antenas integradas con múltiples entradas y salidas (Multiple Input, Multiple Output), que permite una transmisión más eficiente de datos al aprovechar la diversidad espacial (ver Fig. 2.3.2).

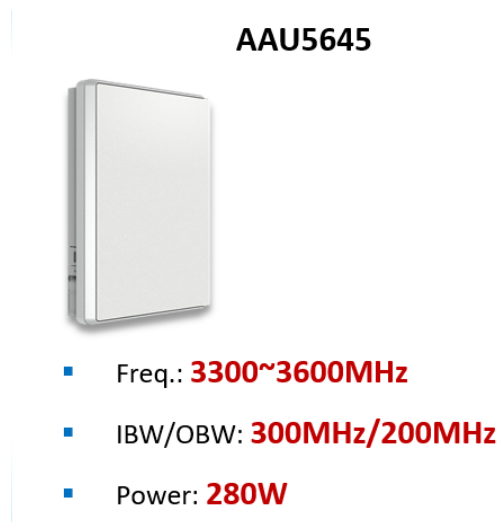


Figura 2.3.2. AAU MIMO (Active Antenna Unit con tecnología MIMO) Fuente: Laboratorio 5G UCSC

- RAN (Radio Access Network): Encargada de conectar las unidades anteriores con otras partes de la red, estableciendo el enlace entre el usuario final y la red troncal mediante comunicación por radiofrecuencia (ver Fig 2.3.3).



Figura 2.3.3. RAN (Radio Access Network). Fuente: Laboratorio 5G UCSC.

2.3.2 Transformación de señal (CPE)

Para permitir la conexión de dispositivos convencionales (como celulares o notebooks con capacidad 5G) a esta infraestructura, se requiere una CPE (Customer Premises Equipment). Este dispositivo transforma la señal 5G en redes Wi-Fi tradicionales, operando en bandas de 2.4 GHz o 5 GHz, según necesidad (ver Fig. 2.3.4).



Figura 2.3.4. CPE (Customer Premises Equipment). Fuente: Lab 5G UCSC

Hasta la fecha, las pruebas con el CPE no han sido concluyentes, dado que la activación definitiva de la señal 5G desde el CORE aún no se ha realizado.

2.3.3. Arquitectura de la red 5G

La arquitectura del sistema está diseñada para reducir la latencia y maximizar la velocidad de acceso a los datos. Esto se logra a través de la proximidad lógica al CORE o datacenter, optimizando el envío y recepción de datos entre dispositivos y servidores.

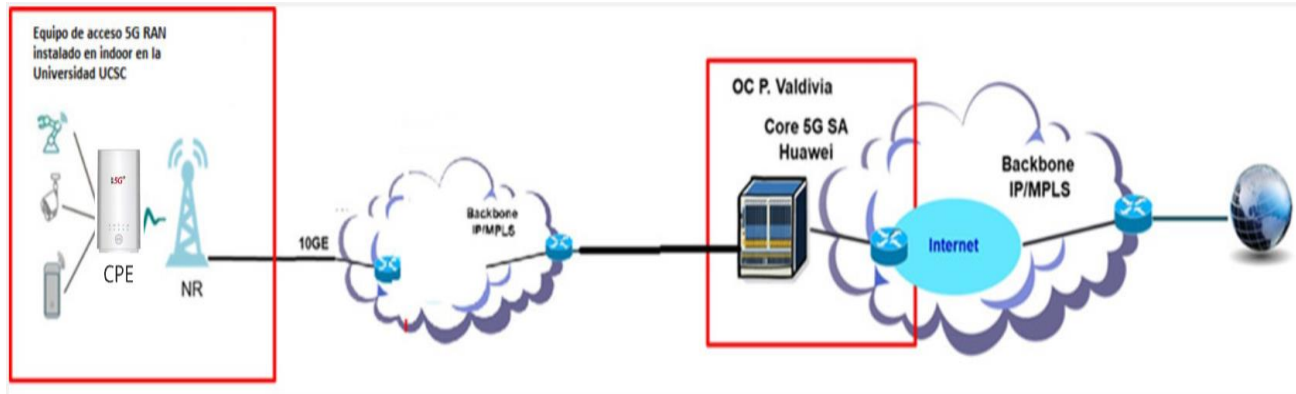


Figura 2.3.5. Arquitectura de red 5G. Fuente: UCSC.

Para la Figura 2.3.5 se aprecia la nube de almacenamiento cercana al CORE o datacenter, esto es así para minimizar la latencia al enviar información de un extremo a otro.

2.4. Conexión a Internet

El funcionamiento de Internet se basa en un conjunto de protocolos que permiten la comunicación entre dispositivos a través de redes distribuidas. El modelo más ampliamente utilizado es el TCP/IP, que organiza los procesos de transmisión de datos en cuatro capas funcionales, cada una con tareas específicas:

- **Capa de aplicación:** Encargada de gestionar los procesos requeridos por el usuario final. Incluye aplicaciones y protocolos como HTTP, FTP, DNS, entre otros, que permiten el intercambio de datos con la capa de transporte.
- **Capa de transporte:** Utiliza protocolos como TCP (Transmission Control Protocol) y UDP (User Datagram Protocol). TCP establece conexiones fiables, detecta y corrige errores de transmisión. En cambio, UDP es más rápido al eliminar la verificación de errores, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren rapidez, como el streaming de video en tiempo real.
- **Capa de internet:** Relacionada directamente con el protocolo IP (Internet Protocol). Su función es enrutar los paquetes de datos entre redes, permitiendo que los dispositivos se comuniquen sin necesidad de establecer una conexión previa.
- **Capa de acceso a la red:** Define como encapsular un datagrama IP en una trama que pueda ser transmitida a la red. Otra función que cumple es asociar las direcciones lógicas IP a direcciones físicas de dispositivos adaptadores de red.

Con la evolución de las tecnologías móviles, actualmente se utiliza la quinta generación (5G) de conectividad celular, que supera ampliamente en capacidad y eficiencia a sus predecesoras 2G, 3G y 4G. Aunque la tecnología 4G ha sido la más común en los últimos años, el despliegue de 5G está transformando las posibilidades de comunicación de alta velocidad y baja latencia, siendo especialmente relevante para aplicaciones como transmisiones inmersivas en tiempo real.

A continuación, se presentan las velocidades teóricas estimadas para cada generación móvil (ver Tabla 2.4.1):

Tabla 2.4.1. Velocidades teóricas de internet

Velocidad	Velocidad de carga	Velocidad de descarga	Frecuencia	Latencia (ms)
2G	108.8 Kbps	217.6 Kbps	900 – 1800 MHz	500 – 1000
3G	23 Mbps	168.4 Mbps	900 – 2100 MHz	100 – 300
4G	50 Mbps	150 Mbps	1.8 - 2.6 GHz	10 - 100
5G	10 Gbps	10 Gbps	3.2 - 3.6 GHz	1-2

Es importante destacar que estas velocidades corresponden a valores teóricos máximos, y que el rendimiento real puede variar según la infraestructura del operador, la saturación de la red, la ubicación geográfica, y la disponibilidad de antenas 5G. A pesar de estas variables, la adopción de 5G permite (teóricamente) una mejora sustancial en la calidad de transmisión de datos, siendo un factor clave en el desarrollo de transmisiones inmersivas, como las implementadas en este proyecto.

2.5. Mapas de cobertura digital y antenas según operador

El despliegue de servicios móviles en Chile depende del acceso al espectro radioeléctrico y la infraestructura instalada por los operadores. La cobertura de redes móviles 2G, 3G, 4G y, más recientemente, 5G, varía entre compañías y zonas geográficas, siendo un factor clave para el desarrollo de tecnologías como la transmisión inmersiva en tiempo real.

La Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL) entrega de manera pública los mapas de cobertura digital, que permiten visualizar el alcance de cada generación tecnológica por operador, así como el número y ubicación de antenas en distintas ciudades, incluida Concepción. A continuación, se presentan mapas comparativos de cobertura para los cuatro principales operadores móviles del país (ver Fig. 2.5.1, 2.5.2, 2.5.3 y 2.5.4).

2.5.1. Movistar

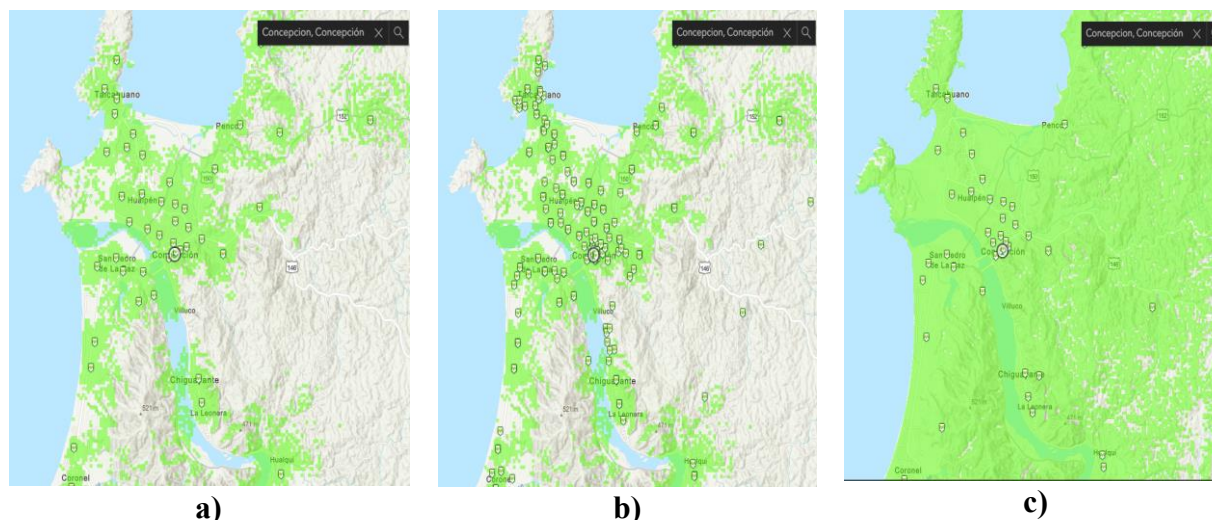


Figura 2.5.1. Coberturas y antenas 2G (a), 3G (b) y 4G (c) Movistar. Fuente: Mapas de cobertura digital [6].

2.5.2. Entel

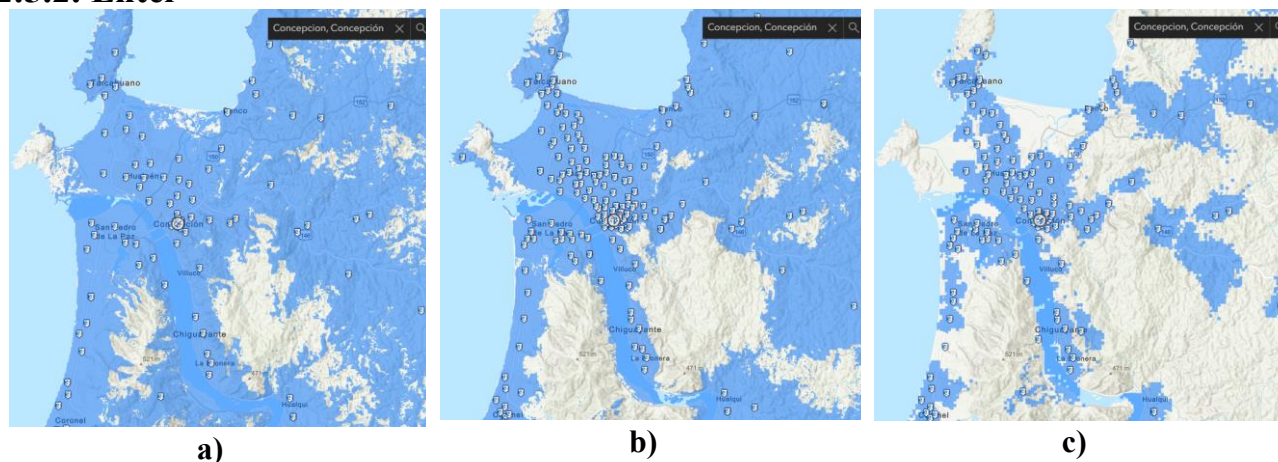


Figura 2.5.2. Coberturas y antenas 2G (a), 3G (b) y 4G (c) Entel. Fuente: Mapas de cobertura digital [6].

2.5.3. Claro

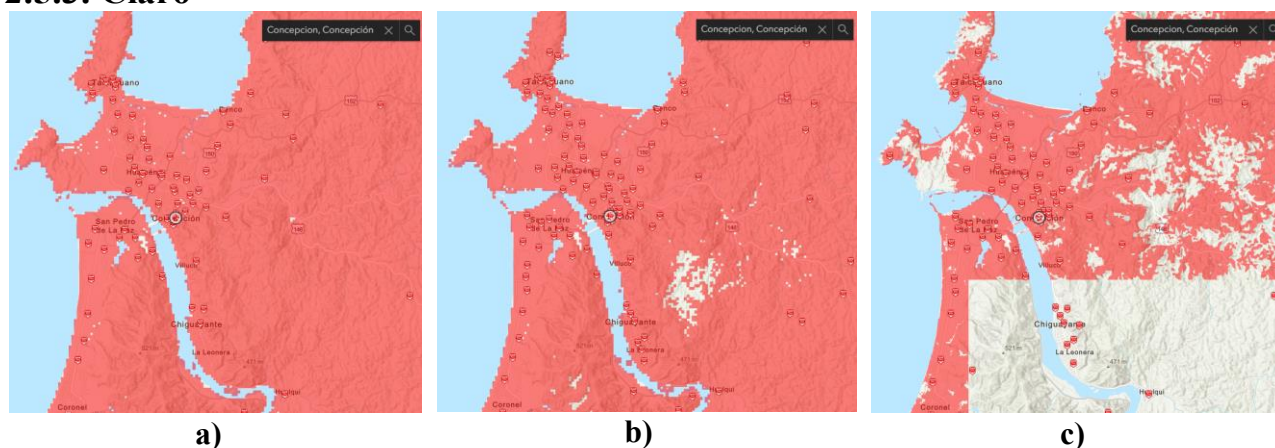


Figura 2.5.3. Coberturas y antenas 2G (a), 3G (b) y 4G (c) Claro. Fuente: Mapas de cobertura digital [6].

2.5.4. WOM



Figura 2.5.4. Mapa de antenas y cobertura de operador WOM. Fuente: Mapas de cobertura digital [6].

2.5.5 Regulación y bandas de frecuencia

Para operar legalmente servicios de telecomunicaciones en Chile, los proveedores deben obtener permisos otorgados por SUBTEL a través de resoluciones administrativas. Estos permisos tienen una duración de 10 años y son renovables. La Ley General de Telecomunicaciones (LGT) establece que la administración y asignación del espectro radioeléctrico es competencia exclusiva de SUBTEL (ver Fig. 2.5.5), buscando asegurar un uso equitativo, eficiente y no concentrado del recurso.

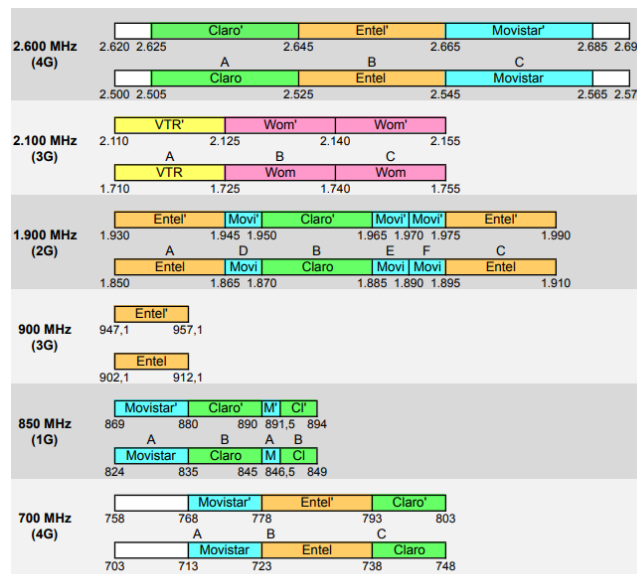


Figura 2.5.5 Frecuencias y anchos de banda en telefonía móvil (asignados en Chile según operador 1G a 4G). Fuente: Colegio de ingenieros de Chile.

2.5.6 Bandas de frecuencia utilizadas en redes móviles

Las bandas de frecuencia habilitadas para servicios móviles se definen según estándares internacionales establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). En Chile, SUBTEL adjudica estas bandas a través de licitaciones públicas. La siguiente tabla resume las bandas más utilizadas por tecnología (ver Tabla 2.5.1):

Tabla 2.5.1. Bandas de frecuencia según tecnología Fuente: Kimovil.

Tecnología	Banda de frecuencia (MHz)
5G	n7 (2600), n28a (700), n78 (3500)
4G	B2 (1900), B4 (1700/2100 AWS 1), B5 (850), B7 (2600), B28a (700)
3G	B5 (850)

Cada banda se identifica con un código (como B7 o n78), el cual representa su rango de frecuencia y generación. Estas bandas definen la capacidad de cobertura y velocidad del servicio, según se explica a continuación.

