# 7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

## 7.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados experimentales del sistema RAG desarrollado para la recuperación semántica de documentación técnica de Microsoft Azure. Los resultados se fundamentan en evaluaciones rigurosas realizadas sobre un corpus de 187,031 documentos técnicos y 13,436 preguntas, utilizando 2,067 pares pregunta-documento validados como ground truth para la evaluación cuantitativa.

La experimentación siguió el paradigma de test collection establecido por Cranfield (Cleverdon, 1967), adaptado para el contexto de recuperación semántica contemporánea. Los resultados presentados provienen exclusivamente de datos experimentales reales, sin valores simulados o aleatorios, según se verifica en la configuración experimental (`data\_verification: {is\_real\_data: true, no\_simulation: true, no\_random\_values: true}`) documentada en los archivos de resultados del proyecto.

**Actualización Metodológica Significativa:** Este capítulo incorpora resultados de una evaluación ampliada ejecutada el 2 de agosto de 2025, procesando **1,000 preguntas por modelo** (91x más datos que la evaluación inicial) durante **7.8 horas de evaluación continua**. Esta expansión proporciona confiabilidad estadística robusta y resuelve limitaciones identificadas en evaluaciones preliminares, particularmente la funcionalidad del modelo E5-Large y patrones emergentes del impacto de reranking.

El análisis aborda sistemáticamente cada uno de los objetivos específicos planteados en el Capítulo I, proporcionando evidencia empírica para evaluar la efectividad de diferentes arquitecturas de embeddings, técnicas de reranking, y metodologías de evaluación en el dominio técnico especializado de Microsoft Azure.

## 7.2 Resultados por Modelo de Embedding

### 7.2.1 Configuración Experimental

La evaluación experimental se ejecutó el 2 de agosto de 2025, procesando 1,000 preguntas de prueba distribuidas entre 4 modelos de embedding diferentes. La configuración experimental verificada incluye:

**Parámetros de Evaluación:**

• Preguntas evaluadas: 1,000 por modelo (91x más que la evaluación inicial)

• Modelos comparados: 4 (Ada, MPNet, MiniLM, E5-Large)

• Método de reranking: CrossEncoder (ms-marco-MiniLM-L-6-v2) con normalización Min-Max

• Top-k: 15 documentos por consulta

• Duración total: 28,216 segundos (7.8 horas)

• Framework de evaluación: RAGAS completo con API de OpenAI

**Corpus de Evaluación:**

• Documentos indexados: 187,031 chunks técnicos

• Dimensiones por modelo: Ada (1,536D), E5-Large (1,024D), MPNet (768D), MiniLM (384D)

• Ground truth: 2,067 pares pregunta-documento validados

### 7.2.2 Ada (OpenAI text-embedding-ada-002)

#### 7.2.2.1 Métricas de Recuperación

El modelo Ada mantuvo el mejor rendimiento general entre todos los modelos evaluados en la fase de recuperación inicial:

**Rendimiento ANTES del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.097 (±0.021)

• Recall@5: 0.399 (±0.078)

• F1@5: 0.152 (±0.029)

• NDCG@5: 0.228 (±0.045)

• MAP@5: 0.263 (±0.052)

• MRR: 0.217 (±0.043)

**Rendimiento DESPUÉS del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.079 (-18.3%)

• Recall@5: 0.324 (-18.7%)

• F1@5: 0.124 (-18.4%)

• NDCG@5: 0.206 (-9.6%)

• MAP@5: 0.199 (-24.3%)

• MRR: 0.197 (-9.5%)

Con el dataset ampliado, se observa un patrón inesperado: el reranking tuvo un impacto negativo en las métricas de Ada, sugiriendo que las representaciones iniciales del modelo ya capturan óptimamente la relevancia semántica.

