

TEORÍA Σ

El Principio B

Sustrato Pregeométrico Saturante y la Emergencia de la Realidad Física

Fernando Figueroa Gutiérrez

Investigador Independiente

Delicias, Chihuahua, México · Marzo 2026

fernando1986figueroa@gmail.com

Declaración de autoría: Toda la física, la lógica y el razonamiento teórico que constituyen la Teoría Σ son obra original de Fernando Figueroa Gutiérrez. La inteligencia artificial fue utilizada exclusivamente como herramienta de edición y formato; ninguna idea científica del presente documento proviene de sistemas de IA.

Resumen

La Teoría Σ postula la existencia de un sustrato fundamental pregeométrico, denotado Σ , definido exclusivamente por tres capacidades: **distinción** (estados distinguibles), **transición** (cambio causal entre estados) y **finitud relacional** (límite a la capacidad de respuesta). De la actividad colectiva de Σ emergen, como fases efectivas, el espacio, el tiempo, la materia, la energía, la gravedad y la mecánica cuántica.

El parámetro $B = \hbar G/c^3 = \ell_P^2$ codifica la finitud de Σ en el régimen geométrico. Esta única constante fundamental se manifiesta en tres regímenes: lineal (Relatividad General exacta), transición (correcciones no lineales) y saturación ($R_{\max} = 1/B$, desaparición de la métrica).

El Lagrangiano efectivo de la gravedad emergente es $f(R) = R/(1+BR)$. No es una modificación de la RG: es la expresión dinámica del principio holográfico y simultáneamente la resumación en forma cerrada de la serie EFT de la gravedad cuántica. Todos los coeficientes quedan fijados: $\alpha_n = (-\ell_P^2)^{n-1}$. Cero parámetros libres.

Las singularidades son eliminadas por construcción, reemplazadas por Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM). G , $\hbar$ y c son tres lecturas de B desde tres regímenes descriptivos distintos. Se derivan cuatro predicciones cuantitativas falsables, todas fijadas por B .

Palabras clave: *sustrato pregeométrico · principio B · $f(R)$ saturante · resumación EFT · holografía como causa · congruencia cuántica · RSGM · singularidades imposibles · predicciones falsables · constante fundamental única*

PARTE I — EL SUSTRATO Σ : DISTINCIÓN, TRANSICIÓN, FINITUD

1. Prólogo: Los gigantes que casi lo vieron

La historia de la física teórica es la historia de aproximaciones sucesivas a un único objeto que nadie nombró directamente. Cada gigante llegó, midió una cara de él, nombró lo que vio y siguió adelante.

- Max **Planck**, en 1899, calculó $\square_P = \sqrt{(\hbar G/c^3)}$ y lo registró como curiosidad matemática. No preguntó: ¿qué es este objeto?
- Jacob **Bekenstein**, en 1973, descubrió $S = k_B A / (4 \square_P^2)$. El área de Planck apareció como costo de área por bit. Bekenstein midió B sin nombrarlo.
- Stephen **Hawking**, en 1975, obtuvo $T_H = \hbar c^3 / (8\pi G M k_B)$. El mismo objeto insistiendo en ser notado.
- Gerard 't **Hooft** (1993) y Leonard **Susskind** (1995) formularon el principio holográfico: información máxima acotada por el área en unidades de Planck. Cada uno midió una cara de B . Ninguno preguntó qué era B .

La pregunta que este documento responde

$B = \hbar G/c^3 = \square_P^2$ no es una cantidad derivada ni una unidad conveniente. B es la medida mínima de todo cuanto puede existir: el costo de área de una distinción en el sustrato pregeométrico Σ . G , $\hbar$ y c no son tres constantes independientes. Son tres nombres de B , según el instrumento con que se le mide.

2. Por qué el espacio-tiempo no puede ser fundamental

Antes de postular qué existe, hay que descartar qué no puede ser fundamental. La eliminación es exhaustiva y no asume nada del sustrato.

2.1 Lo fundamental tiene que ser uno. Si existieran dos entidades fundamentales independientes, existiría algo más profundo que las conecta. La pluralidad de primordiales independientes es una contradicción en términos.

2.2 La materia y la energía no son fundamentales. $E = mc^2$. La materia es energía organizada en estados ligados. El tensor $T_{\mu\nu}$ dice densidad, flujo, tensión — no 'esto es materia'. La distinción es operacional.

2.3 El espacio-tiempo es respuesta, no contenido. En $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$, el espacio-tiempo responde al contenido material. Un objeto fundamental no responde a otra cosa.

2.4 El tiempo precede al espacio. Cuando la geometría colapsa ($C(i,j) \rightarrow 0$), el orden causal de las transiciones persiste. El tiempo como orden causal es más fundamental que el espacio métrico.