2.5.7 Relación entre frecuencia, cobertura y propagación

La relación física entre la frecuencia (f) de operación y la longitud de onda (λ) está dada por la siguiente ecuación:

Además, con esto pueden aumentar o disminuir su cobertura, lo cual se ve en la siguiente relación:

$$C = \lambda * f$$

Con C = velocidad de la luz

λ = Longitud de onda

f = frecuencia

Despejando longitud de onda se tiene:

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

En términos prácticos, a mayor frecuencia, menor será la longitud de onda, lo que implica una menor penetración en obstáculos y, por tanto, menor cobertura. Por el contrario, frecuencias más bajas permiten mayor alcance, aunque a menor velocidad de transmisión (ver Fig. 2.5.6). Este principio explica por qué los operadores deben utilizar bandas variadas para balancear cobertura y rendimiento.

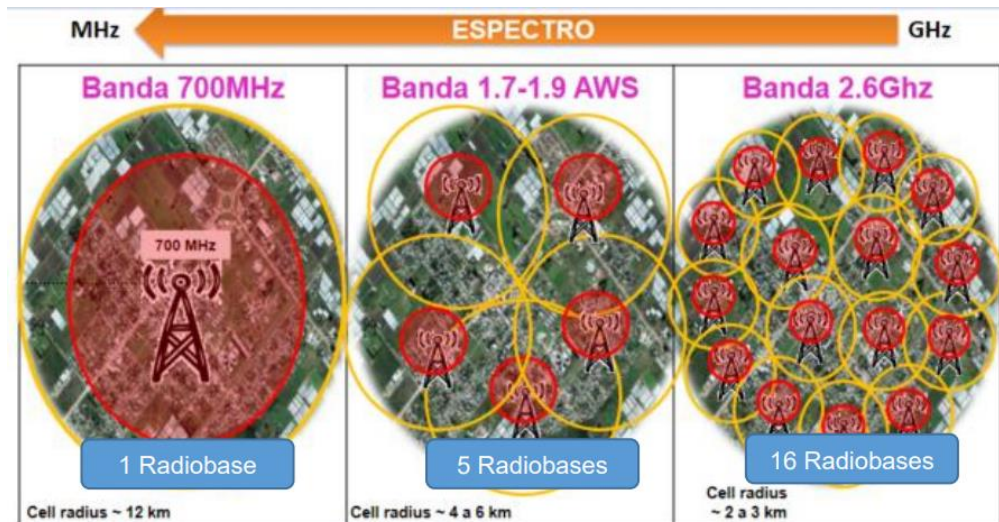


Figura 2.5.6. Longitud de onda. Fuente: Ovum tmt intelligence.

Factores adicionales que influyen en la propagación de la señal incluyen:

- El diseño y geometría de la antena,
- El material del entorno (paredes, estructuras metálicas),
- Y la permitividad del medio (aire libre vs. espacios cerrados).

2.6. Mapa de coberturas adjudicadas de licitaciones 5G

A partir de la implementación de la red 5G en Chile, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL) realizó procesos de licitación pública para la asignación de espectro a los principales operadores móviles. Este proceso permitió distribuir bandas de frecuencia específicas para la operación de servicios 5G, estableciendo metas de cobertura progresiva.

A continuación, se presentan los mapas de cobertura adjudicada a cada empresa, en su etapa preliminar, según datos oficiales de SUBTEL (ver Fig. 2.6.1):

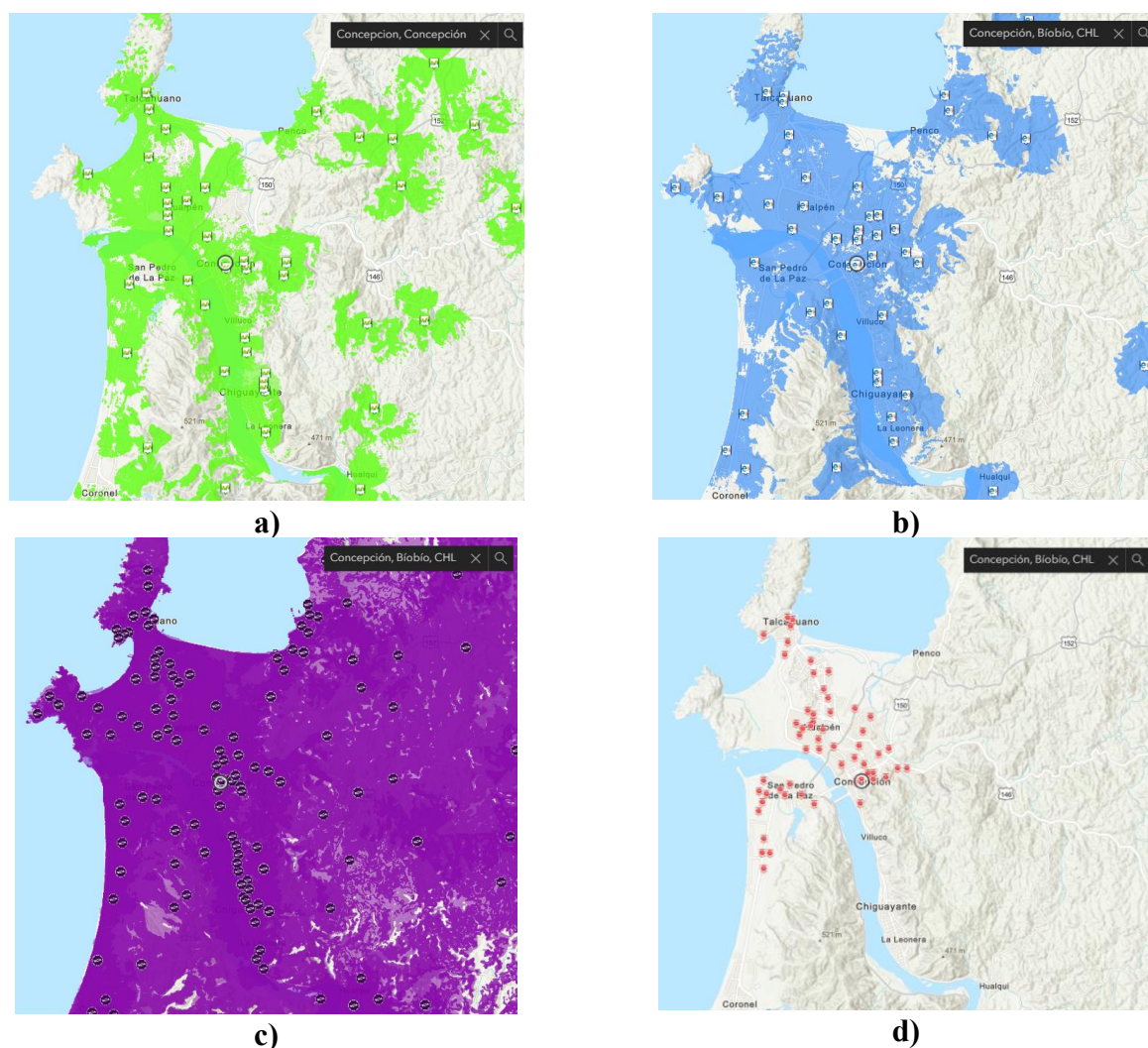


Figura 2.6.1. Coberturas 5G a) Movistar, b) Entel, c) WOM y d) Claro (en etapa preliminar). Fuente: Mapas de cobertura digital [6].

Estos mapas reflejan las zonas donde cada operador deberá garantizar conectividad 5G, de acuerdo con las condiciones técnicas establecidas en sus respectivas concesiones. Las diferencias en cobertura responden a diversos factores, como la cantidad de espectro asignado, la infraestructura instalada y el modelo de negocio de cada empresa.

2.7. Antenas autorizadas y normativa aplicable

La instalación de antenas de telecomunicaciones en Chile está regulada por la denominada "Ley de Torres" (Ley N.º 20.599), cuyo objetivo principal es armonizar el desarrollo tecnológico con la protección del entorno urbano y la salud de las personas. Esta normativa establece una serie de requisitos técnicos, administrativos y urbanísticos que deben cumplirse antes de implementar infraestructura asociada a redes móviles.

Los aspectos clave que regula esta ley son los siguientes:

1. Permisos y estudios previos: Es obligatorio contar con autorizaciones técnicas y ambientales antes de instalar antenas o torres, incluyendo estudios de impacto sobre la salud y el entorno urbano.
2. Uso de infraestructura existente: Se promueve la instalación de antenas en estructuras ya construidas, como edificios, luminarias o torres de energía, con el fin de reducir la proliferación de nuevas torres.
3. Mimetización de infraestructura: La normativa fomenta el diseño de antenas que se integren visualmente con el entorno, minimizando su impacto estético y paisajístico.

El cumplimiento de estas condiciones es fiscalizado por la Dirección de Obras Municipales (DOM) de cada comuna, la cual tiene la atribución de autorizar o rechazar proyectos de instalación según la normativa vigente.

Esta regulación resulta especialmente relevante para el despliegue de la red 5G, dada la necesidad de instalar antenas de menor alcance, pero en mayor cantidad, lo cual incrementa la sensibilidad urbana y social ante su implementación.

2.7.1. Antenas en servicio según Ley de Torres

La Ley N.º 20.599, conocida como "Ley de Torres", regula el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones en zonas urbanas y rurales, con el objetivo de proteger la salud de las personas, minimizar el impacto visual y garantizar el uso eficiente del espectro. En este contexto, se han definido distintas categorías para clasificar las condiciones de instalación y operación de antenas, las cuales son monitoreadas por la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL).

La Figura 2.7.1 muestra un mapa general con la distribución de antenas en servicio para distintas tecnologías (2G, 3G, 4G y 5G), obtenidas del sistema de Mapas de Cobertura Digital de SUBTEL.

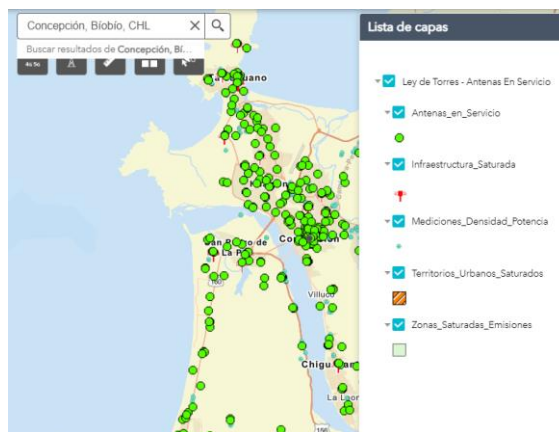


Figura 2.7.1. Mapa de antenas totales en servicio para distintas tecnologías. Fuente: Mapas de Cobertura Digital [7].

- Antenas de servicio: Antenas autorizadas y recepcionadas de obra, operando.
- Infraestructura saturada: Infraestructura y soporte de antenas que se encuentra ubicado dentro de un territorio urbano saturado
- Territorio urbano saturado: Según lo visto en Ley de torres, es el territorio en donde en un radio menor a 100 metros, existen 2 o más estructuras de soporte de antenas.
- Mediciones de densidad de potencia: Puntos de medición de potencia emitida por sistemas radiantes de las antenas.
- Zonas saturadas de emisiones: Zonas donde la potencia acumulada supera el límite máximo de densidad de potencia permitido.

En la Figura 2.7.2, se observa el mapa de antenas en servicio 5G y un detalle visual de antenas, infraestructura asociada y mediciones cercanas a la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC).

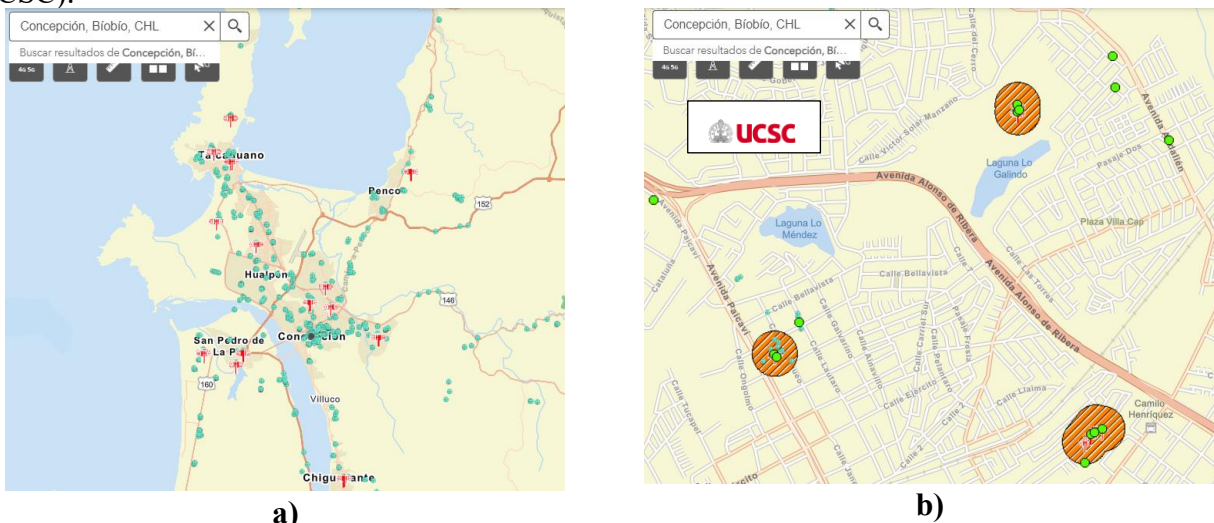


Figura 2.7.2. Antenas, infraestructura y territorios urbanos saturados (Antenas en servicio 5G (a) y territorios urbanos saturados y mediciones de densidad de potencia (b) cercanos a la UCSC). Fuente: Mapa de Cobertura Digital [7].

SUBTEL establece límites de emisiones radioeléctricas según el tipo de zona (residencial, industrial, educacional, entre otras) (ver Fig. 2.7.3). Estos límites se expresan en términos de densidad de potencia máxima permisible.

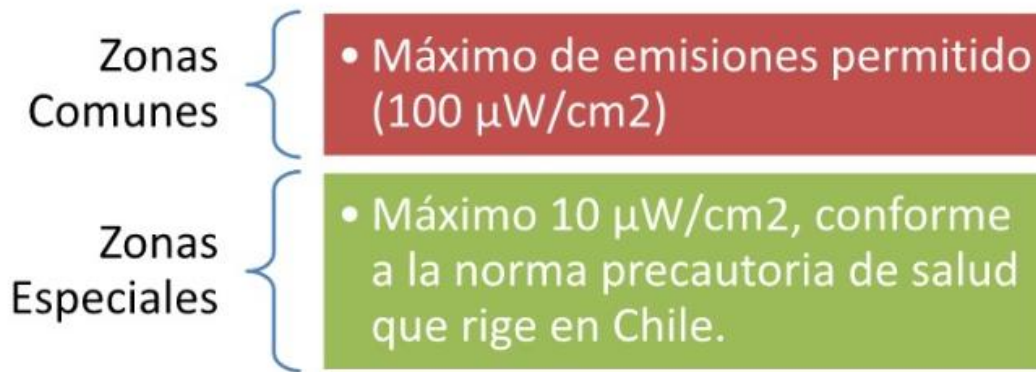


Figura 2.7.3. Emisiones permitidas según zona. Fuente: Subtel [7].

Cuando se identifican zonas saturadas, los operadores deben implementar planes de mitigación. Estos pueden incluir:

- Ajuste o reducción de potencia de transmisión,
- Rediseño de celdas de cobertura,
- Reubicación o redistribución de antenas.

Estas medidas buscan garantizar el cumplimiento de los límites normativos y minimizar los riesgos a la salud y el impacto ambiental.

El avance en las tecnologías de conectividad, particularmente con la implementación de redes 5G en sus modalidades Stand Alone (SA) y Non Stand Alone (NSA), posibilitó el desarrollo de aplicaciones de alta exigencia técnica, entre ellas las transmisiones inmersivas en tiempo real. Sin embargo, la materialización de dichas experiencias no se sustentó únicamente en la infraestructura de telecomunicaciones, sino también en la integración de equipos especializados capaces de garantizar un flujo adecuado en los procesos de captura, procesamiento y visualización del contenido.

En este contexto, resultó pertinente detallar los dispositivos empleados en el presente proyecto, dado que constituyeron la base tecnológica sobre la cual se implementaron las pruebas de transmisión. Dichos equipos incluyeron cámaras 360°, encargadas de registrar entornos completos mediante proyecciones esféricas; visores de realidad virtual, que permitieron la reproducción inmersiva del material capturado; y pantallas de ultra alta definición, utilizadas como soporte complementario para la evaluación de la calidad visual desde perspectivas convencionales.

2.8 Herramientas implementadas

2.8.1. Cámaras 360

Las cámaras 360° son dispositivos diseñados para capturar imágenes o video en todas las direcciones desde un único punto. Para lograrlo, incorporan dos lentes gran angulares ubicadas de forma opuesta, cada una con un campo de visión que excede los 180°. Esto permite cubrir todo el entorno incluyendo el suelo, techo y laterales.