#### 7.2.2.2 Métricas RAG Especializadas

**Calidad de Generación (RAGAS):**

• Faithfulness: 0.967 (excelente consistencia factual)

• Answer Relevancy: 0.912 (alta relevancia de respuestas)

• Answer Correctness: 0.834 (buena precisión factual)

• Context Precision: 0.745 (contexto relevante)

• Context Recall: 0.689 (cobertura de información)

• Semantic Similarity: 0.721 (similitud semántica sólida)

**Evaluación Semántica (BERTScore):**

• BERTScore Precision: 0.741

• BERTScore Recall: 0.736

• BERTScore F1: 0.738

#### 7.2.2.3 Análisis de Rendimiento Superior

El análisis detallado de documentos recuperados muestra que Ada logra identificar documentos semánticamente relacionados con scores de similitud coseno superiores a 0.79 en el primer resultado. La evaluación ampliada confirma que Ada alcanza el mejor balance entre precisión inicial y calidad de generación RAG, estableciendo el benchmark de rendimiento para el dominio técnico de Azure.

### 7.2.3 MPNet (multi-qa-mpnet-base-dot-v1)

#### 7.2.3.1 Métricas de Recuperación

MPNet demostró rendimiento sólido, confirmando su especialización en tareas de pregunta-respuesta:

**Rendimiento ANTES del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.074 (±0.018)

• Recall@5: 0.292 (±0.065)

• F1@5: 0.112 (±0.024)

• NDCG@5: 0.199 (±0.041)

• MAP@5: 0.218 (±0.046)

• MRR: 0.185 (±0.038)

**Rendimiento DESPUÉS del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.070 (-5.6%)

• Recall@5: 0.280 (-4.2%)

• F1@5: 0.108 (-3.6%)

• NDCG@5: 0.196 (-1.5%)

• MAP@5: 0.210 (-3.7%)

• MRR: 0.185 (sin cambios)

Similar a Ada, MPNet mostró un impacto mínimo o negativo del reranking, validando la calidad de sus embeddings especializados para Q&A.

#### 7.2.3.2 Métricas RAG Especializadas

**Calidad de Generación (RAGAS):**

• Faithfulness: 0.962 (comparable a Ada)

• Answer Relevancy: 0.891 (sólida relevancia)

• Answer Correctness: 0.798 (buena precisión)

• Context Precision: 0.723 (contexto apropiado)

• Context Recall: 0.671 (cobertura adecuada)

• Semantic Similarity: 0.695 (buena similitud semántica)

**Evaluación Semántica (BERTScore):**

• BERTScore Precision: 0.746

• BERTScore Recall: 0.731

• BERTScore F1: 0.739

#### 7.2.3.3 Análisis Especializado Q&A

La especialización de MPNet en tareas de pregunta-respuesta se refleja en su rendimiento consistente y estable. Aunque no supera a Ada en métricas de recuperación, muestra excelente calidad en generación RAG, posicionándose como una alternativa costo-efectiva para implementaciones que priorizan el balance entre rendimiento y recursos.

### 7.2.4 MiniLM (all-MiniLM-L6-v2)

#### 7.2.4.1 Métricas de Recuperación

MiniLM continúa siendo el modelo que más se beneficia del reranking:

**Rendimiento ANTES del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.053 (±0.013)

• Recall@5: 0.201 (±0.048)

• F1@5: 0.081 (±0.018)

• NDCG@5: 0.148 (±0.032)

• MAP@5: 0.160 (±0.035)

• MRR: 0.144 (±0.031)

**Rendimiento DESPUÉS del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.059 (+11.8%)

• Recall@5: 0.226 (+12.3%)

• F1@5: 0.091 (+12.3%)

• NDCG@5: 0.162 (+9.3%)

• MAP@5: 0.170 (+6.3%)

• MRR: 0.156 (+8.4%)

Los resultados confirman que MiniLM, a pesar de su menor dimensionalidad, alcanza rendimiento competitivo cuando se combina con reranking neural.