2.5 B surge de la falla, no de un postulado. Si el espacio-tiempo no es fundamental sino respuesta, tiene un límite de respuesta. B mide esa falla. Cuatro fenómenos independientes convergen en él: entropía de Bekenstein-Hawking, escala de Planck, límite de curvatura y densidad máxima de información.

2.6 Lo que queda: tres capacidades y nada más

Eliminados materia, energía y espacio-tiempo como primordiales, lo que debe existir para producir todo ello es el mínimo indispensable:

Capacidad	Significado	Ausencia implica
Distinción	Que haya diferencia entre estados $s_i \neq s_j$	Sin información, sin estructura
Transición	Que un estado pueda dar lugar a otro; costo mínimo B	Universo estático, sin tiempo
Finitud relacional	Que esa capacidad tenga un límite $\sigma_{\max} = 1/B$	Sin escala, singularidades reales

Ni una menos — faltaría algo del universo. Ni una más — se usaría estructura que Σ todavía no ha producido.

3. Postulados fundamentales

P1. Existencia de Σ
<i>Existe una entidad física fundamental, pregeométrica, con tres capacidades: (a) distinción, (b) transición, (c) finitud relacional codificada por B. Σ no es un campo, ni una partícula, ni cuántico, ni geométrico. Cualquier atributo adicional sería una proyección ilegítima de estructuras que Σ debe generar.</i>
P2. Emergencia del espacio-tiempo
<i>El espacio-tiempo es una descripción efectiva emergente de la respuesta colectiva de Σ en el régimen de baja intensidad. No es fundamental.</i>
P3. Saturación
<i>Existe un límite físico a la curvatura emergente: $R_{\max} = 1/B$. Este límite no es una condición de frontera impuesta: es consecuencia directa de la finitud relacional.</i>
P4. Conservación de causalidad e información

La dinámica subyacente de Σ es causal y no permite la destrucción fundamental de información.

P5. Correspondencia con la RG

Para $BR \approx 1$, las ecuaciones de la geometría emergente reproducen la Relatividad General exactamente, sin correcciones residuales.

4. Ontología de Σ : Las tres capacidades primitivas

4.1 Distinción

Distinción significa que existen estados $s_i \neq s_j$ en Σ . Es binaria: no introduce escala. Un estado distinguible de otro no requiere número — requiere diferencia. Por tanto, la distinción sola no fija B.

4.2 Transición

Transición significa que existe un mapa causal $t_{ij}: s_i \rightarrow s_j$. Cada transición tiene un costo mínimo finito B. Este costo no puede ser cero (sin costo no hay distinción entre 'cambiar' y 'permanecer') ni infinito (sin transición no hay dinámica). Por tanto la transición fija B.

4.3 Finitud relacional

Finitud relacional significa que la densidad máxima de excitación del sustrato es $\sigma_{\max} = 1/B$. Sin este techo, el sustrato podría almacenar información infinita en un punto: las singularidades serían reales. Con el techo, son imposibles por construcción.

4.4 Reducción ontológica: de tres capacidades a un único parámetro

Las tres capacidades son manifestaciones de una única estructura física:

Capacidad	Descripción	Req. B
Distinción	Binaria. No introduce escala.	No
Transición	Toda transición requiere costo finito B.	Sí $\rightarrow$ B
Finitud relacional	$\sigma_{\max} = 1/B$. Techo = recíproco del piso.	Sí $\rightarrow 1/B$

Teorema de reducción ontológica

Si existieran dos escalas independientes B_1 (costo mínimo) y B_2 (techo de finitud) con $B_1 \neq 1/B_2$, existirían dos constantes fundamentales distintas, contradiciendo P1. La reciprocidad $B_2 = 1/B_1$ es obligada, y la identificación $B_1 = B$ forzosa. Conclusión: $\Sigma \rightarrow B \rightarrow \{\text{distinción, transición, finitud}\}$. Una condición lógica. Un parámetro autodual. Tres capacidades, un parámetro, cero grados de libertad adicionales.

4.5 Corolario geométrico: la autodualidad de B implica D = 3

B actúa simultáneamente como área mínima (piso de transición) e inverso de curvatura máxima (techo de finitud):

$$[B]_{\text{piso}} = \square^2 \text{ (área mínima de transición)} \quad [B]_{\text{techo}} = [R_{\max}]^{-1} = \square^{-2}$$

Para que ambas lecturas sean dimensionalmente consistentes con una única escala, B debe tener dimensiones de área. El coeficiente de consistencia de la saturación holográfica en D dimensiones espaciales es:

$$c_D = \pi^{D-3} p / 4 \quad D = 3 \text{ (único valor finito y } O(1))$$

Para $D < 3$: $c_D \rightarrow \infty$. Para $D > 3$: $c_D \rightarrow 0$. Solo $D = 3$ permite saturación holográfica consistente.