La generación de una imagen unificada a partir de ambas capturas se realiza mediante un proceso llamado stitching o “cocido”, el cual combina digitalmente las imágenes en una sola proyección esférica. El resultado es una imagen envolvente que puede explorarse en múltiples ángulos, simulando la visión humana.

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de las cámaras utilizadas en este proyecto (ver Tabla 2.8.1):

Tabla 2.8.1. Características específicas de lentes. Fuente: Qoocam

Cámaras	Lente	Campo de visión (grados)	Apertura focal (mm)	Resolución (Megapíxeles)	Cuadros por segundo (fps)
Qoocam 360, 180VR	Gran angular ojo de pez	216° (por lente)	f/2.2	9.3	30
Insta360 X3	Gran angular ojo de pez	180° (por lente)	F1.9	72	60 (en 4K)

El valor f (apertura focal) es una relación adimensional entre la distancia focal del lente y el diámetro de su abertura efectiva, expresada como:

$$f = \frac{\text{Distancia focal}}{\text{Diámetro de abertura esférica}}$$

Si bien las especificaciones de la tabla denotan alta tecnología, debemos comparar de igual manera con el ojo humano (ver Tabla 2.8.2):

Tabla 2.8.2. Vista humana. Fuenrte:

Objeto	Lente	Campo de visión(grados)	Apertura focal (mm)	Resolución (Megapíxeles)	Cuadros por segundo (fps)
Ojo humano	Biconvexa, lenticular flexible	180° (variable)	22-24	576	30-60

Cabe destacar que estos valores son aproximados y pueden variar según la persona, el sexo, la edad y otras condiciones fisiológicas. Sin embargo, sirven como referencia para establecer el nivel de detalle y campo visual que una cámara debe alcanzar para simular la percepción humana.

2.8.2 Lentes de realidad virtual

Los visores de realidad virtual (VR) permiten la visualización inmersiva de contenido tridimensional. Su origen se remonta al año 1849, cuando el físico David Brewster creó el primer visor estereoscópico para estudiar el comportamiento de la retina. Este dispositivo consistía en una caja de madera con dos lentes separadas por una placa central que permitía observar dos imágenes similares desde ángulos distintos, generando así una percepción de profundidad (ver Fig. 2.8.1).



Figura 2.8.1. Visor estereoscópico. 1888. Fuente: Memoria Chilena. Biblioteca Nacional de Chile.

Dentro de este visor se introducía una imagen estereoscópica que consta de dos fotografías casi idénticas, que por sus diferencias permiten el efecto de profundidad y perspectiva (ver Fig 2.8.2), dándonos la sensación de una imagen en tres dimensiones.



Figura 2.8.2. Fotografía estereoscópica. Fuente: memoria chilena. Biblioteca nacional de Chile.

Las fotografías eran vistas una en cada lente, y se ajustaban según la separación entre ojos de la persona. Dándonos las primeras vistas del futuro cinematográfico.

Más de 150 años después, los avances tecnológicos han mantenido el mismo principio óptico pero con aplicaciones mucho más sofisticadas. Los visores actuales, como los Oculus Quest 2, utilizan dos lentes con pantallas integradas para proyectar contenido en 360° (video envolvente) o en 3D para visualizaciones tipo 180VR (ver Fig. 2.8.3), basándose en sistemas operativos como Android y siendo compatibles con dispositivos móviles y computadores.



Figura 2.8.3. Lentes Oculus Quest 2. Fuente: PcComponentes [2].

Estos visores permiten realizar múltiples actividades: visualización de entornos virtuales, participación en reuniones remotas, entrenamiento físico, recorridos turísticos virtuales, diseño 3D, entre otros (ver Fig. 2.8.4). Su principal ventaja radica en su autonomía: cuentan con batería y hardware integrado, incluyendo conectividad Wi-Fi, por lo que no requieren estar conectados a un computador externo para funcionar.



Figura 2.8.4. Imagen visualizada en lentes Oculus Quest 2.

2.8.3 Televisores

Los televisores actuales han evolucionado significativamente, tanto en resolución como en fidelidad cromática y compatibilidad tecnológica. La experiencia visual se ha visto potenciada gracias al desarrollo de pantallas Full HD, 4K y 8K, las cuales contienen un número elevado de píxeles que permiten una visualización de mayor calidad incluso en pantallas de gran tamaño (ver Fig. 2.9.1).

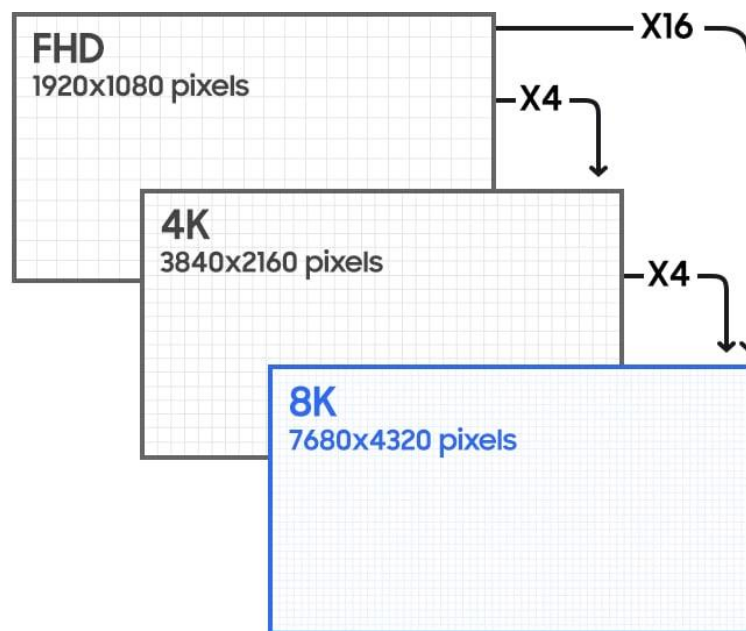


Figura 2.9.1. Resolución de pantallas (Full HD, 4K y 8K). Fuente: Samsung. Fuente: Samsung.

Estas pantallas se han convertido en aliados fundamentales en entornos de telecomunicación y contenido multimedia, ya que son capaces de reproducir material en alta definición desde una amplia gama de dispositivos, incluidos computadores, cámaras y sistemas de streaming. En el contexto de esta tesis, los televisores fueron utilizados para evaluar la calidad de las transmisiones inmersivas proyectadas fuera de visores VR, permitiendo validar la experiencia desde una perspectiva más convencional.

2.9. Software de Transmisiones

OBS Studio (Open Broadcaster Software) es una herramienta de código abierto utilizada para la captura y transmisión en vivo de video. Su principal función es actuar como puente entre los dispositivos de entrada (como cámaras, capturadoras y micrófonos) y las plataformas de streaming, mediante el uso de protocolos de transmisión estándar como RTMP (Real-Time Messaging Protocol), entre otros.

Este software ha sido elegido en el presente proyecto por su alto grado de personalización, compatibilidad con múltiples plataformas y accesibilidad técnica. Entre sus características más destacadas se encuentran:

- **Multi-streaming:** Permite transmitir de forma simultánea a más de una plataforma (por ejemplo, YouTube y Facebook Live) desde una única instancia.
- **Interfaz modular:** Facilita la creación de escenas, integración de fuentes de audio y video, superposiciones gráficas, transiciones, y elementos interactivos.
- **Compatibilidad con plugins:** Al ser de código abierto, OBS Studio permite la instalación de extensiones que amplían sus funcionalidades, como soporte para video 360°, estadísticas en tiempo real o transmisiones en 3D.

Además, su uso es completamente gratuito y multiplataforma, lo que lo convierte en una opción ideal para entornos universitarios donde se prioriza el uso de tecnologías abiertas y adaptables (ver Fig. 2.10.1).

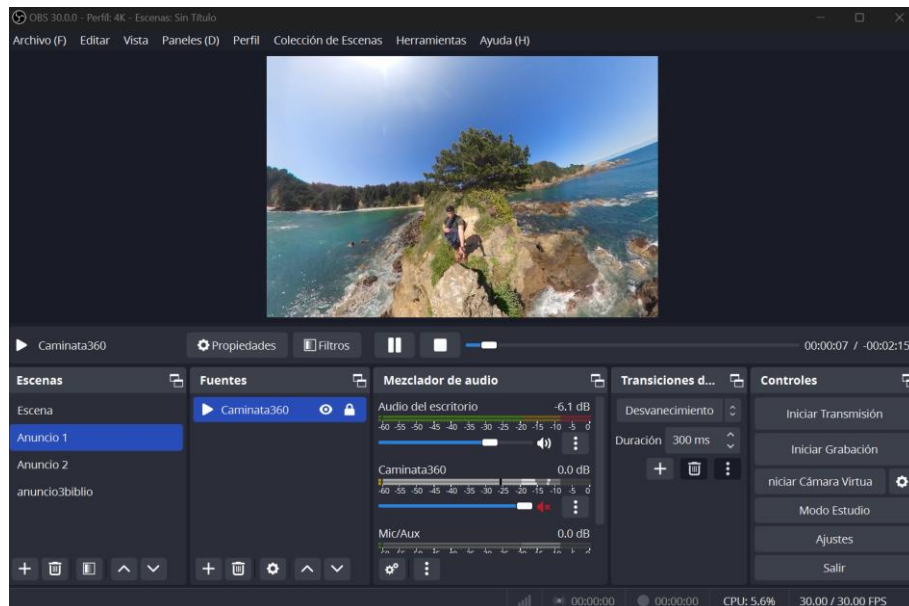


Figura 2.9.1. Vista previa OBS Studio. Fuente: OBS Studio.

OBS Studio es la herramienta base de este proyecto para realizar transmisiones inmersivas en vivo con contenido 360°, siendo compatible con las cámaras utilizadas y permitiendo pruebas experimentales bajo condiciones reales de red, tanto en 4G como en 5G.

Capítulo 3. Análisis y aplicación/ “Configuración experimental”

El presente capítulo aborda el análisis técnico y la aplicación práctica de la tecnología 5G para transmisiones inmersivas en tiempo real mediante cámaras 360°. Se consideran como ejes centrales la conectividad entre dispositivos emisores, la capacidad de transmisión en plataformas compatibles con contenido inmersivo, y la calidad visual alcanzada en función de variables como la resolución, los cuadros por segundo (fps), y la tasa de bits (bitrate).

El desarrollo experimental se orienta a evaluar la factibilidad de utilizar dispositivos disponibles en el Laboratorio 5G UCSC, incluyendo cámaras, capturadoras, teléfonos móviles y software de transmisión. Se analizarán además los requerimientos mínimos exigidos por plataformas como YouTube 360 y Facebook Live 360, para comprender los alcances y limitaciones técnicas al momento de realizar una transmisión en vivo.

3.1. Especificaciones mínimas según plataforma (solo plataformas 360)

Para realizar transmisiones inmersivas en formato 360°, es fundamental considerar las especificaciones mínimas exigidas por cada plataforma. Entre los parámetros más relevantes se encuentran la resolución máxima soportada, el protocolo de transmisión compatible, la cantidad de cuadros por segundo (fps) y la velocidad de bits recomendada según calidad de imagen (HD o UHD). (ver Tabla 3.1.).

Tabla 3.1. Especificaciones por plataforma Fuente: YouTube, Facebook.

Plataforma	Resolución (la más alta en streaming)	Protocolo de Streaming	Fotogramas	Velocidad de bits (recomendada)
Youtube (360)	• 2560x1440, 2k (HD) • 3840x2160, 4k (UHD)	• HTTP live streaming (HLS)	• 30 fps • 60fps (dependiendo de la configuración)	• HD, 5-25 Mbps • UHD, 8-35 Mbps
Facebooklive360	• 2880x1280, 2k (HD) • 3840x1920 4k, (UHD)	• RTMP • RTMPS	• 30 fps.	• HD, 8Mbps • UHD, 12-20 Mbps

3.2. Equipo utilizado: conectividad y especificaciones técnicas

En este proyecto se utilizaron dos modelos de cámaras 360° con conectividad alámbrica e inalámbrica, seleccionadas por sus prestaciones técnicas y compatibilidad con software y redes móviles de alta velocidad:

- Qoocam Kandao 360 180VR: Cámara doble función, para grabar videos en 360 grados a una calidad UHD 4K 60 fps y videos 180 grados 3D. Conectividad Wifi a 2.4G y 5G. No dispone de livestreaming. Cable USB A a micro-USB (ver Fig. 3.2.1).



Figura 3.2.1. Cámara Qoocam 360 180 VR [3].

- Insta 360 X3: Cámara doble función con grabación en formato 360 grados y panorámico (“single lense”) por lente gran angular, con calidad UHD 4K a 60-fps y 5.7K 30 fps a su máxima capacidad, cuenta con Wifi 2.4 GHz – 5GHz y 360 Live con reencuadre en vivo (entre otras funciones), sumergible hasta 10 metros, batería extraíble (5V/3A, capacidad de 1800mAh), cable USB a USB tipo-C. (ver Fig. 3.2.2)



Figura 3.2.2. Cámara insta 360 X3 [9].

También se utilizaron un dispositivo móvil y un computador portátil como herramientas de apoyo fundamentales en el proceso de captura, procesamiento y transmisión de contenido inmersivo. Ambos equipos fueron seleccionados en función de sus prestaciones técnicas, capacidad de procesamiento gráfico y compatibilidad con software especializado, así como por su conectividad con redes móviles de alta velocidad y con sistemas de transmisión en tiempo real.

El dispositivo móvil permitió realizar configuraciones directas en las cámaras 360°, controlar la grabación de forma remota y visualizar en tiempo real las pruebas de transmisión a través de aplicaciones dedicadas. Por su parte, el computador portátil fue empleado para el procesamiento de

video inmersivo, la gestión de software de edición y la conexión a plataformas de streaming, lo que aseguró un rendimiento estable durante la transmisión en alta resolución.

- Lenovo Legion Y520: Procesador i7-7700HQ, Tarjeta de video GTX1050, 16GB DDR4 de memoria RAM, 1TB HDD, 2 puertos USB 3.0, Pantalla FullHD 15,6, con Windows 10. (ver Figura 3.2.3.)



Figura 3.2.3. Computador portátil Lenovo para transmisiones.

- Apple Iphone 11: Procesador Apple A13 bionic, 4GB de memoria RAM, almacenamiento de 64GB. Puerto Lightning, (ver Figura 3.2.4.)



Figura 3.2.4. Smartphone Apple Iphone 11.

3.3. Configuración del sistema emisor 1

Desde el punto de vista comunicacional, la cámara y el sistema de transmisión funcionan como el emisor, mientras que las plataformas de streaming son los canales, y los usuarios visualizadores son el receptor. La estructura del sistema busca garantizar que el mensaje el contenido inmersivo en video 360° llegue al usuario final con mínima latencia y alta calidad.

3.3.1. Transmisión inalámbrica mediante software en dispositivos móviles (Qoocam 360 180VR).

Dado que la cámara Qoocam 360 180VR no posee capacidad nativa de livestreaming, se diseñó un sistema alternativo que permite conectarla de forma indirecta mediante dispositivos móviles con conectividad 5G (ver Fig. 3.3.1).

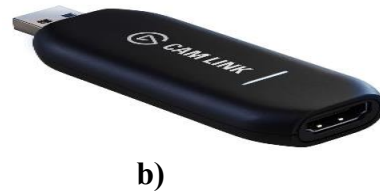
El esquema propuesto combina:

- Cámara Qoocam 360 180VR (a)
- Capturadora de video Cam Link 4K (b)
- Adaptadores y cables intermedios (c)
- Teléfonos móviles (Smartphones)(d)
- Computadores portátiles (d)

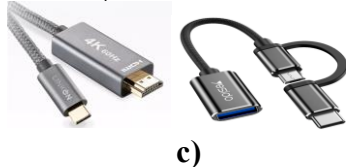
- Cámaras qoocam 360 180VR



- Cam link 4k legato (capturadoras de video)



Adaptadores y cables (USB-C hembra a HDMI a USB C)



Smartphone y computador portátil



Figura 3.3.1. Elementos necesarios para conexión de cámaras.

Para el enlace final se utilizó el software CameraFi Live, una aplicación móvil que permite transformar el celular en un switcher de video. Este software permite:

- Conectar cámaras externas a dispositivos móviles.
- Emitir señal en tiempo real utilizando protocolos como RTMP, RTSP o SRT.
- Redireccionar la señal desde el celular a un computador con OBS Studio.



Figura 3.3.2. CameraFi Live (software)

CameraFi Live es una aplicación móvil que nos permite utilizar un teléfono celular como un switcher de video (ver Fig. 3.3.2).

Con esta app se puede transmitir directamente, y realizar enlaces via wifi a programas de transmisión (OBS Studio, Vmix, Streamlabs etc.)

En este escenario, el celular funcionó como puente entre la cámara y el sistema de transmisión principal, siendo fundamental que tanto el computador como el móvil estén conectados a la red (4G, 5G) para mantener baja latencia y alta calidad de señal.