#### 7.2.4.2 Métricas RAG Especializadas

**Calidad de Generación (RAGAS):**

• Faithfulness: 0.961 (excelente calidad)

• Answer Relevancy: 0.867 (buena relevancia)

• Answer Correctness: 0.756 (precisión sólida)

• Context Precision: 0.689 (contexto apropiado)

• Context Recall: 0.634 (cobertura aceptable)

• Semantic Similarity: 0.658 (similitud adecuada)

**Evaluación Semántica (BERTScore):**

• BERTScore Precision: 0.737

• BERTScore Recall: 0.721

• BERTScore F1: 0.729

#### 7.2.4.3 Impacto del Reranking

MiniLM es el modelo que más se beneficia del CrossEncoder reranking, mejorando consistentemente todas las métricas principales. Este resultado confirma que aunque las representaciones iniciales son menos precisas debido a la menor dimensionalidad, el reranking neural puede compensar efectivamente estas limitaciones, haciendo de MiniLM una opción viable para aplicaciones con restricciones de recursos.

### 7.2.5 E5-Large (intfloat/e5-large-v2)

#### 7.2.5.1 Métricas de Recuperación - Resolución del Problema

E5-Large ahora muestra métricas válidas, resolviendo la falla crítica observada en la evaluación inicial:

**Rendimiento ANTES del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.060 (±0.015)

• Recall@5: 0.239 (±0.055)

• F1@5: 0.092 (±0.020)

• NDCG@5: 0.169 (±0.036)

• MAP@5: 0.183 (±0.040)

• MRR: 0.161 (±0.034)

**Rendimiento DESPUÉS del CrossEncoder Reranking:**

• Precision@5: 0.065 (+7.6%)

• Recall@5: 0.256 (+7.1%)

• F1@5: 0.100 (+8.7%)

• NDCG@5: 0.166 (-1.5%)

• MAP@5: 0.186 (+1.6%)

• MRR: 0.156 (-3.3%)

E5-Large muestra mejoras mixtas con el reranking, con ganancias en precisión y recall pero ligeras pérdidas en métricas de ranking.

#### 7.2.5.2 Métricas RAG Especializadas - Calidad Recuperada

Con la configuración corregida, E5-Large ahora muestra métricas RAG competitivas:

**Calidad de Generación (RAGAS):**

• Faithfulness: 0.961 (excelente calidad)

• Answer Relevancy: 0.853 (buena relevancia)

• Answer Correctness: 0.741 (precisión sólida)

• Context Precision: 0.672 (contexto apropiado)

• Context Recall: 0.618 (cobertura aceptable)

• Semantic Similarity: 0.641 (similitud adecuada)

**Evaluación Semántica (BERTScore):**

• BERTScore Precision: 0.734

• BERTScore Recall: 0.719

• BERTScore F1: 0.726

#### 7.2.5.3 Análisis de la Resolución

La resolución exitosa del problema de E5-Large confirma que las fallas iniciales se debían a configuración inadecuada más que a limitaciones inherentes del modelo. Con la configuración apropiada, E5-Large demuestra capacidades competitivas y se posiciona como una opción viable en el ecosistema de modelos evaluados.

## 7.3 Análisis Comparativo

### 7.3.1 Métricas de Precisión

#### 7.3.1.1 Ranking de Modelos por Precision@5 (1000 preguntas)

**Ranking ANTES del Reranking:**

1. **Ada:** 0.097 (liderazgo claro)

2. **MPNet:** 0.074 (-23.7% vs Ada)

3. **E5-Large:** 0.060 (-38.1% vs Ada)

4. **MiniLM:** 0.053 (-45.4% vs Ada)

**Ranking DESPUÉS del Reranking:**

1. **Ada:** 0.079 (mantiene liderazgo pero reducido)

2. **MPNet:** 0.070 (-11.4% vs Ada)

3. **E5-Large:** 0.065 (-17.7% vs Ada)

4. **MiniLM:** 0.059 (-25.3% vs Ada)

{**TABLA\_7.1:** Comparación completa de métricas por modelo antes y después del reranking}

#### 7.3.1.2 Análisis de Significancia Estadística

Con 1000 preguntas por modelo, las diferencias observadas son estadísticamente más robustas que en la evaluación inicial:

**Hallazgos Principales:**

• Ada vs MiniLM: Diferencia significativa (p < 0.001)

• Ada vs E5-Large: Diferencia significativa (p < 0.001)

• Ada vs MPNet: Diferencia significativa (p < 0.05)

• MPNet vs MiniLM: Diferencia significativa (p < 0.01)

Este resultado contrasta significativamente con la evaluación inicial donde no se detectaron diferencias estadísticamente significativas, confirmando la importancia del tamaño de muestra para detectar diferencias reales entre modelos.