Teorema de dimensionalidad

La autodualidad de B —actuando simultáneamente como área mínima e inverso de curvatura máxima— selecciona $D = 3$ como la única dimensionalidad espacial en la que la entropía máxima es un observable físico bien definido e independiente del cutoff UV. La entropía de Bekenstein-Hawking, la dimensionalidad 3+1 y el Lagrangiano $f(R) = R/(1+BR)$ son corolarios de B .

PARTE II — EL PARÁMETRO B: LA ÚNICA CONSTANTE FUNDAMENTAL

5. Naturaleza física y valor de B

B tiene dimensiones de área y representa el costo areal de sostener un bit de información en el sustrato Σ :

$$S = A / (4\ell_p^2) = A / (4B) \approx \Delta A (1 \text{ bit}) = 4B \ln 2$$

La cadena completa:

$$\text{Distinción en } \Sigma \approx \text{costo areal finito} \approx B = \ell_p^2 = \hbar G / c^3$$

5.1 Una sola constante fundamental

Si B es el parámetro primario y $B = \hbar G / c^3$, entonces G, $\hbar$ y c no son tres constantes independientes. Son tres lecturas de B desde tres regímenes descriptivos distintos:

$$G = Bc^3/\hbar \text{ (gravitacional)} \quad \hbar = Bc^3/G \text{ (cuántico)} \quad c = (\hbar G/B)^{1/3} \text{ (relativista)}$$

Constante	Régimen	Cara de B
G	Gravitacional	$Bc^3/\hbar$
$\hbar$	Cuántico	Bc^3/G
c	Relativista	$(\hbar G/B)^{1/3}$
k_B	Termodinámico	Proyección de B
ℓ_p	Mínimo geométrico	$\sqrt{B}$
t_p	Mínimo temporal	$\sqrt{B}/c$
E_p	Máximo energético	$\hbar c/\sqrt{B}$

5.2 Por qué $B = 0$ y $B = \infty$ son ambos imposibles

$B = 0$ eliminaría la distinción (costo nulo = no hay distinción entre 'cambiar' y 'permanecer'). $B = \infty$ eliminaría la transición (costo infinito = nada puede cambiar). La existencia del universo requiere estrictamente $0 < B < \infty$.

5.3 B como límite universal simultáneo

Régimen	Cota	Contenido físico
Geométrico	$R \leq 1/B$	Curvatura máxima
Informacional	$S \leq A/4B$	Capacidad holográfica
Energético	$\rho \leq 1/B$	Densidad máxima

6. Emergencia de la signatura 3+1: los tres argumentos

6.1 Derivación del límite holográfico

En D dimensiones espaciales, el número de grados de libertad en un volumen crece como r^D , mientras que en la superficie frontera crece como r^{D-1} . En régimen de saturación:

$$S_{\max} = k_B \cdot A / (4B)$$

La constante $1/4$ no se elige: se fija por consistencia con la termodinámica de Bekenstein-Hawking (Argumento 2).

6.2 Argumento 1 — Independencia UV

En TCC, la entropía de entrelazamiento en D dimensiones presenta divergencias UV: $S_{EE} \sim A/\varepsilon^{D-2}$. En la Teoría Σ , $\varepsilon = \square_p = \sqrt{B}$ es escala física del sustrato, no artefacto de regularización. La condición de consistencia:

$$A/\square_p^{D-2} = A/(4\square_p^2) \square c_D = \square^{D-3}_p/4$$

$D = 3$ es la única dimensionalidad donde c_D es adimensional y $O(1)$. Los argumentos 1 y 2 se imponen simultáneamente como sistema.

6.3 Argumento 2 — Normalización holográfica

El límite holográfico general es $S_{\max} = \alpha A/B$. La condición de consistencia con la termodinámica de Bekenstein-Hawking determina únicamente $\alpha = 1/4$.

Nota sobre el factor 1/4: Este coeficiente no tiene origen combinatorio local en la red de percolación. En Sigma-Sim, la entropía de Shannon por nodo en saturación converge a $I_{\max} = 1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits/nodo, valor que difiere de 0.25 por factores de π y $\ln 2$ provenientes de (a) conversión nat/bit, (b) geometría esférica del horizonte en coordenadas de Schwarzschild, (c) efectos de tamaño finito $O(1/N)$. Lo que Sigma-Sim verifica es la estructura: $S_{\max} \propto A$, alcanzando su máximo exactamente en $\sigma = \sigma_c$. La normalización $1/4$ es fijada por consistencia gravitacional, no por conteo de nodos. Esto no es una analogía: es un límite efectivo.

6.4 Argumento 3 — Unicidad dinámica del tiempo

Las transiciones de Σ definen un orden parcial estricto (transitivo, antisimétrico, irreflexivo). El teorema de Szpilrajn garantiza que existen múltiples extensiones lineales compatibles. La reducción a una única extensión física no proviene de la antisimetría por sí sola, sino de la finitud de capacidad del sustrato. Cada transición t_{ij} tiene costo mínimo $B > 0$, lo que impone:

$$dS_{\Sigma}/d\tau \geq 0$$

donde S_{Σ} es la entropía de distinción del sustrato: la medida de cuántas distinciones distinguibles se han generado en la evolución.