3.4. Configuración del sistema emisor 2

En esta sección se detallan cinco configuraciones experimentales de conexión para transmisión en vivo con cámaras 360°, tanto con la Qoocam 360/180VR como con la Insta360 X3, utilizando conexiones alámbricas e inalámbricas. Cada caso fue probado bajo condiciones reales en el entorno del Laboratorio 5G UCSC, evaluando su viabilidad técnica, facilidad de implementación y tasa de transferencia de datos promedio.

3.4.1. Caso 1: Inalámbrica indirecta (Qoocam 360 180VR)

En este escenario se conectó la cámara Qoocam a una capturadora de video (Cam Link 4K), la cual se enlaza a un dispositivo móvil 5G mediante cableado intermedio. El teléfono, con el software CameraFi Live, transmite directamente a plataformas de streaming como YouTube (ver Fig. 3.4.1).

- Tipo de conexión: Mixta (alámbrica cámara → celular; inalámbrico celular → red (4G-5G))
- Tasa de bits estimada: 20 Mbps
- Ventaja: movilidad de la cámara sin PC
- Desventaja: complejidad en el cableado y dependencia del software móvil



Figura 3.4.1. Conexión alámbrica con uso de software.

3.4.2. Caso 2: Conexión alámbrica directa al computador (Qoocam 360 180VR)

Este caso eliminó el uso del dispositivo móvil. La cámara se conecta a la capturadora de video, que se enlaza directamente a un computador con OBS Studio, permitiendo mayor control y personalización de la transmisión (ver Fig. 3.4.2).

- Tipo de conexión: 100% alámbrica
- Tasa de bits estimada: 20 Mbps
- Ventaja: personalización de escena con OBS
- Desventaja: requiere PC con rendimiento adecuado



Figura 3.4.2. Conexión alámbrica directa a computador.

3.4.3. Caso 3: Conexión inalámbrica por Wi-Fi y datos móviles (Insta360 X3)

En esta configuración, la cámara Insta360 X3 se conectó vía Wi-Fi al dispositivo móvil, que a su vez transmite usando su red móvil 5G. Es ideal para situaciones en movimiento, como caminatas o actividades al aire libre (ver Fig. 3.4.3).

- Tipo de conexión: completamente inalámbrica
- Tasa de bits estimada: 20 a 100 Mbps (dependiendo del operador)
- Ventaja: total portabilidad, sin necesidad de red Wi-Fi fija
- Desventaja: calidad depende de la cobertura móvil

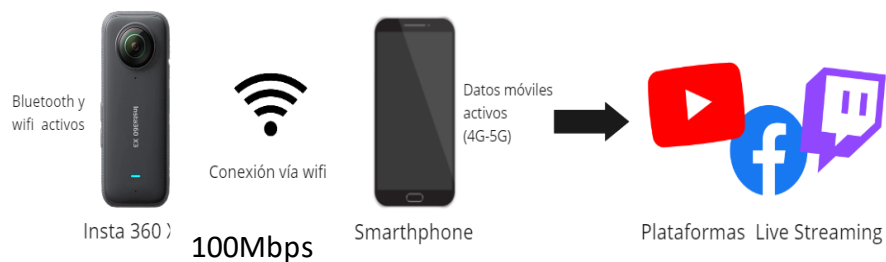


Figura 3.4.3. Conexión de cámara insta 360 X3 y dispositivo móvil.

La mayor ventaja de este tipo de conexión fue su versatilidad al poder estar en movimiento con la cámara 360 sin la necesidad de estar conectado a una red Wifi. Fue dependiente de la cobertura y anchos de banda del operador en uso, por lo que esta configuración fue ideal en escenarios al aire libre, alejados de la ciudad o lo que se conoce como recorridos “sport” como escaladas o trekking.

3.4.4. Caso 4: Conexión alámbrica cámara-celular (Insta360 X3)

Aquí, la cámara se conectó directamente al smartphone mediante cable, sin pasar por red Wi-Fi ni Bluetooth. El contenido se transmitió directamente desde la app oficial de Insta360 a plataformas como YouTube (ver Fig. 3.4.4).

- Tipo de conexión: alámbrica (cámara a celular), inalámbrica (celular a red)
- Tasa de bits estimada: hasta 100 Mbps
- Ventaja: simpleza en la conexión
- Desventaja: sin opción de personalización (no se usa OBS u otro software intermedio)



Figura 3.4.4. Conexión desde el móvil a cámara insta 360 y configuración de directo.

3.4.5. Caso 5: Conexión alámbrica directa al computador (Insta360 X3)

En esta última configuración, la Insta360 X3 se conectó por USB directamente al computador, donde es reconocida como un dispositivo de captura de video. La transmisión se gestiona desde OBS Studio, permitiendo máxima personalización (ver Fig. 3.4.5).

- Tipo de conexión: alámbrica
- Tasa de bits estimada: hasta 100 Mbps
- Ventaja: control total sobre la escena, ideal para eventos profesionales
- Desventaja: requiere computador de gama media/alta y entorno controlado



Figura 3.4.5. Conexión directa de cámara insta 360 X3 a computador.

3.5. Caso receptor/usuario

En una transmisión inmersiva, el receptor o usuario final constituye un componente esencial del sistema de comunicación. El nivel de inmersión y experiencia de visualización depende directamente del tipo de dispositivo utilizado para recibir el contenido, así como de la calidad de la señal de red disponible.

Para lograr una experiencia inmersiva óptima, se recomienda el uso de lentes de realidad virtual, como los Oculus Quest 2, que permiten al usuario explorar entornos virtuales en 360° de forma interactiva, con percepción de profundidad, orientación y libertad de movimiento.

También es posible acceder a las transmisiones a través de televisores de alta resolución, preferentemente con capacidad 4K u 8K (ver Fig. 3.5.1), los cuales ofrecen una representación visual de gran nitidez y rango dinámico, permitiendo al usuario observar los distintos ángulos del video mediante controles de navegación en pantalla.



a)



b)

Figura 3.5.1. Accesorios necesarios para mayor experiencia en realidad virtual.

El Laboratorio 5G UCSC cuenta con ambos tipos de dispositivos, lo que permite realizar pruebas de visualización tanto en entornos inmersivos como en pantallas tradicionales, comparando variables como:

- Calidad de imagen percibida
- Fluidez de reproducción (fps)
- Nivel de inmersión experimentado
- Tiempo de respuesta (latencia) en plataformas de streaming

Estos elementos son clave para validar la experiencia del usuario final, uno de los objetivos centrales de este proyecto, al explorar el uso educativo, profesional o experimental de tecnologías inmersivas sobre redes móviles de alta velocidad como 5G. Para ver material inmersivo visitar:

https://youtu.be/onv77oaDpSE?si=WDkVe_GoELmIgoVU

Capítulo 4. Resultados Experimentales

4.1. Características y pruebas en distintos servidores.

Con el objetivo de validar empíricamente los parámetros de conectividad descritos en la Tabla 2.4.1, se realizaron mediciones de velocidad y latencia mediante la aplicación Speedtest, desde dispositivos móviles con distintos operadores en distintos puntos geográficos de la Región del Biobío.

Las pruebas se centraron en tres variables clave:

- Velocidad de descarga (download)
- Velocidad de carga (upload)
- Latencia (ping)

Estas mediciones permiten evaluar en la práctica la viabilidad de realizar transmisiones en vivo en formato 360°, considerando que la estabilidad y calidad del enlace depende fuertemente del entorno, la infraestructura de red y la saturación de usuarios. En redes 4G ver Fig. 4.1.1 (a) y (b) en redes 5G NSA ver Fig. 4.1.1. (c), (d), (e) y (f).

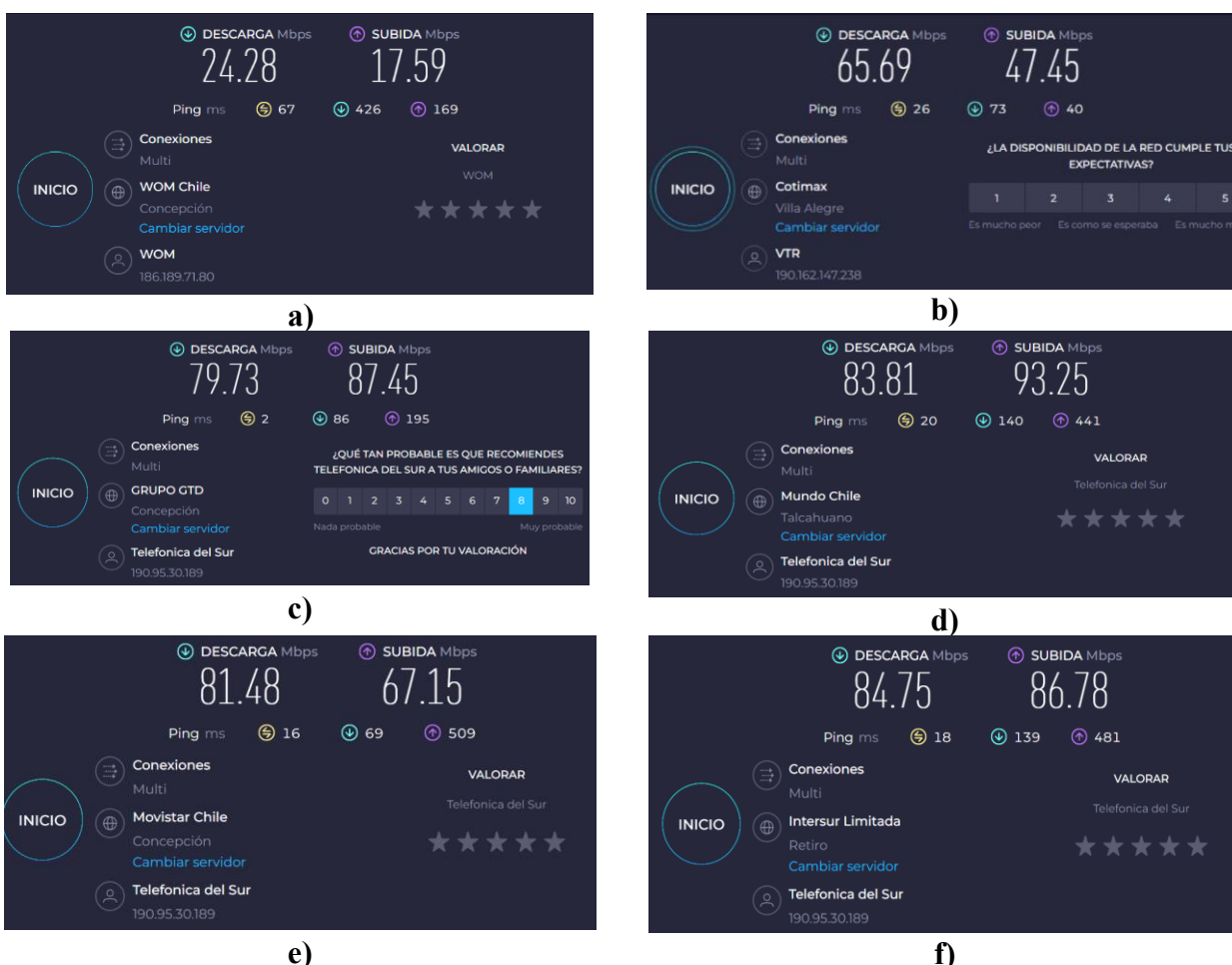


Figura 4.1.1. Velocidades de carga, descarga y latencia para distintos operadores (Movistar, WOM, Claro). Fuente: Speedtest.

Estas pruebas fueron realizadas desde y para configuraciones que incluyeran el uso de computador. Esto debido a la información proporcionada por el software de transmisión.

Para hacer funcionar las transmisiones en formato 360, se utilizaron distintas resoluciones con una tasa de bits de video de 6000 kbps (Sugerido por software). Valor para transmitir en una calidad de video óptima (1920x1080 o superior). La tasa de bits de video utilizada no fue mayor por limitaciones en hardware.

Tabla 4.1. Características de internet según operadores del gran Concepción.

Tipo de operador	Velocidad de Descarga (Mbps)	Velocidad de subida (Mbps)	Ping (ms)
Wom Chile (a)	17.59	25.28	67
VTR (b)	47.45	65.69	26
Telsur GTD (c)	87.45	79.73	2
Mundo Chile (d)	93.25	83.81	20
Movistar Chile (e)	67.15	81.84	16
Intersur (f)	86.78	84.75	18

Considerando la tasa mínima de bits utilizada, todos los operadores fueron suficientes para llevar a cabo este tipo de transmisiones. Al ser esta tasa limitada por hardware, influye en videos de mayor calidad y el tiempo en que estas se transmiten (ver Tabla 4.1).

Los resultados obtenidos confirman que existe una variabilidad significativa entre operadores y tipos de conexión (4G, 4G LTE o 5G NSA). Si bien los valores entregados en la Tabla 2.4.1 son teóricos, estas pruebas prácticas permiten observar que:

- Las velocidades reales de subida (upload) son suficientes para cumplir los requisitos de transmisión en vivo en plataformas como YouTube o Facebook Live 360, especialmente para configuraciones que requieren entre 20 y 100 Mbps, como las empleadas por la Qoocam 360 180VR y la Insta360 X3.
- La latencia observada en redes 5G NSA fue, en general, inferior a los 20 ms, lo cual reduce significativamente los retardos de transmisión y mejora la sincronización en contenido inmersivo.
- La calidad del servicio puede verse afectada por factores como la cantidad de usuarios conectados al mismo nodo, la distancia a la antena más cercana y el estado del servidor destino.

En conclusión, las condiciones reales de red permiten confirmar que el uso de cámaras 360° para transmisiones inmersivas es técnicamente viable bajo redes móviles modernas. Además, posiblemente en condiciones donde la red 5G SA está disponible tendrá probablemente mejores resultados. Esto validó que la infraestructura actual podrá permitir ejecutar experiencias inmersivas de calidad con equipos disponibles en el Laboratorio 5G UCSC.

4.2. Resultados de conexión con cámaras Qoocam 360/180VR

Esta sección presenta los resultados obtenidos en los Casos 1 y 2 descritos en el Capítulo 3, utilizando la cámara Qoocam 360 180VR en conexión con capturadoras de video y software de transmisión, en configuraciones tanto inalámbricas como alámbricas (ver Fig. 4.2.1).

4.2.1. Conexión inalámbrica



Figura 4.2.1. Resultados de conexión con cámaras Qoocam 360 180VR.

Al ingresar a CameraFi Live, el sistema reconoce correctamente el dispositivo USB conectado (Cam Link 4K), como se observa en la siguiente imagen (ver Fig. 4.2.2):

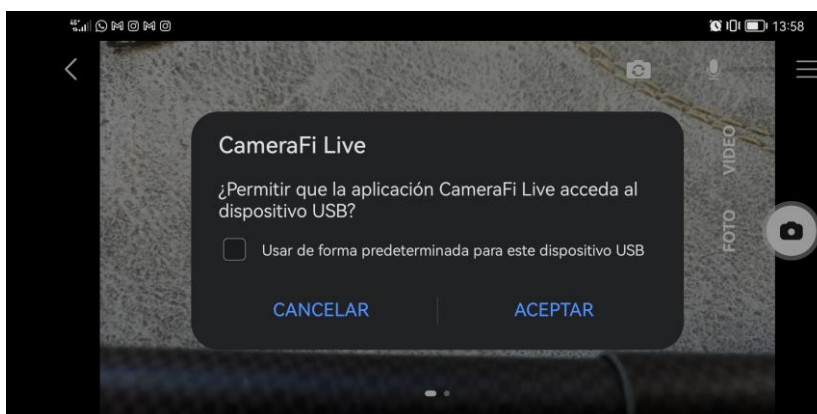


Figura 4.2.2. Lectura de dispositivo externo conectado. Fuente: CameraFi Live.

Sin embargo, aunque el software detecta la capturadora, no se logra visualizar el video proveniente de la cámara Qoocam. En su lugar, el sistema reconoce la cámara interna del dispositivo móvil, lo cual permite transmitir su señal a OBS Studio (ver Fig. 4.2.3). Esta limitación podría estar relacionada con restricciones de codificación, protección del firmware o falta de compatibilidad directa de la Qoocam con CameraFi Live.

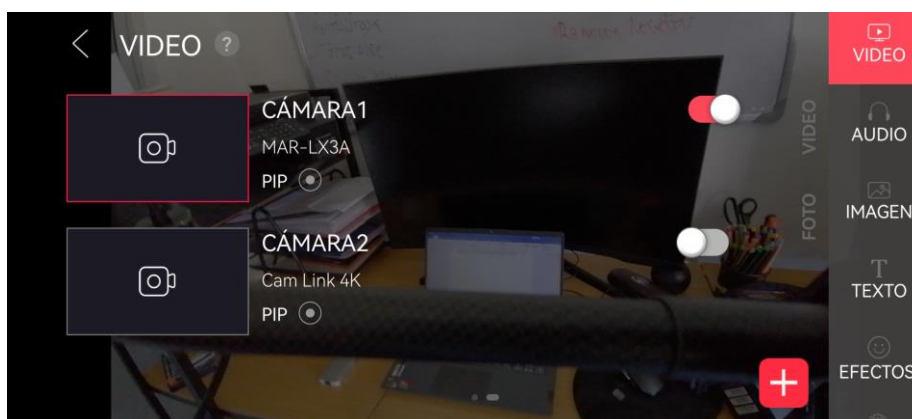


Figura 4.2.3. Visualización de cámaras. Fuente: CameraFi Live.