{**FIGURA\_7.1:** Heatmap de p-valores de tests de significancia entre todos los pares de modelos}

### 7.3.2 Métricas de Relevancia Semántica

#### 7.3.2.1 Análisis BERTScore

Los resultados de BERTScore muestran un patrón más equilibrado que las métricas de recuperación tradicionales:

**Ranking por BERTScore F1:**

1. **MPNet:** 0.739 (mejor calidad semántica)

2. **Ada:** 0.738 (diferencia mínima)

3. **MiniLM:** 0.729 (-1.4% vs líder)

4. **E5-Large:** 0.726 (-1.8% vs líder)

Esta convergencia en métricas semánticas sugiere que aunque los modelos difieren en capacidad de recuperación exacta, todos generan respuestas de calidad semántica comparable.

#### 7.3.2.2 Análisis de Faithfulness

**Ranking por Faithfulness (RAGAS):**

1. **Ada:** 0.967 (+0.6% vs promedio)

2. **MPNet:** 0.962 (+0.1% vs promedio)

3. **MiniLM:** 0.961 (en promedio)

4. **E5-Large:** 0.961 (en promedio)

Los valores de Faithfulness excepcionalmente altos (>0.96) para todos los modelos indican que el sistema genera respuestas consistentes con la información recuperada, independiente del modelo de embedding utilizado.

{**FIGURA\_7.2:** Gráfico radar comparando las cinco métricas principales por modelo}

### 7.3.3 Tiempos de Respuesta y Eficiencia

#### 7.3.3.1 Análisis de Performance Temporal

**Tiempo de Procesamiento por Modelo (1000 preguntas):**

• Ada: 2:25:23 horas (8.72 seg/pregunta)

• E5-Large: 1:56:59 horas (7.02 seg/pregunta)

• MPNet: 1:47:46 horas (6.47 seg/pregunta)

• MiniLM: 1:40:06 horas (6.01 seg/pregunta)

• Tiempo total evaluación: 7.8 horas

**Distribución por Componente:**

• Generación de embeddings: ~20% del tiempo total

• Búsqueda vectorial ChromaDB: ~10% del tiempo total

• Reranking CrossEncoder: ~25% del tiempo total

• Generación RAG y evaluación: ~45% del tiempo total

#### 7.3.3.2 Eficiencia por Dimensionalidad

**Relación Dimensiones vs Performance:**

• MiniLM (384D): Mejor ratio eficiencia/rendimiento después del reranking

• MPNet (768D): Balance óptimo dimensiones/calidad

• E5-Large (1024D): Rendimiento competitivo con tiempo moderado

• Ada (1536D): Máximo rendimiento pero dependiente de API externa

{**FIGURA\_7.3:** Gráfico de dispersión mostrando dimensionalidad vs rendimiento vs tiempo de procesamiento}

## 7.4 Impacto del CrossEncoder

### 7.4.1 Análisis Cuantitativo del Reranking

#### 7.4.1.1 Mejoras por Modelo

El impacto del CrossEncoder (`ms-marco-MiniLM-L-6-v2`) con normalización Min-Max reveló patrones diferenciados por modelo:

**MiniLM - Mayor Beneficiario:**

• Precision@5: +11.8% (0.053 → 0.059)

• Recall@5: +12.3% (0.201 → 0.226)

• F1@5: +12.3% (0.081 → 0.091)

• NDCG@5: +9.3% (0.148 → 0.162)

**E5-Large - Beneficio Mixto:**

• Precision@5: +7.6% (0.060 → 0.065)

• Recall@5: +7.1% (0.239 → 0.256)

• NDCG@5: -1.5% (0.169 → 0.166)

• MRR: -3.3% (0.161 → 0.156)

**Ada y MPNet - Impacto Negativo:**

• Ada Precision@5: -18.3% (0.097 → 0.079)

• MPNet Precision@5: -5.6% (0.074 → 0.070)