Una extensión lineal que violara esta condición requeriría transiciones de costo negativo, incompatibles con $B > 0$. La clase de extensiones físicamente admisibles define una flecha del tiempo efectiva, única en soluciones genéricas.

Precisión sobre la selección de la flecha del tiempo. La selección de la extensión lineal no proviene de la antisimetría del orden causal (eso solo reduce las opciones pero no a una única). El criterio de selección es la finitud de capacidad: la entropía de distinción S_Σ no puede disminuir porque cada transición cuesta $B > 0$. Solo la dirección que hace crecer S_Σ es compatible con la saturación. La segunda ley de la termodinámica no es un postulado independiente en la Teoría Σ : es la expresión macroscópica de la condición de consistencia $dS_\Sigma/d\tau \geq 0$. La irreversibilidad no proviene de maximizar entropía, sino de la imposibilidad de decrecer: un sustrato con B finito no puede 'desaprender' distinciones a costo negativo.

Argu mento	Condición	Mecanismo	Resultado
1	Saturación UV-independiente	$c_D = \square^{D-3}_p/4$	$D = 3$
2	Normalización holográfica	$\alpha = 1/4$ (consistencia BH)	$S = A/4B$
3	Orden causal + finitud $B > 0$	Szpilrajn + $dS_\Sigma/d\tau \geq 0$	$D_t = 1$

Resultado: $D_{\text{espacial}} = 3, D_{\text{temporal}} = 1 \Rightarrow$ signatura $(-, +, +, +)$. La signatura 3+1 emerge como la única compatible con la saturación física del sustrato Σ . La derivación no es circular: $S = A/4B$ pasa de ser premisa a ser corolario.

PARTE III — EMERGENCIA: CÓMO SURGE LA GEOMETRÍA

7. La ley constitutiva saturante

7.1 Derivación exacta

La relación entre la densidad de excitación del sustrato ρ_Σ y la curvatura escalar emergente R debe satisfacer dos condiciones de contorno obligatorias:

$$R \rightarrow \rho_\Sigma \text{ cuando } \rho_\Sigma \rightarrow 0 \text{ (régimen RG, P5)}$$

$$R \rightarrow 1/B \text{ cuando } \rho_\Sigma \rightarrow \infty \text{ (saturación, P3)}$$

La única función monótona acotada que satisface ambas es:

$$R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma / (1 + B\rho_\Sigma)$$

Diferenciando: $dR/d\rho = 1/(1+B\rho)^2$. La función de respuesta $f'(R) = 1/(1+BR)^2$. Integrando con $f(0) = 0$:

$$f(R) = \int_0^R dt/(1+Bt)^2 = R/(1+BR)$$

Resultado exacto: No se realizó ninguna aproximación. $f(R) = R/(1+BR)$ es la única solución con $f(0) = 0$ de la ecuación diferencial saturante $f'(R) = (1 - Bf(R))^2$.

7.2 Las cinco condiciones de unicidad

$f(R) = R/(1+BR)$ es la única función analítica que satisface simultáneamente:

Condición	Valor	Contenido físico
1. $f(0) = 0$	Exacto	Sin Λ estructural; P5
2. $f'(0) = 1$	Exacto	RG recuperada exactamente
3. $\lim_{R \rightarrow \infty} f(R) = 1/B$	Exacto	Saturación holográfica; P3
4. $f'(R) > 0 \forall R$	Exacto	Sin fantasmas cinéticos
5. $f''(R) < 0 \forall R$	Exacto	Saturación monótona; sin taquión

La condición 4 proviene directamente de la autodualidad de B : la función depende exclusivamente de la combinación adimensional BR . Cualquier función que introdujera un parámetro adicional $\lambda \neq B$ violaría la reducción ontológica del §4.4. La condición 5 garantiza que la expansión de Taylor de $f(R)$ es una serie geométrica con razón constante $-B$.

7.3 Acción efectiva y ecuaciones de campo

$$S = (1/16\pi G) \int d^4x \sqrt{-g} f(R) + S_{\text{mat}}$$

$$f'(R)R_{\mu\nu} - (1/2)f(R)g_{\mu\nu} - (\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square) f'(R) = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Para $BR \ll 1$: ecuaciones de Einstein exactas. En $R = 1/B$: $f' = 0$, no hay singularidad.

VERIFICACIÓN 1 — DINÁMICA BIEN PUESTA: NO-FANTASMAS

8. Estabilidad dinámica completa

Esta sección cierra el primer flanco técnico: demostrar que las ecuaciones de campo son bien puestas, sin fantasmas, sin taquiones, y que el congelamiento del modo escalar en saturación no introduce patologías.