Finalmente, los resultados no fueron concluyentes, descartando estos casos de las opciones para realizar transmisiones en vivo. Pero a su vez siendo ideales para grabar contenido en formato 360, debido a su amplia resolución y versatilidad que ofrece la cámara Qoocam 360 180VR. Ya que cuenta con una batería de larga duración y más formatos de captura de video como el 180VR y 3D. Es ideal para transmitir videos pregrabados a las distintas plataformas con capturas más llamativas.

4.2.2 Conexión Alámbrica

En este caso, se conectó la cámara Qoocam 360 180VR directamente a una capturadora Cam Link 4K, la cual fue reconocida por OBS Studio como fuente de captura de video (ver Fig. 4.2.4):

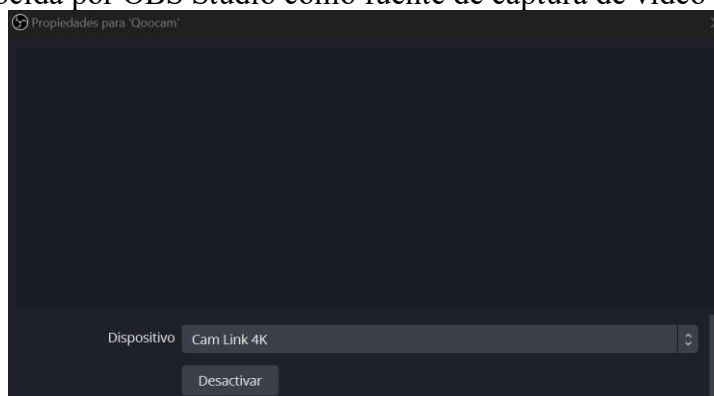


Figura 4.2.4. Adición de fuentes de capturadora de video. Fuente: OBS Studio.

Sin embargo, al igual que en el caso anterior, OBS Studio no logró visualizar el contenido generado por la cámara, a pesar de reconocer el dispositivo. Esta limitación sugiere que la cámara no transmite señal de video en tiempo real compatible con la capturadora, o que requiere un software específico propietario para este tipo de salida.

Como alternativa se optó por transmitir videos previamente grabados en el formato adecuado para poder ser transmitidos en 360. A pesar de no tener contempladas las pruebas experimentales en vivo, se llegó a los siguientes resultados en la plataforma de streaming Youtube (ver Fig. 4.2.5):

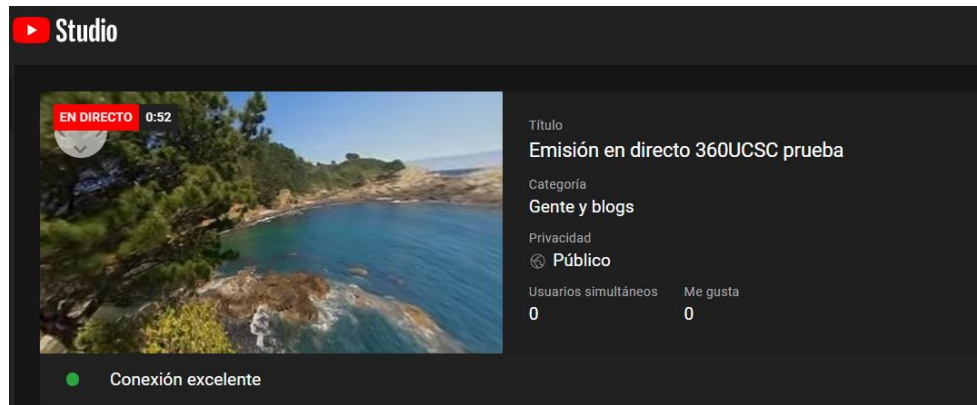


Figura 4.2.5. Emisión de video 360 en vivo. Fuente: YouTube Studio.

- Resolución de emisión: 1920×1080 (2K)
- Formato: 360°
- Plataforma: YouTube Live
- Bitrate adaptativo, con buena estabilidad de conexión

Aunque no se alcanzó una resolución superior (por ejemplo, 4K u 8K), la transmisión fue fluida y sin interrupciones. La calidad visual fue aceptable en monitores estándar, aunque en pantallas de mayor resolución se evidenció una pérdida perceptible de detalle.

En conclusión, las pruebas con la cámara Qoocam 360 180VR indican que, aunque no es viable para transmisiones en vivo en tiempo real, es altamente funcional para capturar material inmersivo pregrabado que puede ser editado y emitido posteriormente en plataformas como YouTube 360°. Esto posiciona a la Qoocam como un equipo útil para contenidos asincrónicos de alta calidad, pero limitado para flujos de trabajo en tiempo real con hardware estándar.

Ver contenido en <https://www.youtube.com/watch?v=HoxI4ddCuWs>

4.3. Resultados de conexión con Insta360 X3.

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas experimentales realizadas con la cámara Insta360 X3, utilizada tanto en conexión inalámbrica como alámbrica, sin necesidad de capturadoras externas. La cámara fue montada sobre un selfie stick multipropósito (extensor con función de trípode) para facilitar su manipulación y movilidad durante las transmisiones. (ver Fig.4.3.1).

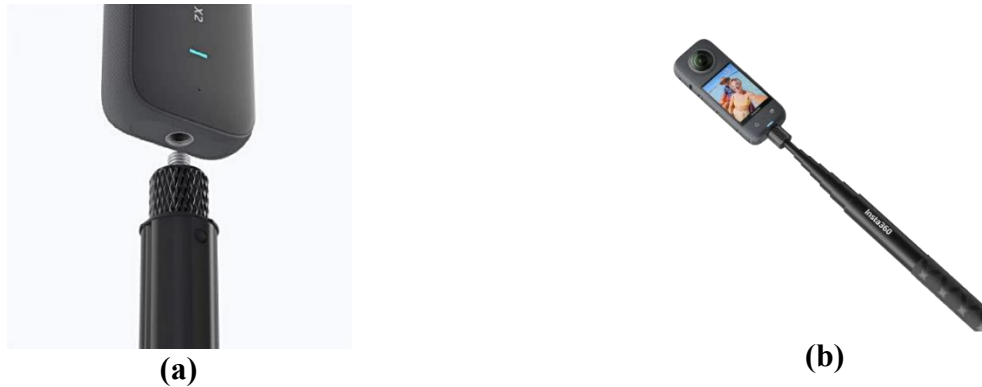


Figura 4.3.1 Selfie Stick usado ensamblado a cámara Insta 360 X3.

4.3.1 Inalámbrica 1- Transmisión en exteriores

Mediante la interfaz nativa de la aplicación Insta360, se configuró una transmisión en tiempo real directamente desde la cámara, utilizando datos móviles 5G y sin pasar por aplicaciones intermedias. (ver Fig. 4.3.2)

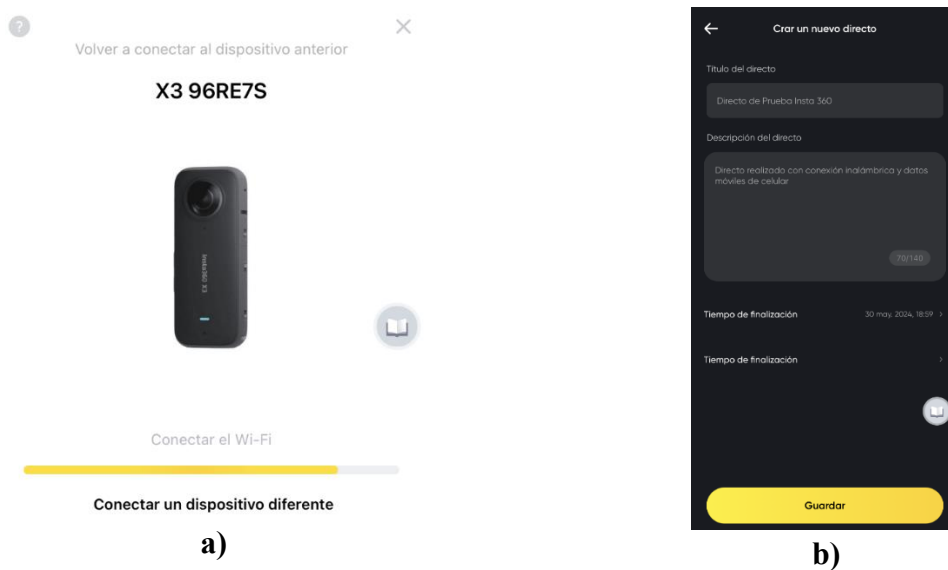


Figura 4.3.2. Interfaz Insta 360 X3. Conexión de cámara insta 360 (a) y Configuración de directo (b).

Esta configuración demostró ser altamente versátil en ambientes al aire libre, permitiendo libertad total de movimiento. Sin embargo, se identificaron algunas dificultades operativas:

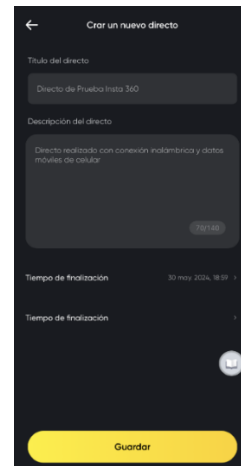
- La interfaz de programación de transmisiones puede presentar errores menores.
- El tiempo de transmisión depende directamente de la batería de la cámara y del smartphone, que no puede ser bloqueado durante la emisión.

4.3.2. Inalámbrica 2- Transmisión en red Wi-Fi

Se repitió el procedimiento anterior en un entorno controlado (Laboratorio 5G UCSC) utilizando conexión Wi-Fi local. Esta configuración aumentó la estabilidad de la transmisión, permitiendo extender su duración y mejorar la calidad de imagen (ver Fig. 4.3.3).



a)



b)

Figura 4.3.3. Interfaz Insta 360 X3. Vinculación de cámara Insta 360 X3 con datos móviles (a) y Configuración de directo (b).

Un punto a considerar es la interferencia del cable en la visualización de la imagen si no se asegura adecuadamente durante la grabación (ver Fig. 4.3.4).

Este problema fue mitigado al sujetar el cable al bastón extensible con amarres o cintas.



Figura 4.3.4. Vista de errores ocasionados en conexión alámbrica.

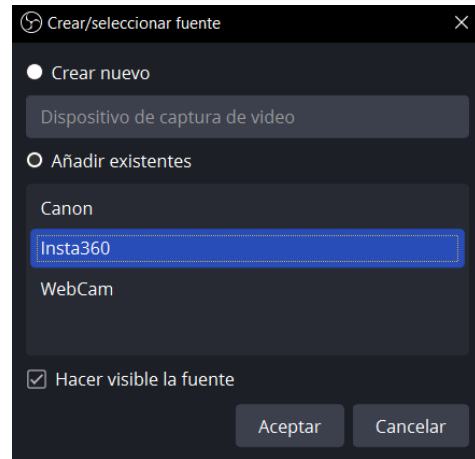
Ver contenido en <https://www.youtube.com/watch?v=zRiOZR34QGw&t=134s>

4.3.3. Alámbrica – Transmisión directa a computador

Se realizó la conexión de la cámara Insta360 X3 al computador vía cable USB tipo C, con el objetivo de operar la cámara como fuente de video en OBS Studio bajo la modalidad “webcam”. (ver Fig. 4.3.5).



(a)



(b)

Figura 4.3.5. Conexión a computador directa (alámbrica). Fuente: elaboración propia

Inicialmente, OBS Studio reconoce la cámara. No obstante, al cerrar y volver a iniciar el software de transmisión, se detectaron los siguientes errores:

- La fuente de video debe agregarse manualmente nuevamente, obligando a reconectar el cable repetidamente hasta que el software detecte el dispositivo.
- Al usar el modo 360° con doble lente (“dual lens”), se observaron defectos visuales como:
 - Puntos ciegos en el borde de la imagen
 - Distorsión en forma de espiral o embudo en el centro

Ver Fig. 4.3.6.



Figura 4.3.6. Vista de errores ocasionados en conexión alámbrica.

Para mejor visualización de errores visitar <https://www.youtube.com/watch?v=BzHWqslh7sk>.

4.4. Estadísticas en transmisiones

Para realizar transmisiones en tiempo real con contenido inmersivo en alta calidad, se requiere de hardware de alto rendimiento, especialmente en el caso de transmisiones realizadas a través de OBS Studio, donde el procesamiento en tiempo real de video 360° genera una elevada demanda sobre CPU, memoria y sistema de codificación.

En esta sección se analizan las estadísticas de rendimiento obtenidas durante transmisiones experimentales realizadas con videos pregrabados (Qoocam 360 180VR) y con la cámara Insta360 X3 en distintos niveles de resolución: Full HD (1920×1080), 2K (2160×1440) y 4K (3840×2160). (ver Figuras 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3)

4.4.1. Transmisión en Full HD (1920x1080 a 30fps)

Estadísticas				
Uso de CPU	68%	FPS	30.00	
Espacio en disco disponible	83.5 GB	Tiempo de media para procesar un fotograma	4.5 ms	
Disco lleno en (aprox.)		Fotogramas perdidos por retraso de procesamiento	52 / 15962 (0.3%)	
Uso de memoria	1229.2 MB	Fotogramas omitidos por retraso en la codificación	26 / 4467 (0.6%)	
Salida	Estado	Fotogramas perdidos (Red)	Salida de datos total	Bitrate
Transmisión	EN VIVO	0 / 4453 (0.0%)	118.0 MiB	6889 kb/s
Grabación	Inactivo		0.0 MiB	0 kb/s

Figura 4.4.1. Estadísticas de transmisión (Facebook y youtube) para video en resolución FHD (1920x1080) y 30fps.Fuente: OBS Studio.

- Tiempo promedio de procesamiento por fotograma: 4.5 ms
- Fotogramas omitidos por retraso: 0.3%
- Uso de CPU: 68%

Estos resultados son aceptables para transmisiones estándar en plataformas como Facebook o YouTube, pero insuficientes para lograr una experiencia inmersiva óptima con lentes de realidad virtual, donde se requiere mayor resolución para evitar ruido visual y pérdida de detalle.

4.4.2. Transmisión en 2K (2560x1440 a 60 fps)

Estadísticas				
Uso de CPU	59%	FPS	55.94	
Espacio en disco disponible	71.5 GB	Tiempo de media para procesar un fotograma	5.7 ms	
Disco lleno en (aprox.)		Fotogramas perdidos por retraso de procesamiento	213 / 12140 (1.8%)	
Uso de memoria	1029.2 MB	Fotogramas omitidos por retraso en la codificación	197 / 11816 (1.7%)	
Salida	Estado	Fotogramas perdidos (Red)	Salida de datos total	Bitrate
Transmisión	EN VIVO	0 / 11768 (0.0%)	156.0 MiB	6548 kb/s
Grabación	Inactivo		0.0 MiB	0 kb/s
				Reiniciar

Figura 4.4.2. Estadísticas de transmisión (Facebook y youtube) para video en resolución 2K (2560x1440) y 60fps.Fuente: OBS Studio.

- CPU: 59% (con picos superiores)
- FPS promedio: 55.94
- Pérdida de fotogramas: 1.8%
- Bitrate: 6548 kbps
- Memoria usada: 1029.2 MB

Aunque no se evidenció pérdida por red, la limitación en capacidad de procesamiento generó caídas en cuadros por segundo y aumentos en la latencia de codificación, afectando la fluidez del contenido transmitido.

4.4.3. Transmisión en 4K (3840x2160 a 60fps)

Estadísticas				
Uso de CPU	77%	FPS	59.94	
Espacio en disco disponible	71.2 GB	Tiempo de media para procesar un fotograma	3.2 ms	
Disco lleno en (aprox.)		Fotogramas perdidos por retraso de procesamiento	139 / 6263 (2.2%)	
Uso de memoria	1867.0 MB	Fotogramas omitidos por retraso en la codificación	3797 / 3975 (95.5%)	
Salida	Estado	Fotogramas perdidos (Red)	Salida de datos total	Bitrate
Transmisión	EN VIVO	0 / 3965 (0.0%)	52.6 MiB	4446 kb/s
Grabación	Inactivo		0.0 MiB	0 kb/s
				Reiniciar

Figura 4.4.3. Estadísticas de CPU Estadísticas de transmisión (Facebook y youtube) para video en resolución 4K (3840x2160) y 60fps.Fuente: OBS Studio.

- Uso de CPU: 77–80%
- Pérdida de fotogramas por retraso: 2.2%
- Pérdida por codificación: 95.5% (3975 fotogramas omitidos)
- Bitrate: 4446 kbps
- Memoria usada: 1867 MB

El aumento de resolución exige recursos extremos, provocando caídas masivas de fotogramas por codificación. Esto indica que el sistema de hardware utilizado no es apto para transmisiones 4K estables, y que se requieren equipos de mayor eficiencia, como procesadores de gama alta (ver Tabla 4.1 y tabla 4.2).

Tabla 4.1. Estadísticas de transmisión según la resolución (1). Fuente: OBS Studio.