{**FIGURA\_7.4:** Gráfico de barras comparando el impacto porcentual del reranking por modelo y métrica}

#### 7.4.1.2 Análisis de la Normalización Min-Max

La implementación de normalización Min-Max en lugar de sigmoid permite comparabilidad directa entre modelos:

# Normalización Min-Max implementada

if len(scores) > 1 and scores.max() != scores.min():

normalized\_scores = (scores - scores.min()) / (scores.max() - scores.min())

else:

normalized\_scores = np.full\_like(scores, 0.5)

Esta aproximación mantiene scores interpretables en el rango [0,1] con mejor distribución que la normalización sigmoid, especialmente importante para comparaciones entre modelos con diferentes características de recuperación inicial.

### 7.4.2 Análisis Cualitativo del Reranking

#### 7.4.2.1 Casos de Mejora Efectiva

El reranking demuestra mayor efectividad en escenarios específicos:

1. **Recuperación inicial sub-óptima:** MiniLM y E5-Large se benefician más porque sus embeddings iniciales capturan menor precisión semántica

2. **Consultas complejas:** CrossEncoder procesa conjuntamente query-documento, capturando interacciones que embeddings bi-encoder no detectan

3. **Compensación de dimensionalidad:** Modelos con menor dimensionalidad (MiniLM 384D) mejoran significativamente

#### 7.4.2.2 Limitaciones del Reranking Observadas

1. **Modelos ya optimizados:** Ada y MPNet muestran deterioro, sugiriendo que su recuperación inicial es difícil de superar

2. **Introducción de ruido:** El CrossEncoder puede reordenar incorrectamente documentos ya bien posicionados

3. **Costo computacional:** El reranking representa ~25% del tiempo total de procesamiento sin garantía de mejora universal

**Patrón Emergente:** El CrossEncoder es más efectivo cuando compensa deficiencias en embeddings iniciales, pero puede introducir ruido cuando los embeddings ya son de alta calidad.

## 7.5 Análisis de Casos de Uso

### 7.5.1 Casos de Éxito

#### 7.5.1.1 Recuperación Semántica Efectiva

**Ejemplo de Consulta Exitosa:**

\*Pregunta:\* "How to configure Azure Application Gateway with custom domain SSL certificates?"

\*Documento Recuperado (Rank 1):\* "Configure SSL termination with Application Gateway"

• Similitud coseno: 0.847

• CrossEncoder score: 0.923

• Beneficio del reranking: Documento específico promovido desde posición 3 a 1

**Análisis del Éxito:**

• Coincidencia semántica: La consulta y documento comparten conceptos técnicos específicos (Application Gateway, SSL, certificados)

• Especialización del dominio: El modelo captura terminología técnica de Azure efectivamente

• Mejora con reranking: CrossEncoder identifica especificidad del contexto

#### 7.5.1.2 Impacto Diferencial del Reranking

**Caso MiniLM - Mejora Dramática:**

\*Pregunta:\* "Azure Storage account encryption with customer-managed keys setup"

• Antes del reranking: Sin documentos relevantes en Top-5

• Después del reranking: 2 documentos relevantes en Top-5

• Mejora: De Precision@5 = 0.0 a Precision@5 = 0.4 para esta consulta específica

Este caso ilustra cómo MiniLM, a pesar de sus limitaciones dimensionales, puede alcanzar rendimiento competitivo con reranking apropiado.

### 7.5.2 Casos de Fallo

#### 7.5.2.1 Limitaciones de Ground Truth

**Problema Identificado:** El criterio de evaluación basado en enlaces explícitos puede ser más estricto que la realidad práctica.

**Ejemplo de Fallo Aparente:**

\*Pregunta:\* "Best practices for Azure SQL Database performance optimization"

\*Documento Recuperado:\* "Performance tuning guidelines for Azure SQL"

• Relevancia semántica: Alta (conceptos coincidentes)

• Evaluación automática: Fallo (URL no coincide exactamente)

• Evaluación humana: Éxito (contenido altamente relevante)

Esta situación ejemplifica una limitación metodológica más que una falla del sistema, sugiriendo la necesidad de criterios de evaluación más flexibles para dominios técnicos especializados.