8.1 Ausencia de fantasma: $f'(R) > 0$ en todo el dominio físico

En las teorías $f(R)$, el grado de libertad escalar tiene energía cinética positiva si y solo si $f'(R) > 0$. Para $f(R) = R/(1+BR)$:

$$f'(R) = 1/(1+BR)^2 > 0 \text{ para todo } R \in [0, 1/B)$$

El dominio físico del sustrato es exactamente $R \in [0, 1/B)$ — la curvatura nunca alcanza $R = 1/B$ en una región de volumen finito. En ese dominio, $f'(R) > 0$ estrictamente. No hay fantasma.

8.2 Ausencia de inestabilidad de Ostrogradski

La inestabilidad de Ostrogradski afecta a teorías con derivadas de orden ≥ 3 . Las teorías $f(R)$ son equivalentes (vía transformación de Legendre) a una teoría escalar-tensorial de segundo orden: relatividad general acoplada a un campo escalar $\phi = f'(R)$. La condición de ausencia de Ostrogradski es $f'(R) \neq 0$, que se satisface en todo el dominio físico.

8.3 Masa del modo escalar: sin taquión

La masa cuadrada del modo escalar en torno a un fondo de curvatura R_0 en el marco de Jordan es:

$$m_s^2(R_0) = [f'(R_0) - R_0 f''(R_0)] / [3f''(R_0)]$$

Para $f(R) = R/(1+BR)$, con $f'(R) = (1+BR)^{-2}$ y $f''(R) = -2B(1+BR)^{-3}$:

$$f'(R) - R f''(R) = (1+BR)^{-2} + 2BR(1+BR)^{-3} = (1+3BR)/(1+BR)^3$$

$$m_s^2(R_0) = (1+3BR_0) / [-6B(1+BR_0)^{-1} \dots] \rightarrow m_s^2(0) = 1/(6B) > 0$$

En el vacío ($R_0 = 0$): $m_s^2 = 1/(6B) = c^3/(6\hbar G) > 0$. El modo es masivo y estable. No hay taquión.

8.4 Congelamiento del modo escalar en saturación: sin patología

A medida que $R \rightarrow 1/B$, $f'(R) \rightarrow 0$ y $f''(R) \rightarrow 0$. En el marco de Einstein, el campo escalar $\phi = f'(R) \rightarrow 0$ y su potencial $V(\phi) \rightarrow \text{constante}$. El modo escalar se congela en este límite.

La pregunta técnica crítica es: ¿este congelamiento constituye un modo gauge o una patología dinámica? La respuesta es ninguna de las dos.

El congelamiento ocurre en el límite $R \rightarrow 1/B$, que corresponde al límite del dominio físico del sustrato. En ese límite, $\delta\Sigma \rightarrow 0$: el sustrato ha agotado su capacidad de distinción. No quedan grados de libertad físicamente resolubles — no porque se hayan acoplado a otra cosa, sino porque el sustrato no puede sostener más variaciones. El modo escalar no se convierte en modo gauge: desaparece del espectro físico junto con todos los demás grados de libertad geométricos, porque la geometría misma deja de existir como descripción efectiva.

Checklist de estabilidad dinámica:

- $\square f(R) > 0$ para todo $R \in [0, 1/B) \rightarrow$ sin fantasma cinético
- $\square f(R) \neq 0$ en el dominio físico $\rightarrow$ sin inestabilidad de Ostrogradski
- $\square m_s^2(0) = 1/(6B) > 0 \rightarrow$ sin taquión
- $\square$ Sistema hiperbólico para $BR < 1 \rightarrow$ causalidad bien definida
- $\square$ Congelamiento en $R \rightarrow 1/B =$ límite del dominio físico, no una patología del interior del dominio
- $\square$ Dominio de validez de la descripción geométrica: $BR < 1$ (explícitamente acotado)

8.5 Acoplamiento materia-geometría en el régimen saturado

Un campo escalar de prueba ϕ en el fondo RSGM obedece:

$$\square_g \phi - m^2 \phi = 0$$

donde $g_{\mu\nu}$ es la métrica regular de la RSGM. Dado que la geometría es suave y no presenta singularidades, el operador $\square_g$ permanece hiperbólico en todo el dominio $r \geq r_{\text{sat}}$, garantizando propagación causal y ausencia de modos superlumínicos.

La saturación actúa como un corte efectivo: modos con longitud de onda menor que $\lambda_p = \sqrt{B}$ no son distinguibles en el sustrato. Esto impone una cota sobre las excitaciones de materia:

$$m_{\text{efect}}^2 \lesssim 1/B = R_{\text{max}}$$

El modo escalar masivo del sector gravitacional tiene $m^2 = 1/(6B) \approx 0.17/B$, bien por debajo de la cota, consistente con su resolubilidad.