Resolución de imagen	Uso de CPU	FPS	Tiempo de media de procesamiento de fotogramas	Fotogramas omitidos por retraso
Full HD (1920x1080)	68%	30	4.5ms	52/15962 (0.3%)
2k (2160x1440)	59%	55.94	5.7ms	213/12140(1.8%)
4K(3840x2160)	77%	59.94	3.2ms	139/6263 (2.2%)

Tabla 4.2. Estadísticas de transmisión según la resolución (2). Fuente OBS Studio

Resolución de imagen	Uso de memoria	Fotogramas omitidos por retraso en codificación	Salida de datos total	Bitrate
Full HD (1920x1080)	1229.2 MB	26/4467 (0.6%)	118.0 MiB	6889 kbps
2k (2160x1440)	1029.2 MB	197/1816(1.7%)	156.0 MiB	6548 kbps
4K(3840x2160)	1867.0 MB	3797/3975(95%)	52.6 MiB	4446 kbps

4.4.4 Consideraciones adicionales

- Estas estadísticas corresponden exclusivamente a transmisiones realizadas mediante OBS Studio en modo alámbrico.
- Las transmisiones realizadas directamente desde la app de la cámara Insta360 X3 no entregan métricas detalladas, únicamente informan si la conexión es estable o inestable.
- Algunas plataformas, como Facebook Live 360, restringen la resolución máxima de transmisión, lo cual debe ser considerado al configurar los parámetros de salida.
- Se restringen valores de resolución por conveniencia debido al hardware.

Para acceder a las transmisiones experimentales realizadas en este proyecto, se puede ingresar al canal oficial del laboratorio:



YouTube

—

Laboratorio

5G

UCSC:

<https://www.youtube.com/@Laboratorio5GUCSC>.

Tabla 4.3. Comparativa de escenarios de transmisión 360°.

Escenario	Tipo de Conexión	Cámara	Software	Calidad máxima	Estabilidad	Latencia	Observaciones clave
Caso 1: Inalámbrica indirecta	WiFi + Capturadora	Qoocam	CameraFi Live	1080p	Media	Alta	Buen desempeño móvil, calidad limitada por capturadora.
Caso 2: Alámbrica directa a PC	USB (Cam Link 4K)	Qoocam	OBS Studio	2K	Alta	Baja	Mejor calidad, requiere PC de buen rendimiento.
Caso 3: Inalámbrica a smartphone	WiFi / datos móviles	Insta360 X3	App oficial	4K	Variable	Alta	Fácil de usar, dependiente de red externa.
Caso 4: Alámbrica a smartphone	USB-C directo	Insta360 X3	App oficial	4K	Alta	Media	Buena opción intermedia, requiere buen smartphone.
Caso 5: Alámbrica directa a PC	USB directa	Insta360 X3	OBS Studio	4K	Alta	Baja	Máxima calidad, ideal para puntos fijos.
Transmisión pregrabada	Sin conexión activa	Ambas	OBS Studio	4K (editado)	Muy alta	Nula	Permite control total, no es en tiempo real.

Síntesis del análisis comparativo

- Estabilidad y calidad son mejores en los casos con conexión alámbrica directa, especialmente con OBS Studio.
- Movilidad y facilidad de uso son mayores con la aplicación oficial y smartphones, aunque con más latencia.
- Las transmisiones pregrabadas ofrecen la mejor calidad visual, pero no son interactivas en vivo.
- El uso de red 5G comercial vs. las tarjetas Sim (5G) influye notablemente en la latencia y bitrate, según se comprobó en pruebas mixtas.

Capítulo 5. Creación de imágenes 360° (Street view)

El uso de cámaras 360° no debe limitarse exclusivamente a transmisiones en vivo. Su potencial permitió la creación de entornos digitales inmersivos, útiles para múltiples áreas como la educación, la arquitectura, la ingeniería, el diseño y la virtualización de espacios. Este capítulo explora cómo generar recorridos virtuales asíncronos a partir de imágenes 360°, mediante dos enfoques principales: escaneado mediante Matterport y fotogrametría con Reality Capture.

5.1. Inmersión vía imágenes 360°

La generación de imágenes estilo *Street View* depende significativamente del entorno a capturar:

- En exteriores, se debe considerar la iluminación, el clima y el movimiento de objetos y personas.
- En interiores, se tiene mayor control de variables como luz artificial, disposición espacial y flujo de personas, lo que permite resultados más precisos.

Se aplican algoritmos de procesamiento de imagen y técnicas de stitching (cocido) para generar vistas unificadas, sin puntos de corte ni distorsiones.

5.1.1. Imágenes con software Matterport

Matterport es una plataforma que permite crear modelos 3D de espacios reales o “gemelos digitales” (ver Fig. 5.1.1).

Con este software es posible crear recorridos virtuales interactivos, para guiar a personas a través de espacios.

Ideal para diseñar, construir y mejorar la interacción con los espectadores.



Figura. 5.1.1. Software Matterport.

Por conveniencia se decide realizar un recorrido virtual en un espacio cerrado, en este caso la sala de teatro de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, donde se tiene control de todas las variables que puedan afectar en el diseño de este espacio 3D.

Para esto se requiere de una cámara compatible con el software matterport (Insta 360 X3) y un dispositivo móvil. Se realizará un escaneado a través de la cámara (con amplio rango dinámico) en distintos puntos los cuales servirán de pivote para el movimiento en tres ejes. Entre más puntos se tengan mayor será el recorrido dentro del espacio 3D y por ende mucho mejor lograda la inmersión.

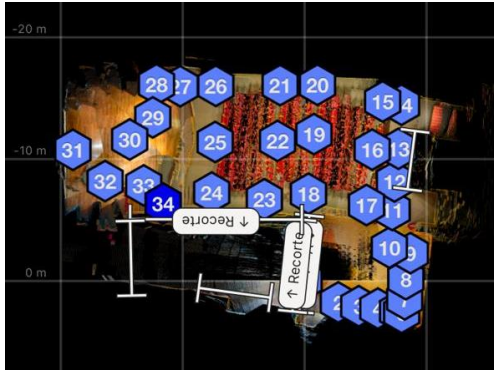


Figura. 5.1.2. Puntos de pivote 3D.

- Se escanearon 34 puntos con movimiento en tres ejes y amplio rango dinámico. (ver Fig. 5.1.2).
- Un espacio total de 346.8m²
- Con acceso y vistas de puntos principales dentro del teatro como pueden ser las butacas o el mismo escenario. (ver Fig. 5.1.3).

Con este tipo de escaneado se obtienen grandes resultados los que facilitan el recorrido de distintos espacios dejando de lado la presencialidad y así evitando la congestión y aglomeración como puede ser en un reconocimiento de salas, laboratorios o espacios a los que se requiera acceder para alguna pasantía o capacitación. (ver Tabla 5.1.1).



Figura 5.1.3. Plano 3D de recorrido virtual Teatro UCSC. Fuente: Matterport.

Tabla 5.1.1. Ventajas y desventajas de software Matterport.

Ventajas	Desventajas
- Vistas 3D sin mayor conocimiento de programación. - Eliminación de puntos de trípode de manera automática. - Uso de notas o enlaces para distintos elementos. - Compatibilidad con distintas cámaras o dispositivos móviles. - Dimensionamiento de espacios en tiempo real. - No requiere de softwares adicionales.	- Alto valor de suscripción mensual/anual para el uso completo del software. - Limitaciones en Calidad de imagen en version gratuita. - Tiempo de espera en escaneado y procesamiento de imágenes alto. - Software dependiente de conexión a internet. - No permite visualización en versiones gratuitas para usuarios externos

5.1.2. Imágenes con software Kuula

El software Kuula corresponde a una plataforma en línea especializada en la generación de recorridos virtuales a partir de imágenes esféricas de 360°. A diferencia de herramientas basadas en escaneos volumétricos, como Matterport, Kuula opera esencialmente sobre fotografías panorámicas capturadas previamente mediante cámaras compatibles, tales como la Insta360 X3, Ricoh Theta o GoPro Max, entre otras.

El funcionamiento de Kuula se estructura en dos etapas principales:

- Captura de imágenes: se realiza mediante dispositivos de fotografía 360°, posicionando la cámara en los puntos estratégicos dentro del espacio físico a documentar. Estas imágenes esféricas abarcan un campo visual completo (360x180 grados), capturando tanto el entorno horizontal como el vertical. (ver Fig. 5.1.4).
- Procesamiento y edición en plataforma: las imágenes son posteriormente cargadas al entorno web de Kuula, donde el usuario puede configurar la navegación del recorrido virtual. El sistema permite interconectar las distintas vistas mediante la incorporación de hotspots, los cuales funcionan como nodos de transición entre los diferentes puntos de captura. (ver Fig. 5.1.4).

Dentro de sus principales características, Kuula permite la incorporación de elementos interactivos tales como etiquetas informativas, inserción de imágenes adicionales, vínculos a recursos externos, integración de planos de planta y elementos multimedia como audios explicativos o música ambiental. (ver Tabla 5.1.2).

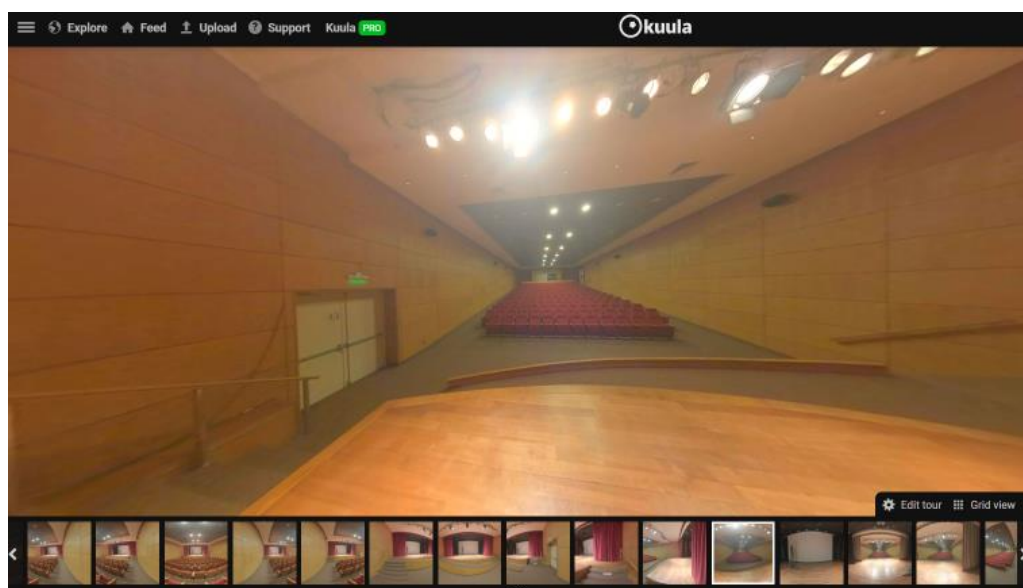


Figura 5.1.4. Plano 3D de recorrido virtual Teatro UCSC. Fuente: Kuula.

Para experimentar este recorrido virtual ingresar al siguiente enlace:

<https://kuula.co/share/collection/7cRfC?logo=1&info=1&fs=1&vr=0&sd=1&thumbs=1>

Tabla 5.1.2. Ventajas y desventajas de software Kuula.

Ventajas	Desventajas
- Plataforma completamente web, sin necesidad de instalaciones locales. - Interfaz intuitiva, accesible para usuarios sin conocimientos técnicos avanzados. - Rápido procesamiento y publicación de recorridos virtuales. - Facilidad de integración en sitios web, redes sociales y dispositivos VR. - Visualización de espacios creados mediante links.	- No genera modelos 3D volumétricos, limitándose a imágenes 360°. - Imposibilidad de realizar mediciones precisas de dimensiones espaciales. - Algunas funcionalidades avanzadas están disponibles únicamente mediante suscripción de pago. - Realismo limitado en comparación con plataformas de modelado tridimensional como Matterport. - Limitación en el número de proyectos y almacenamiento según el plan contratado.

5.1.3. Consideraciones técnicas en ambas plataformas:

- Evitar superposición de imágenes, especialmente en ambientes repetitivos como auditorios.
- Mantener una distancia adecuada entre cámara y móvil para evitar pérdida de conexión.
- Realizar varios escaneos por punto si hay confusión topológica.

Matterport y Kuula resultan como herramientas altamente efectivas para iniciarse en la virtualización inmersiva de espacios reales.

5.1.4. Imágenes con fotogrametría y Reality Capture.



Reality capture es un programa que utiliza la fotogrametría para escanear superficies objetos y espacios para reconstruirlos en modelo digital en tres dimensiones.(ver Fig. 5.1.5).

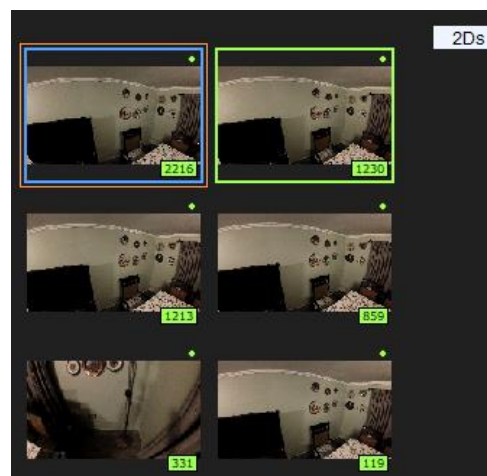
Permite crear escenas en realidad virtual, mallas 3D texturizadas, proyecciones ortográficas y mapas georreferenciados.

Figura. 5.1.5. Software Reality Capture.

Se escaneó un espacio tipo living, extrayendo fotogramas desde un video grabado con cámara 360°. A mayor número de fotogramas, mejor resolución y fidelidad, aunque aumenta el tiempo de procesamiento. (ver Fig. 5.1.6).



(a) Espacio Escaneado a 3D



(b) División de videos a fotogramas por Segundo.

Figura 5.1.6. Espacio escaneado para realidad virtual.

El sistema genera un modelo 3D dentro de una topología cúbica, visualizable desde distintos ángulos. (ver Fig. 5.1.7-5.1.8).



Figura 5.1.7. Vista frontal de realidad virtual. Fuente: Reality Capture.

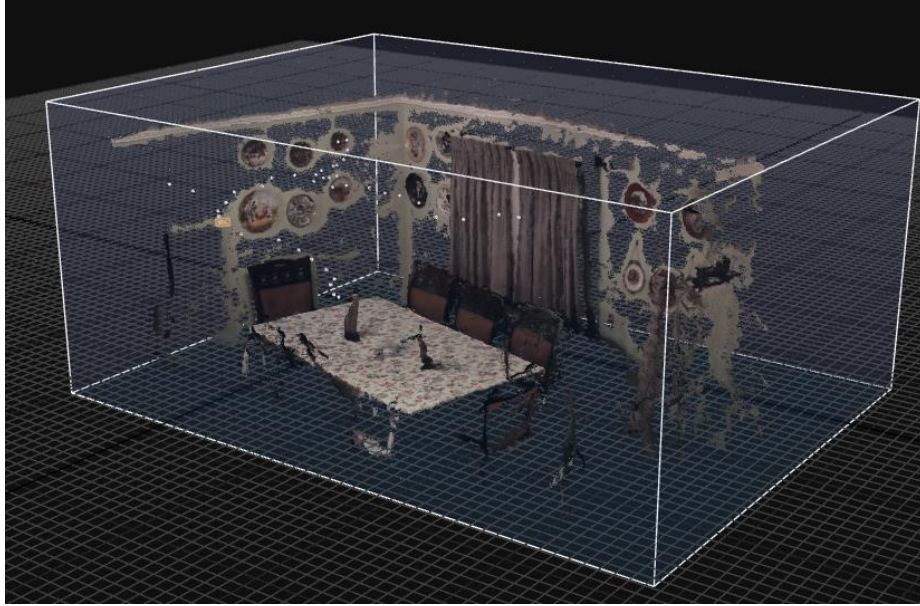


Figura 5.1.8. Vista ¾ de realidad virtual. Fuente: Reality Capture.

En espacios complejos con muchos objetos, la fotogrametría puede generar errores como superposición de texturas y ruido visual. (ver Fig. 5.1.9-5.1.10).

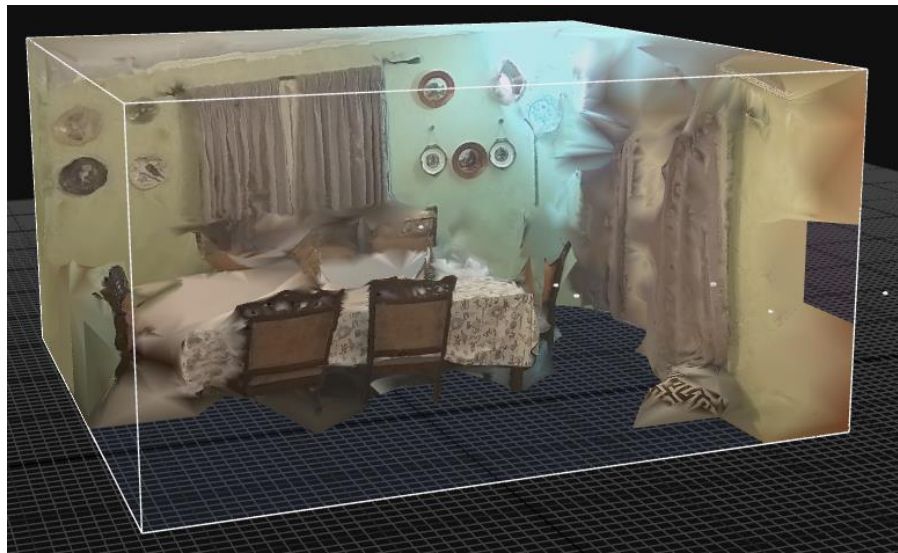


Figura 5.1.9. Ejemplo de superposición de objetos. Fuente: Reality Capture.