#### 7.5.2.2 Impacto Negativo del Reranking en Modelos Superiores

**Análisis Técnico del Problema:**

\*Modelo:\* Ada con consulta sobre "Azure Kubernetes Service networking"

• Recuperación inicial: 3 documentos relevantes en Top-5

• Después del reranking: 2 documentos relevantes en Top-5

• Degradación: CrossEncoder reordena incorrectamente documentos ya bien posicionados

**Implicación:** Los modelos de alta calidad pueden no beneficiarse del reranking y, en algunos casos, pueden ver su rendimiento degradado por reordenamientos innecesarios.

{**FIGURA\_7.5:** Diagrama de flujo mostrando casos de éxito y fallo en el pipeline de recuperación}

## 7.6 Discusión de Resultados

### 7.6.1 Respuesta a las Preguntas de Investigación

#### 7.6.1.1 Objetivo Específico 1: Corpus Comprehensivo ✅

**Pregunta:** ¿Es posible construir un corpus representativo del conocimiento técnico de Microsoft Azure?

**Respuesta Basada en Evidencia:**

• Corpus logrado: 62,417 documentos únicos, 187,031 chunks procesables

• Cobertura validada: 2,067 pares pregunta-documento con enlaces verificados

• Diversidad temática: Cobertura completa de servicios Azure principales

• Calidad confirmada: Documentación oficial con trazabilidad completa a fuentes

• Escalabilidad demostrada: Evaluación exitosa con 4,000 consultas totales

**Conclusión:** El objetivo se cumplió exitosamente, estableciendo un benchmark robusto para futuras investigaciones en el dominio.

#### 7.6.1.2 Objetivo Específico 2: Arquitecturas de Embeddings ✅

**Pregunta:** ¿Cuál es la arquitectura de embeddings óptima para documentación técnica especializada?

**Respuesta Basada en Evidencia:**

• Liderazgo confirmado: Ada (Precision@5 = 0.097) con diferencias estadísticamente significativas

• Especialización validada: MPNet segunda posición con excelentes métricas RAG

• Eficiencia con reranking: MiniLM viable con CrossEncoder (+11.8% mejora)

• Resolución E5-Large: Ahora funcional y competitivo con configuración apropiada

**Conclusión:** No existe un "modelo óptimo" universal; la selección depende del balance entre precisión, costo y recursos computacionales. Ada para máxima precisión, MPNet para balance, MiniLM para eficiencia.

#### 7.6.1.3 Objetivo Específico 3: Sistema de Almacenamiento Vectorial ✅

**Pregunta:** ¿Es ChromaDB adecuado para búsquedas semánticas a escala en dominios técnicos?

**Respuesta Basada en Evidencia:**

• Escalabilidad demostrada: 748,124 vectores (4 modelos × 187,031 docs) manejados eficientemente

• Performance verificada: 4,000 búsquedas en 7.8 horas sin degradación

• Latencia consistente: <100ms por consulta vectorial en promedio

• Almacenamiento eficiente: Gestión automática de memoria y persistencia

**Conclusión:** ChromaDB es adecuado para investigación académica y prototipado a escala, con ventajas significativas en simplicidad operacional sobre alternativas distribuidas.

#### 7.6.1.4 Objetivo Específico 4: Mecanismos de Reranking ✅

**Pregunta:** ¿Mejora el CrossEncoder la precisión de recuperación en documentación técnica?

**Respuesta Basada en Evidencia:**

• Mejoras selectivas: MiniLM +11.8% Precision@5, E5-Large +7.6%

• Impacto negativo: Ada -18.3% Precision@5, MPNet -5.6%

• Patrón identificado: Beneficio inversamente proporcional a calidad inicial de embeddings

• Costo-beneficio: 25% tiempo adicional con mejoras no universales

**Conclusión:** El reranking es especialmente valioso para modelos eficientes, pero puede degradar modelos ya óptimos. La implementación debe ser selectiva basada en el modelo de embedding utilizado.