VERIFICACIÓN 2 — SHANNON → BEKENSTEIN-HAWKING: SIN SALTO LÓGICO

9. El puente entropía de distinciones → $S = A/4B$

Esta sección formaliza el puente entre la entropía de Shannon de distinciones en Σ y la entropía de Bekenstein-Hawking. El resultado no es una analogía: es un límite efectivo.

9.1 La entropía de distinción en Σ

Sea $S_\Sigma = -k_B \sum_i p_i \ln p_i$ la entropía de Shannon de la distribución de microestados del sustrato, donde p_i es la probabilidad de que el sustrato se encuentre en el microestado de distinción i .

S_Σ no es entropía de entrelazamiento cuántico en ningún sentido directo. Es una medida de cuánta información se necesita para especificar el estado de distinción del sustrato. Esta distinción es deliberada: Sigma-Sim es evidencia corroborativa, no una derivación cuántica desde primeros principios.

9.2 El límite geométrico: coarse-graining sobre las distinciones

En el límite en que el sustrato Σ admite una descripción geométrica (régimen BR $\gg 1$), los microestados de distinción se agrupan en celdas de área $B = \ell_P^2$ en la frontera de una región. El número de celdas en la frontera de un área A es:

$$N_{\text{celdas}} = A / (4B) \quad (\text{el factor 4 proviene de la geometría de Schwarzschild y la normalización de Bekenstein-Hawking})$$

Si cada celda puede estar en dos estados de distinción (on/off), el número de microestados es $\Omega = 2^{N_{\text{celdas}}}$, y:

$$S_\Sigma^{\text{geom}} = k_B \ln \Omega = k_B (A/4B) \ln 2$$

Con la normalización estándar (unidades naturales $k_B = 1$ y factor de área del formalismo de Wald), esto reproduce exactamente:

$$S_{\text{BH}} = A / (4G) = A / (4B \cdot c^3/\hbar) = A / (4\ell_P^2)$$

9.3 El factor 1/4: origen y estatus

El factor 1/4 no tiene origen combinatorio local en la red de percolación. Su origen es en tres capas:

Capa	Origen	Contribución al 1/4
Geométrica	Factor 4 en la relación área-radio del horizonte de Schwarzschild	Factor 4 en el denominador
Física	Normalización del funcional de Wald para teorías $f(R)$	Universal para $f(R) = R/(1+BR)$

Capa	Origen	Contribución al 1/4
Combinatoria	Estado binario por celda: $\ln 2 / \ln 2 = 1$ en unidades naturales	Absorb. en $k_B = 1$

El funcional de Wald aplicado a $f(R) = R/(1+BR)$ reproduce exactamente $S = A/4B$ para cualquier horizonte, confirmando que la normalización es interna a la teoría y no requiere ajuste externo.

9.4 Por qué no es solo una analogía

El puente es un límite efectivo, no una analogía. La entropía de Shannon de distinciones en Σ , bajo saturación ($\sigma \rightarrow \sigma_c$), satisface $S_\Sigma \propto A$ en la frontera. Este resultado es una consecuencia topológica del régimen saturado (las correlaciones internas colapsan; la única información estructural superviviente reside en los enlaces superficiales), independiente de si la entropía se define clásica o cuánticamente. El factor 1/4 es entonces el único valor compatible con la normalización gravitacional. No puede ser 1/2 ni 1/8 sin contradecir la termodinámica de Bekenstein-Hawking.

PARTE IV — COLAPSO, SATURACIÓN Y RSGM

10. Regiones de Saturación Geométrica Máxima (RSGM)

¿Qué ocurre cuando la densidad de excitación del sustrato se acerca a su límite? El colapso gravitatorio no produce singularidades: produce saturación.

10.1 Formación: cómo se llega a la saturación

En el colapso gravitatorio, cuando $R \rightarrow R_{\text{max}} = 1/B$, la respuesta de Σ se satura. La región central transita a una fase no-geométrica por transición de fase al régimen saturado. No surge por detención del colapso sino por transición de fase: el sustrato alcanza su capacidad máxima de distinción.

10.2 Estructura

Propiedad	Valor / descripción	Origen en B
Horizonte externo	$r_s = 2GM$	Idéntico al agujero negro clásico
Radio de saturación	$r_{\text{sat}} \approx 2\Box_P$	$r_{\text{sat}} \sim \sqrt{4B}$, indep. de M
Temperatura interna	$T_{\text{int}} = 0$	No hay actividad térmica interior
Temperatura de Hawking	$T_H = \kappa/(2\pi)$	Finita; sin divergencia final
Singularidad	Ausente por construcción	$R \leq 1/B$ en toda la estructura
Evaporación	Conserva información	Relajación geométrica colectiva

10.3 La métrica efectiva y su dominio de validez

$$ds^2 = -f(r)dt^2 + f(r)^{-1}dr^2 + r^2d\Omega^2$$
$$f(r) = 1 - (2GM/r)[1 - \exp(-r^2/4B)]$$

Propiedades: $f(0) = 1$ (regular en el origen); $f \rightarrow 1 - 2GM/r$ para $r \gg 2\Box_P$ (Schwarzschild exacto); $r_{\text{sat}} \approx 2\Box_P$ (universal, independiente de M).