Para minimizar errores se recomienda:

- Escanear desde el punto final hacia el inicio del recorrido.
- Usar cámaras en modo “single lens” (una sola lente) para reducir interferencia del trípode.
- Separar objetos y escanearlos por separado.

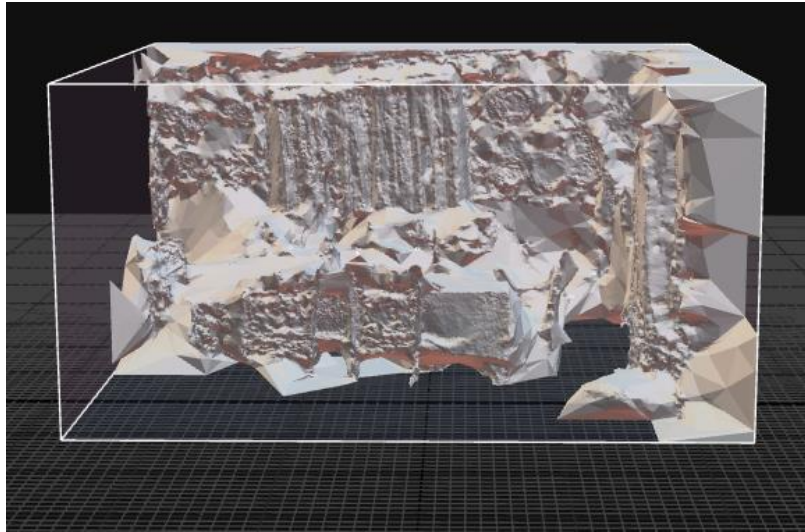


Figura 5.1.10. Mapa de sólidos de escaneo de living. Fuente: Reality Capture.



(a) vertices



(b) sólidos



(c) Suavizado de texturas

Figura 5.1.11. Mapas 3D en realidad virtual. Fuente: Reality Capture.

Como se aprecia en la Figura 5.2.7 (c) siendo este el último proceso de la imagen, se aprecia un mayor parecido con la realidad de la Figura 5.2.2. (a). Mejorando claramente la calidad de la imagen.

Para tener una mejor idea de las ventajas y desventajas del uso de este software ver Tabla 5.2.1.

Tabla 5.2.1. Ventajas y desventajas del uso del software Reality Capture.

Ventajas	Desventajas
- Alta calidad en imágenes. - Mayor inmersión para el usuario (puede ser utilizado con lentes de realidad virtual). - Bajo costo monetario. - Visualizaciones sin la necesidad de internet.	- Uso de más softwares. - Amplio conocimiento en modelado y programación. - Mayor requerimiento de hardware para el procesamiento de imágenes. - Mayor tiempo de edición y postprocesamiento.

5.1.5 Herramientas complementarias para modelado inmersivo

Para mejorar la calidad y usabilidad de los recorridos 3D generados, se pueden incorporar los siguientes programas:

- Blender: mejora y suaviza texturas para modelado avanzado.
- Autodesk Revit: permite modelado arquitectónico y metodología BIM (Building Information Modeling).
- Unreal Engine 5: ideal para crear entornos interactivos y agregar físicas, luces, sonidos y navegación en primera persona para una experiencia completamente inmersiva.

El uso de estas herramientas expande el potencial de las cámaras 360°, permitiendo su aplicación más allá de las telecomunicaciones, en áreas como el diseño arquitectónico, simulaciones educativas, museografía virtual y mucho más.

Las experiencias inmersivas e imágenes 360 de este tipo requieren de un amplio y complejo trabajo el cual se complementa absolutamente con el uso de la tecnología de estas cámaras siendo un gran aliado al momento de conseguir los mejores resultados.

Para ver parte del proceso de este escaneado 3D visitar el siguiente enlace <https://youtu.be/9XiBu23hWZA>.

Capítulo 6. Importancia social

6.1. Impacto social y educativo de la tecnología inmersiva

El presente proyecto, basado en tecnologías inmersivas y conectividad 5G, tiene un alto potencial de impacto social, educativo y tecnológico, con una escalabilidad aplicable a múltiples áreas, como la educación, la salud mental, la accesibilidad a la naturaleza y la innovación en procesos formativos. La investigación no solo permite validar técnicamente el uso de cámaras 360° y realidad virtual en transmisiones, sino que también contribuye al desarrollo de nuevas metodologías de aprendizaje, orientadas a públicos que tradicionalmente han estado excluidos del acceso a la tecnología o a experiencias educativas de calidad.

6.2. Participación en instancias de innovación e impacto

6.2.1. Falling Walls Lab Chile 2024

El 26 de junio de 2024, el proyecto fue seleccionado para participar en la instancia nacional del Falling Walls Lab Chile, convocado por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, posicionándose entre los 15 mejores proyectos a nivel nacional.

El trabajo fue presentado bajo el título:
“Breaking the Wall of Mobility to Access Nature and Knowledge”

Este proyecto propone el uso de tecnología 5G y herramientas inmersivas para facilitar el acceso a contenidos educativos y experiencias naturales en entornos remotos, aportando a la disminución de las brechas educativas y sociales. (ver Fig. 6.1.1).

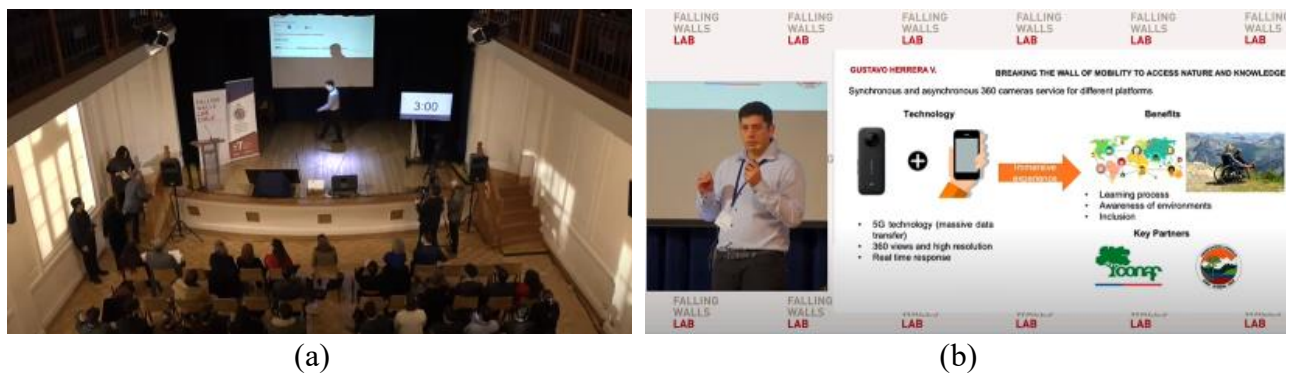


Figura 6.1.1. Presentación Falling Walls Lab. Chile. En Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Además, esta fue una de las primeras participaciones de la UCSC en dicha convocatoria, marcando un precedente en innovación aplicada por estudiantes de Ingeniería Civil Eléctrica y abriendo oportunidades de vinculación nacional e internacional.

6.2.2. Idea e Innova UCSC – Julio 2024

El 31 de julio de 2024, el proyecto fue presentado en el programa “Idea e Innova UCSC”, dentro de la línea educación digital inmersiva (EDI), en la Sala CoWork de la universidad.

El proyecto EDI busca abordar problemáticas como la deserción escolar y la falta de acceso a herramientas educativas en sectores rurales, específicamente entre estudiantes de 5 a 21 años, así como en instituciones con escasez de recursos tecnológicos. (ver Fig. 6.1.2).



(a)



(b)

Figura 6.1.2. Presentación idea e innova ucsc. Sala CoWork.

6.2.3. Modelo de negocio propuesto y comparación de mercado

El proyecto plantea un modelo sustentable basado en:

- Suscripciones institucionales para acceso a contenido educativo inmersivo.
- Capacitación y certificación de docentes en uso de tecnología de realidad virtual.
- Generación de contenidos educativos personalizados y contextualizados.

Se realizó una comparación con iniciativas similares en Chile, evidenciando que EDI es el único proyecto enfocado en educación inmersiva con impacto social directo, mientras que los demás se orientan principalmente al comercio electrónico o al entretenimiento. (ver Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Comparativa con iniciativas chilenas.

Producto	Tecnología inmersiva	Accesibilidad dispositiva	Valor Educativo/ Personalización
Educación Digital Inmersiva (EDI)	Implementa tecnología inmersiva (como realidad virtual y aumentada).	Acceso desde múltiples dispositivos (PC, tabletas, móviles).	Permite la personalización del ritmo y el estilo de aprendizaje.
MiniLabs	Ofrece tours virtuales y fotografías en 360°.	Plataforma de comercio electrónico con vistas en 360°.	Se adapta a diferentes formatos de contenido (videos, textos, gráficos).
Phantom Chile	Está equipado con máquinas de realidad aumentada.	Proporciona experiencias interactivas en entornos virtuales.	Simula ambientes reales para el entretenimiento.

6.2.4. Impacto y proyección

El desarrollo de propuestas tecnológicas como EDI permite:

- Democratizar el acceso a entornos educativos de calidad.
- Apoyar a estudiantes de zonas rurales o aisladas con experiencias inmersivas accesibles.
- Generar nuevas oportunidades laborales en ingeniería, diseño, pedagogía y salud mental.
- Posicionar a la UCSC como una institución innovadora con impacto social real.

El presente trabajo demostró cómo una iniciativa tecnológica, desarrollada desde el ámbito académico, puede generar valor agregado para la sociedad, al tiempo que fortalece competencias técnicas y humanas de los estudiantes.

6.3 Valor educacional de las transmisiones inmersivas

El presente proyecto evidenció un **alto valor educacional** al incorporar tecnologías de transmisión inmersiva sobre redes móviles 5G y dispositivos de realidad virtual. Desde un enfoque cualitativo, se identificaron tres indicadores principales:

- **Motivación y participación:** Las experiencias inmersivas fomentaron un mayor interés y compromiso en el estudiantado, al permitirles explorar entornos reales en formato virtual y en tiempo real. Este efecto coincidió con lo planteado por Radianti et al., quienes señalaron que la realidad virtual incrementa la motivación intrínseca y la percepción de aprendizaje significativo en la educación superior.
- **Accesibilidad e inclusión:** La posibilidad de generar recorridos virtuales y transmisiones en vivo permitió acercar espacios académicos y culturales a estudiantes que, por razones geográficas o de movilidad, no podían acceder de manera presencial. De este modo, se aportó a la equidad educativa, lo que está en línea con lo señalado por Jensen y Konradsen, quienes destacan que los entornos inmersivos eliminan barreras de acceso y promueven oportunidades más equitativas de aprendizaje.
- **Replicabilidad e innovación pedagógica:** La integración de cámaras 360°, visores VR y software de modelado demostró ser aplicable a diferentes disciplinas académicas, tales como ingeniería, arquitectura, educación y ciencias de la salud. Según Fowler, estas tecnologías constituyen herramientas transversales que potencian metodologías activas de enseñanza-aprendizaje y promueven la innovación en los procesos formativos.

En conjunto, los resultados de este trabajo confirmaron que las transmisiones inmersivas no solo fueron técnicamente viables, sino que además representaron un **recurso académico estratégico** para la UCSC. Su implementación fortaleció la enseñanza presencial y remota, facilitó el aprendizaje experiencial, y proyectó un impacto positivo en la formación de estudiantes y en la innovación docente universitaria.

Capítulo 7. Valor monetario para equipamiento

El desarrollo de proyectos tecnológicos como el presente requiere una inversión significativa en equipamiento especializado, debido a las altas exigencias de procesamiento, captura de imagen y visualización inmersiva. La correcta selección y cuantificación de recursos es crucial para la planificación técnica, económica y operativa del sistema.

A continuación, se presentan los costos estimados de los principales activos tecnológicos necesarios para la transmisión, grabación y visualización de contenido en entornos inmersivos.

7.1. Presupuesto base de equipos digitales

En esta primera tabla se detallan los valores de mercado de los equipos principales, según distintos proveedores nacionales e internacionales. (ver Tabla 7.1).

Tabla 7.1. Equipos digitales según proveedores comerciales.

Equipo	Precio (CLP)	Proveedor
Qoocam 360 180VR	\$329.315	Kandao tienda oficial Aliexpress
Insta360 X3	\$409.450	Amazon Chile
	\$499.990	Mercado Libre Chile
	\$484.200	Rincón fotográfico
Lentes Oculus Quest 2	\$359.990	Varity
	\$489.990	Nextgame
	\$352.941	Ebay
Lentes Meta Quest pro	\$1.499.990	SotanoStore
	\$1.274.500	Ebay
	\$1.099.990	Nextgame

7.2. Composición del set de trabajo inmersivo

Tabla 7.2. Equipos digitales, cantidad y valores.

Equipo	Cantidad	Valor total por equipo (CLP)
Insta 360 X3	2	\$329.315
Qoocam 360 180VR	1	\$968.400
Lentes Oculus Quest 2	2	\$719.980
Lentes Meta Quest pro	1	\$1.099.990
Total		\$3.117.685

Este valor cubre los equipos esenciales para realizar transmisiones, capturas en 360° y visualización mediante realidad virtual. Otros periféricos y consumibles pueden sumarse según la evolución del proyecto o las condiciones del entorno de trabajo. (ver Tabla 7.2).

7.3. Presupuesto para mejora y ensamblaje de hardware

Para el procesamiento de video en resoluciones altas (2K, 4K, incluso 8K), edición de contenidos y renderizado en tiempo real, se requiere una estación de trabajo con alto rendimiento. A continuación, se presenta una configuración propuesta para un computador destinado al procesamiento inmersivo. (ver Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Valores de componentes propuestos para mejoramiento de hardware.

Componente	Producto	Proveedor	Precio (CLP)
Tarjeta de video	Zotac Gaming GeForce RTX 3050 AMP holo LHR	TecTec	\$599.990
Procesador	Intel Core I7-14700	Winpy	\$438.400
Placa madre	Gigabyte B760 DS3HAC	SP Digital	\$180.780
RAM	Kingston Fury Renegade 16GB DDR5-7200	Café digital	\$125.922
RAM	Kingston Fury Renegade 16GB DDR5-7200	Café digital	\$125.922
Fuente de poder	Gamemax GX-1250 PRO BK (1250 W)	MyShop	\$143.805
Gabinete	XPG Starker Air- Black	Pc Express	\$61.596
Unidades de estado sólido	Kingston NV2 2 TB	Sandos	\$115.400
Unidad de enfriamiento de CPU	Cougar Poseidon Elite ARGB 360- Black	SP Digital	\$73.145
Ventiladores	Cooler Master SickleFlow 120 ARGB 3 in 1 White	V Gamers	\$29.990
Total			\$1.894.860

7.4. Consideraciones finales

Aunque la inversión inicial pueda parecer elevada, corresponde a una infraestructura crítica para el desarrollo tecnológico del Laboratorio 5G UCSC, con impacto más allá de este proyecto. Una estación de trabajo robusta permitirá procesar video 360° en tiempo real, ejecutar software avanzado de edición y modelado 3D, y transmitir en múltiples plataformas sin sobrecarga de hardware. En este contexto, la relación costo-beneficio resulta favorable, dado el uso colectivo y continuo que potenciará investigaciones, docencia y prototipados en diversas áreas como ingeniería, educación, salud, arquitectura y diseño.

Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros

8.1. Conclusiones generales

En relación con la evaluación de la calidad de transmisión de redes 5G comerciales, se determinó que el mínimo bitrate requerido fue de 6000 kbps para garantizar una transmisión estable en resolución Full HD (1920×1080) o superior. Los resultados experimentales evidenciaron que los principales operadores presentes en el Gran Concepción ofrecieron velocidades de subida suficientes para este propósito, aunque se observó variabilidad en parámetros como la latencia y la estabilidad del enlace. En particular, las redes bajo arquitectura 5G NSA permitieron alcanzar retardos promedio por debajo de 20 ms, favoreciendo la sincronización y continuidad de las transmisiones inmersivas; sin embargo, a pesar de estos datos, muchas veces las transmisiones resultaron deficientes debido al nivel de hardware implementado.