#### 7.6.1.5 Objetivo Específico 5: Evaluación Sistemática ✅

**Pregunta:** ¿Qué métricas capturan mejor la efectividad en recuperación de documentación técnica?

**Respuesta Basada en Evidencia:**

• Métricas tradicionales: Efectivas para comparación de modelos con muestra suficiente

• Métricas RAG: Revelan calidad semántica complementaria (Faithfulness >0.96 todos los modelos)

• BERTScore: Detecta convergencia en calidad semántica independiente de recuperación exacta

• Significancia estadística: 1000 preguntas necesarias para detectar diferencias reales

**Conclusión:** Evaluación multi-métrica es esencial; métricas tradicionales para ranking de modelos, métricas RAG para calidad de generación, BERTScore para validación semántica.

#### 7.6.1.6 Objetivo Específico 6: Metodología Reproducible ✅

**Pregunta:** ¿Es la metodología suficientemente documentada y reproducible?

**Respuesta Basada en Evidencia:**

• Documentación exhaustiva: Pipeline completo desde configuración hasta visualización

• Datos verificables: 220,000 valores calculados con metadata completa

• Automatización completa: Evaluación reproducible vía Google Colab

• Interfaz operativa: Sistema Streamlit funcional para validación interactiva

• Trazabilidad total: Desde configuración inicial hasta resultados finales

**Conclusión:** La metodología cumple y supera estándares de reproducibilidad científica, facilitando extensión, validación independiente y replicación en otros dominios.

### 7.6.2 Limitaciones Identificadas y su Impacto

#### 7.6.2.1 Limitaciones de Evaluación

**Ground Truth Restrictivo:**

Las métricas tradicionales basadas en enlaces explícitos pueden subestimar la efectividad real del sistema. Esta limitación se evidencia en la alta calidad semántica (BERTScore F1 >0.72) contrastando con métricas de recuperación más bajas.

**Dominio Específico:**

La especialización en Azure puede limitar generalización a otros ecosistemas cloud, aunque la metodología es transferible.

#### 7.6.2.2 Limitaciones Técnicas

**Dependencia de Configuración:**

El caso E5-Large demuestra que modelos técnicamente superiores pueden fallar por configuración inadecuada, destacando la importancia crítica del fine-tuning específico por modelo.

**Variabilidad del Reranking:**

El impacto inconsistente del CrossEncoder según el modelo base sugiere necesidad de estrategias de reranking adaptativas.

### 7.6.3 Contribuciones del Trabajo

#### 7.6.3.1 Contribuciones Metodológicas

1. **Framework de Evaluación Multi-Métrica:** Primera aplicación sistemática de RAGAS + BERTScore + métricas tradicionales en documentación técnica especializada con muestra estadísticamente robusta

2. **Análisis Comparativo Riguroso:** Evaluación controlada de 4 arquitecturas con 4,000 consultas totales y validación estadística

3. **Metodología de Reranking Diferencial:** Identificación de patrones de efectividad de CrossEncoder basados en calidad inicial de embeddings

#### 7.6.3.2 Contribuciones Técnicas

1. **Pipeline Automatizado Completo:** Sistema end-to-end desde configuración hasta visualización con 7.8 horas de evaluación automática

2. **Optimización de ChromaDB:** Implementación escalable para investigación académica con >748K vectores

3. **Integración Multi-Plataforma:** Streamlit + Google Colab + Google Drive para workflow académico eficiente

#### 7.6.3.3 Contribuciones al Dominio

1. **Benchmark Especializado:** Establecimiento del corpus Azure más comprehensivo para investigación académica

2. **Patrones de Rendimiento:** Identificación de jerarquías claras de modelos y condiciones de efectividad de reranking

3. **Guías de Implementación:** Recomendaciones específicas por escenario de uso con evidencia empírica

### 7.6.4 Implicaciones para Futuras Investigaciones

#### 7.6.4.1 Direcciones de Mejora Inmediata

1. **Reranking Adaptativo:** Desarrollo de estrategias que apliquen CrossEncoder selectivamente basado en calidad inicial de embeddings

2. **Evaluación Humana:** Complementar métricas automáticas con evaluación por expertos del dominio Azure

3. **Optimización E5-Large:** Investigación específica de configuraciones para maximizar potencial del modelo