— VERIFICACIÓN 3: Dominio geométrico vs. no-geométrico —

Distinción operativa: geometría válida vs. extensión analítica

La distinción entre regímenes físicos es precisa y operativa:

- $r > r_{\text{sat}} \approx 2r_p$: la métrica es física. Las distinciones geométricas son resolubles en Σ y la descripción en términos de variedad diferenciable es aplicable.
- $r \leq r_{\text{sat}}$: la capacidad de distinción del sustrato se agota ($\delta\Sigma \rightarrow 0$). Nociones como distancia, tiempo o curvatura dejan de tener significado operativo. No hay variedad.

La métrica en la región interior es una extensión analítica del modelo, útil para calcular observables externos (ecos), pero sin interpretación geométrica intrínseca. La regularidad de $f(0) = 1$ es propiedad de la extensión analítica, no una afirmación sobre la geometría del estado saturado.

No existe contradicción entre 'no hay geometría en el interior' y 'usamos una métrica efectiva': la geometría emerge y desaparece como descripción efectiva dependiendo del régimen de Σ . La extensión interior es válida solo para calcular observables que dependen únicamente del exterior.

Observables que dependen solo del exterior (y que por tanto son predecibles sin necesidad de la geometría interior):

- Tiempo de retardo de ecos: $\Delta t_{\text{eco}} = F(a/M) \cdot M \cdot \ln(M^2/B)$ — depende de la integral sobre $r_{\text{sat}} < r < r_{\text{ph}}$
- Temperatura de Hawking: $T_H = \kappa/(2\pi)$ — determinada por la gravedad superficial en $r_s = 2GM$
- Entropía de área: $S = A/(4B)$ — determinada por el área del horizonte externo

10.4 El horizonte como frontera de fase

El horizonte $r_h = 2GM$ es una frontera de fase: exterior ($r > r_h$): régimen elástico. Interior ($r < r_{\text{sat}}$): régimen rígido saturado, $\delta\Sigma = 0$. En $\delta\Sigma = 0$: no hay espacio, no hay tiempo, no hay vacío cuántico ni fluctuaciones. La estabilidad es la definición misma de saturación.

10.5 Termodinámica y resolución de la paradoja de la información

$$S = A/(4r_p^2) \quad , \quad T_{\text{int}} = 0 \quad , \quad T_H = \kappa/(2\pi)$$

La radiación de Hawking es relajación geométrica colectiva de la superficie saturada. Al no existir singularidad ni destrucción de información, la evaporación es un proceso unitario. La paradoja de la información se resuelve por construcción: la información no se destruye porque no hay singularidad en la que destruirla.

11. Cosmología sin singularidad inicial

11.1 El Big Bang como transición de fase

El Big Bang no es una singularidad: es la transición desde un estado pregeométrico saturado ($\sigma \sim 1/B$) a una fase de espacio-tiempo en expansión. No hay un $t = 0$ con densidad infinita. Hay un régimen saturado que, al alcanzar condiciones de relajación colectiva, desata la expansión.

$$H^2 = (8\pi G/3) \cdot \rho/(1+B\rho) - k/a^2 + (\text{términos de } \square f'_R)$$

Para $\rho \rightarrow \infty$: el término efectivo tiende a $1/B$, evitando la singularidad y produciendo expansión acelerada temprana sin campo inflatón.

11.2 Expansión acelerada sin constante cosmológica estructural

$f(0) = 0$ exactamente: no hay Λ estructural. La expansión acelerada actual emerge de los términos de corrección: $w(z) = -1 + \delta w(z; B)$, con $\delta w \neq 0$ para todo $z > 0$. Esto es una predicción falsable.

PARTE V — RELACIÓN CON LA EFT GRAVITACIONAL

12. Resumación no perturbativa de la serie EFT

$$S_{\text{EFT}} = \int d^4x \sqrt{-g} [R + \alpha_2 R^2 + \alpha_3 R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + \alpha_4 R_{\mu\nu\rho\sigma} R^{\mu\nu\rho\sigma} + \dots]$$

Esta serie es asintótica y no puede describir regímenes donde $R \rightarrow R_{\text{max}}$. La Teoría Σ no la reemplaza: establece su suma.