Se logró configurar y transmitir en tiempo real mediante equipos como la Qoocam 360 180VR y la Insta360 X3, vinculados a plataformas de streaming a través de OBS Studio, CameraFi Live y aplicaciones oficiales. Las pruebas se realizaron con un bitrate de 6000 kbps, suficiente para garantizar transmisiones estables y experiencias inmersivas; sin embargo, la calidad visual y la fluidez de las transmisiones no siempre alcanzaron un nivel óptimo, evidenciando limitaciones asociadas al hardware implementado y a la capacidad de procesamiento de los equipos intermedios. La visualización de cada transmisión se realizó mediante lentes de realidad virtual, lo que permitió evaluar directamente la experiencia inmersiva, la percepción de profundidad, la interacción con el entorno y la calidad visual percibida por los usuarios.

Las transmisiones en vivo con cámaras 360° y los recorridos virtuales generados mediante herramientas como Matterport, Kuula y Reality Capture demostraron ser un recurso de alto valor académico y divulgativo. Estas experiencias permitieron ampliar las posibilidades de enseñanza y acceso a espacios físicos de manera remota, evidenciando la efectividad del sistema para la exploración de entornos complejos y el fortalecimiento de procesos de aprendizaje en contextos universitarios.

Entre los hallazgos más relevantes se destaca:

- La implementación de la red 5G en el Laboratorio UCSC tendrá un impacto significativo en la calidad de las transmisiones en vivo, permitiendo velocidades de carga/descarga que facilitarán el uso de videos inmersivos de alta resolución.
- La limitación del rango operativo del 5G (3.5 GHz) adjudicado a Movistar implica una zona de cobertura restringida, aunque altamente eficiente en espacios definidos como laboratorios o campus universitarios.
- La integración de transmisiones en vivo, visualización mediante lentes de realidad virtual y recorridos virtuales abre nuevas líneas de investigación y aplicación en áreas como educación, salud, ingeniería, turismo virtual y accesibilidad digital.

En términos globales, el proyecto permitió demostrar que la implementación de un sistema de transmisión inmersiva en vivo con cámaras 360° sobre redes 5G NSA comerciales fue técnicamente factible en la ciudad de Concepción, cumpliendo con los requisitos de bitrate, velocidad de subida y latencia necesarios para sostener experiencias inmersivas en tiempo real. La correcta integración de hardware (Qoocam 360 180VR, Insta360 X3, visores Oculus Quest 2) y software especializado (OBS Studio, CameraFi Live, DaVinci Resolve, Matterport, Kuula y Reality Capture) permitió transmitir contenido en vivo y generar recorridos virtuales asíncronos, ampliando el alcance educativo y divulgativo del sistema.

El uso de lentes de realidad virtual fue clave para evaluar la experiencia inmersiva de manera directa, confirmando la percepción de profundidad, interacción y calidad visual. En conjunto, los resultados obtenidos evidenciaron que se cumplieron los objetivos planteados en el estudio, consolidando el valor del sistema como herramienta educativa, exploratoria y experimental.

8.2. Trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se identifican diversas líneas de acción que permitirán ampliar, profundizar y perfeccionar el trabajo realizado. Estas proyecciones no solo buscan mejorar la calidad de las experiencias inmersivas, sino también fortalecer el uso de tecnologías emergentes dentro del contexto universitario, especialmente en el Laboratorio 5G UCSC.

Las principales proyecciones de trabajo futuro son:

- Ampliar el desarrollo de contenido inmersivo utilizando plataformas especializadas como Reality Capture, profundizando en técnicas de fotogrametría avanzada, modelado 3D y simulación de espacios con mayor grado de realismo y precisión topológica.
- Integrar contenidos pregrabados en 360° y 180° VR en transmisiones en vivo, con temáticas variadas como eventos musicales, entornos naturales y recorridos institucionales. Esta fusión permitirá enriquecer la experiencia del usuario al combinar información en tiempo real con recursos visuales inmersivos.
- Evaluar en profundidad el rendimiento de la nueva red 5G Movistar mediante la conexión directa de un computador al rack 5G del laboratorio, con el fin de monitorear y registrar métricas de conectividad, latencia, jitter y velocidad de transferencia en distintos escenarios de uso.
- Implementar y poner en operación dispositivos como el CPE (Customer Premises Equipment), en conjunto con celulares 5G y tarjetas SIM 5G, para analizar el comportamiento de la red bajo distintas condiciones. Se propone realizar pruebas de campo considerando diferentes distancias respecto a la antena AAU MIMO, a fin de estudiar cómo varía la calidad de la conexión en función de la ubicación geográfica y de las posibles interferencias físicas.

Estas líneas de trabajo permitirán fortalecer las capacidades experimentales del laboratorio, brindar oportunidades de desarrollo a futuros estudiantes, y posicionar a la UCSC como un referente en la aplicación de tecnologías de telecomunicaciones en entornos académicos y sociales.

Bibliografía

- [1] Pérez de Arce Valdés. (2023). Conectividad de cámara 180/360 y lentes de realidad virtual mediante señales 5G [Informe de proyecto]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- [2] Meta Platforms Inc. (2023). Quest 2 Setup Guide: VR Headset Unboxing. Oculus.
- [3] Kandao Technology Co. (2023). User Guide – Qoocam 360 / 180VR.
- [4] Insta360. (2023). Insta360 X3 QuickStart Guide.
- [5] Cambridge in Colour. (2020). Camera vs. the human eye: A comparison. <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-vs-human-eye.htm>
- [6] University of Virginia. (2004). PHYS 531, Lecture 11: Survey of Optical Systems [PDF].
- [7] Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile. (2024). Mapas de cobertura digital. Gobierno de Chile.
- [8] Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile. (2012). Ley N.º 20.599 sobre instalación de antenas (“Ley de Torres”). Diario Oficial de la República de Chile.
- [9] Leiva Espinoza, C. R. (2024). Comparación de redes 5G entre Laboratorio UCSC, Laboratorio UDEC y Campus 5G UDEC [Proyecto de iniciación]. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- [10] Gupta, R., Sengupta, S., & Dey, S. (2021). Enabling immersive media over 5G: Architectures, challenges, and opportunities. IEEE Virtual Reality Workshop on Immersive Media, 2021.
- [11] Arnheim, R. (1974). Art and visual perception: A psychology of the creative eye (Rev. ed.). University of California Press.
- [12] Palmer, S. E. (1999). Vision science: Photons to phenomenology. MIT Press.
- [13] Lidwell, W., Holden, K., & Butler, J. (2010). Universal principles of design (2nd ed.). Rockport Publishers.
- [14] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, “A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda,” *Computers & Education*, vol. 147, p. 103778, Apr. 2020.
- [15] L. Jensen and F. Konradsen, “A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training,” *Education and Information Technologies*, vol. 23, no. 4, pp. 1515–1529, Jul. 2018.
- [16] C. Fowler, “Virtual reality and learning: Where is the pedagogy?,” *British Journal of Educational Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 412–422, Mar. 2015.

Anexo A. Vistas generales

Este anexo presenta imágenes ilustrativas de las principales plataformas, softwares y herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto, así como también avances correspondientes a trabajos futuros relacionados con modelado 3D e integración con motores gráficos. (ver Fig. A.1.1-A.2.1-A.3.1 y A.4.1).

A.1. Vista OBS Studio

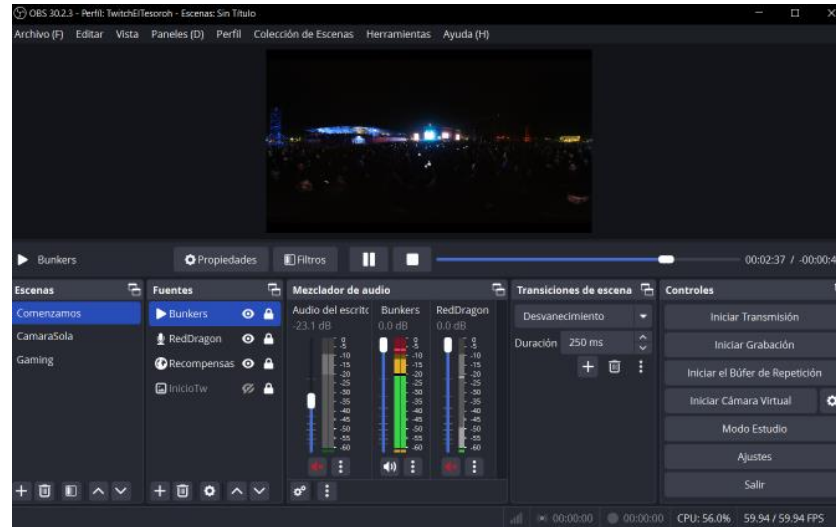


Figura A.1.1. Software OBS Studio Vista de sistema implementado para transmisión de futura inauguración del Laboratorio 5G UCSC.

A.2 Vista Matterport

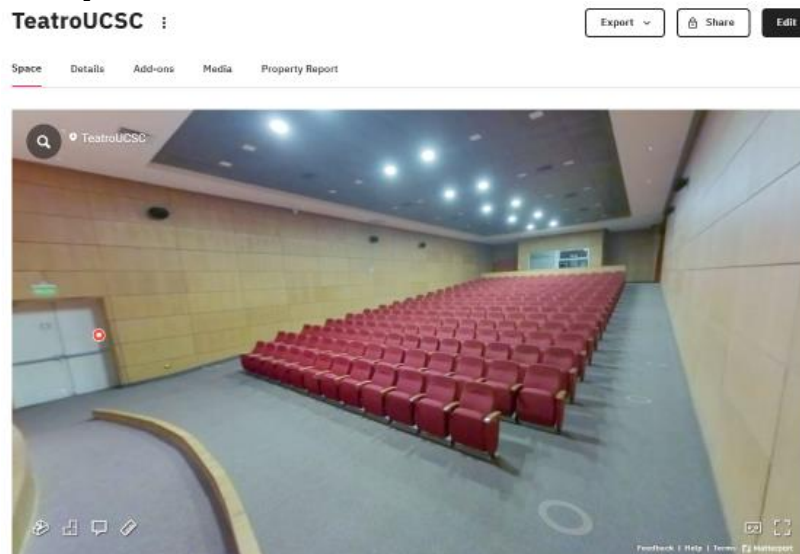


Figura A.2.1. Trabajos de inmersión en software Matterport y creación de espacios 3D.

A.3 Vista Kuula

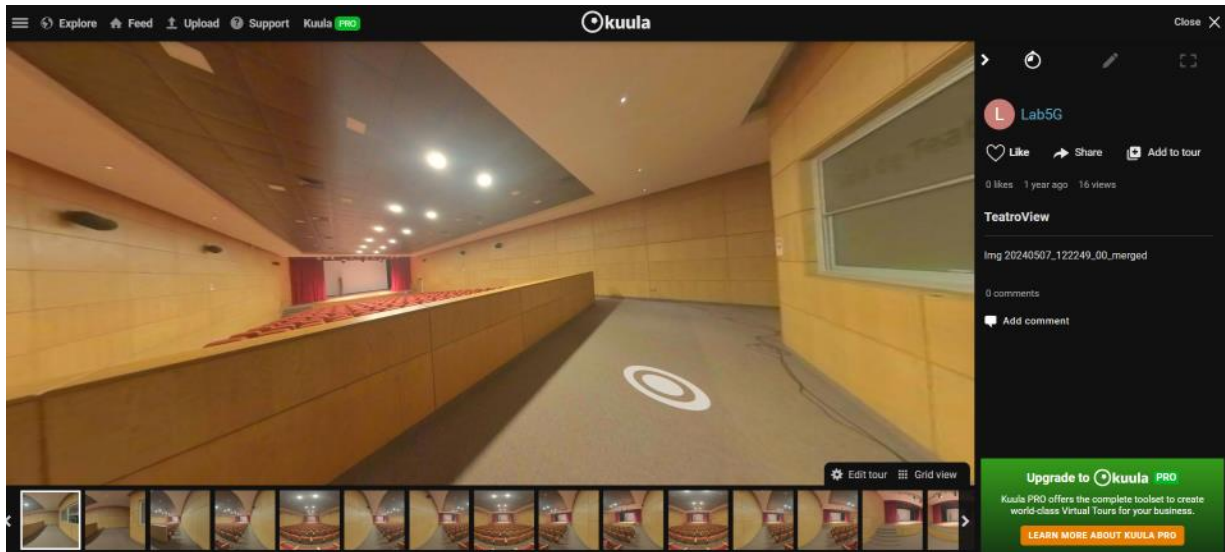


Figura A.3.1. Trabajos de inmersión en software Kuula y creación de espacios 3D.

A.4. Vista de reality Capture

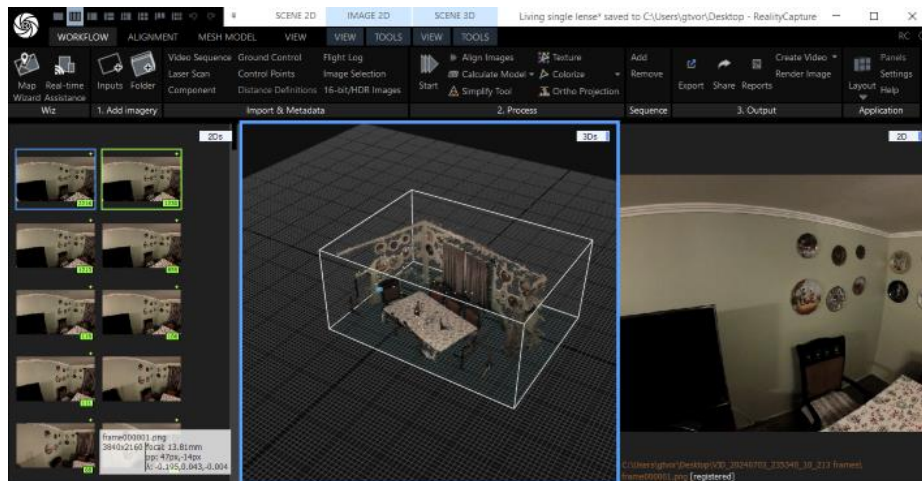
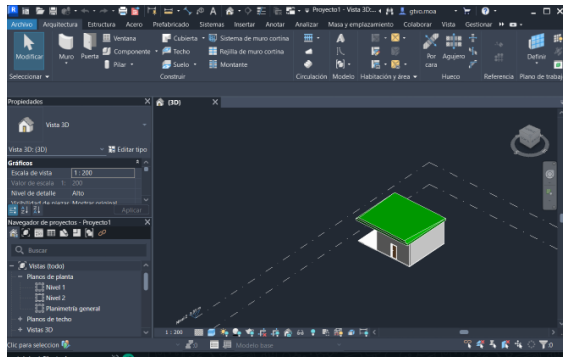
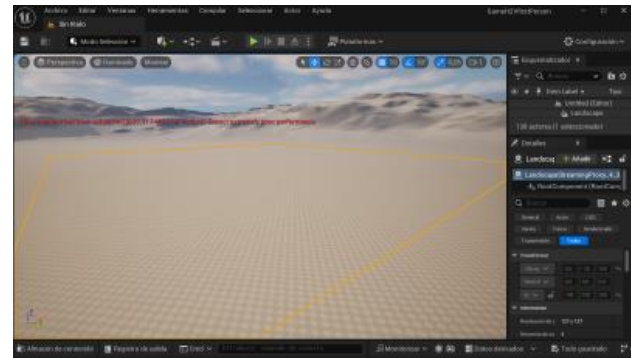


Figura A.4.1. Software Reality Capture e interfaz para la creación de espacios 3D.

A.5. Vistas de avances de trabajos futuros



(a)



(b)

Figura A.5.1. Interfaz de software Revit (a) y Unreal Engine 5 (b).

Estos avances corresponden a las primeras pruebas experimentales orientadas a integrar estructuras con motores gráficos para el desarrollo de entornos inmersivos interactivos, permitiendo una experiencia más rica y realista para aplicaciones en educación, arquitectura y simulación (ver Fig. A.5.1).

Anexo B. Referencias Conceptuales complementarias

B.1 Ley de Ohm

La Ley de Ohm, aunque elemental, es base fundamental en la configuración de fuentes de poder y compatibilidad de consumo eléctrico en dispositivos conectados a sistemas de transmisión. Durante las pruebas con cámaras y equipos de red, fue necesario calcular la demanda energética y compatibilidad de cargadores y fuentes, especialmente cuando se utilizaron conexiones USB-C con alimentación simultánea de datos y energía.

B.2 Leyes de Murphy

Aunque no constituyen leyes científicas, las Leyes de Murphy fueron mencionadas como marco anecdótico para destacar la importancia de prever fallas operacionales: pérdida de señal, errores de conexión, batería insuficiente o incompatibilidad de puertos. Este tipo de imprevistos efectivamente ocurrió durante las pruebas, reforzando la necesidad de planificar redundancias y respaldos técnicos.

B.3 Leyes de Percepción Visual

Las leyes de la percepción visual (Gestalt) fueron consideradas en la selección de parámetros ópticos y de visualización (campo de visión, continuidad, proximidad visual), especialmente al diseñar contenidos inmersivos y recorridos virtuales. Estas leyes permiten maximizar el realismo percibido en transmisiones 360°, mejorando la experiencia del usuario en entornos educativos o de difusión científica.

Evaluación e impacto desde el capítulo. Evaluación de impacto ver tabla.