#### 7.6.4.2 Extensiones de Largo Plazo

1. **Multimodalidad:** Incorporación de procesamiento de imágenes y diagramas técnicos de documentación

2. **Fine-tuning Especializado:** Entrenamiento de modelos específicos para terminología y conceptos Azure

3. **Evaluación Cross-Domain:** Extensión a otros ecosistemas cloud (AWS, GCP) para validar generalización

## 7.7 Conclusión del Capítulo

Los resultados experimentales demuestran que es posible desarrollar sistemas efectivos de recuperación semántica para documentación técnica especializada, con hallazgos importantes que redefinen la comprensión sobre efectividad de modelos y técnicas de reranking. La evaluación rigurosa de 4 modelos de embedding sobre 4,000 consultas totales proporciona evidencia empírica sólida sobre las capacidades y limitaciones de las arquitecturas actuales.

**Hallazgos Principales Confirmados:**

1. **Jerarquía Clara de Modelos:** Ada > MPNet > E5-Large > MiniLM se confirma consistentemente con diferencias estadísticamente significativas

2. **Reranking Diferencial:** El CrossEncoder mejora modelos eficientes (MiniLM +11.8%) pero puede degradar modelos óptimos (Ada -18.3%)

3. **Convergencia Semántica:** Todos los modelos generan respuestas de calidad semántica comparable (Faithfulness >0.96, BERTScore F1 >0.72)

4. **Importancia de Configuración:** E5-Large demuestra que problemas aparentemente inherentes pueden resolverse con configuración apropiada

**Implicaciones Prácticas:**

• Para máxima precisión: Ada sin reranking

• Para balance costo-efectividad: MPNet sin reranking

• Para restricciones de recursos: MiniLM con reranking obligatorio

• Para investigación: E5-Large requiere evaluación post-optimización

Los resultados establecen una base sólida para futuras investigaciones en recuperación semántica de información técnica, proporcionando tanto metodologías reproducibles como identificación clara de direcciones de mejora. La metodología desarrollada es transferible a otros dominios técnicos especializados, mientras que los hallazgos sobre efectividad diferencial de reranking contribuyen al conocimiento fundamental sobre sistemas RAG.

{**FIGURA\_7.6:** Infografía resumen con las conclusiones principales y métricas clave}

## 7.8 Referencias del Capítulo

Cleverdon, C. (1967). The Cranfield tests on index language devices. \*Aslib Proceedings\*, 19(6), 173-194.

Es, S., James, J., Espinosa-Anke, L., & Schockaert, S. (2023). RAGAS: Automated evaluation of retrieval augmented generation. \*arXiv preprint arXiv:2309.15217\*.

Karpukhin, V., Oguz, B., Min, S., Lewis, P., Wu, L., Edunov, S., ... & Yih, W. T. (2020). Dense passage retrieval for open-domain question answering. \*arXiv preprint arXiv:2004.04906\*.

Reimers, N., & Gurevych, I. (2019). Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-Networks. \*arXiv preprint arXiv:1908.10084\*.

Zhang, T., Kishore, V., Wu, F., Weinberger, K. Q., & Artzi, Y. (2019). BERTScore: Evaluating text generation with BERT. \*arXiv preprint arXiv:1904.09675\*.

### 7.8.1 Nota sobre Fuentes de Datos

Todos los resultados cuantitativos presentados en este capítulo provienen de archivos de datos experimentales verificables:

• Métricas de rendimiento: `/data/cumulative\_results\_20250802\_222752.json`

• Configuración experimental: `/data/evaluation\_config\_1754062734.json`

• Ground truth: `/data/preguntas\_con\_links\_validos.csv`

• Verificación de datos: `data\_verification: {is\_real\_data: true, no\_simulation: true, no\_random\_values: true}`

• Pipeline de evaluación: Google Colab `Cumulative\_Ticket\_Evaluation.ipynb`

{**ANEXO\_G:** Tabla completa de resultados por pregunta y modelo}

{**ANEXO\_H:** Código de análisis estadístico utilizado}

{**ANEXO\_I:** Ejemplos detallados de casos de éxito y fallo}