12.1 Identificación término a término

$$f(R) = R/(1+BR) = R \sum_{n=0}^{\infty} (-BR)^n \quad \alpha_n^{\Sigma} = (-B)^{n-1} = (-\Box^2_P)^{n-1}$$

Orden n	Operador	EFT (libre)	Teoría Σ (fijo)
1	R	1	1 (adimensional)
2	R ²	α_1 libre	$-B = -\Box_P^2$
n	R ⁿ	α_{n-1} libre	$(-B)^{n-1}$
∞	serie diverge	—	$f(R) = R/(1+BR)$ [satura en R_{max}]

12.2 Declaración de posición: reducción sectorial

Posición clara y sin ambigüedad: La Teoría Σ no modela la EFT gravitacional completa. Propone una reducción efectiva físicamente motivada donde el sustrato Σ responde a un escalar saturante. Esto es una reducción sectorial, válida en configuraciones donde simetría y supresión dinámica hacen que los invariantes tensoriales de rango superior queden efectivamente dependientes de una medida escalar de curvatura. La discrepancia en factores $(16\pi^2)^{n-1}$ es consistente y esperada: es la diferencia entre calcular el n-ésimo término de una serie asintótica (EFT perturbativa) y sumar la serie completa (Σ , resumación no perturbativa). Análogamente, Born-Infeld no reproduce los coeficientes de la QED perturbativa término a término.

12.3 Comparación con modelos f(R) existentes

Criterio	Starobinsky	Hu-Sawicki	Principio B
Forma	$R + R^2/6M^2$	$R - m^2 c_1 (R/m^2)^n / \dots$	$R/(1+BR)$
Parám. libres	1	4	0
Origen	1 bucle	Fenomenológico	Ley constitutiva
Saturación	No	No	$f \rightarrow 1/B = R_{\text{max}}$
Singularidades	No elimina	No elimina	Eliminadas (RSGM)

Criterio	Starobinsky	Hu-Sawicki	Principio B
Λ estructural	Efectiva	Efectiva	Ausente ($f(0)=0$)
Relación EFT	Solo R^2	Sin derivación	Resumación global
Ecos GW	No	No	Sí: $\Delta t = 2M \ln(M^2/B)$
Modo escalar	$m \sim M$ (libre)	Dep. par.	$m^2 = 1/(6B)$ (fijo)

Resultado central de la Parte V: Dos caminos independientes — resumación de la serie EFT y derivación desde la cota holográfica — llegan a la misma función $f(R) = R/(1+BR)$. La cota holográfica es el principio que cierra la serie EFT.

PARTE VI — CONGRUENCIA CON LA MECÁNICA CUÁNTICA

13. Congruencia estructural, no construcción

Σ no deriva la Mecánica Cuántica. No es su tarea. Lo que se establece es una congruencia estructural: las condiciones mínimas de Σ producen inevitablemente la misma arquitectura lógica que la MQ.

Σ no es una Teoría de Todo. Es una Teoría del Sustrato. Esta distinción no es una limitación: es el principio que le da coherencia interna y la hace científicamente honesta.

Resultado MQ	Origen en Σ	Estatus
Regla de Born	Única asignación consistente con B finito	Congruencia
$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$	No-conmutatividad de distinciones; $\hbar = Bc^3/G$	Congruencia
Ec. de Schrödinger	Propagador de un paso en límite continuo	Congruencia
Dirac y Klein-Gordon	Relativización de Σ ; $m^2 \sim 1/B$	Congruencia
$\hbar = Bc^3/G$	B en el régimen cuántico	Exacto

Lo que Σ establece	Lo que Σ no hace
Regla de Born como única asignación consistente	No resuelve el problema de la medición
$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$ desde no-conmutatividad	No deriva simetrías de gauge del ME
Schrödinger desde propagador de un paso	No predice masas de partículas elementales
Dirac y KG desde $\mu = 1/\sqrt{B}$	No explica las tres generaciones de fermiones
$\hbar = Bc^3/G$	No es una derivación axiomática completa

14. Ondas gravitacionales: modo tensorial y modo escalar

14.1 Modo tensorial

Velocidad $c_g = c$ exactamente. Compatible con $|c_g - c|/c < 10^{-15}$ (GW170817).

14.2 Modo escalar masivo

$$m_{fs}^2 = 1/(6B) = c^3/(6\hbar G) \quad , \quad \lambda_c = \sqrt{6} \lambda_p \approx 4 \times 10^{-35} \text{ m}$$

Produce polarización breathing (sexta polarización). En saturación ($BR \rightarrow 1$), el modo se congela — como se demostró en §8.4, este congelamiento no implica fantasma: $f'(R) > 0$ hasta el límite.

VERIFICACIÓN 4 — PREDICCIONES FALSABLES: COTAS EXPLÍCITAS

15. Cuatro predicciones observacionales con criterio de rechazo

Todas las predicciones están fijadas por $B = \varpi_p^2 = 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$. Cero parámetros libres.

15.1 Predicción 1 — Ecos gravitacionales post-fusión

$$\Delta t_{\text{eco}} = F(a/M) \cdot M \cdot \ln(M^2/B)$$

$$F(0) = 2 + 2(1-2\ln 2)/\ln(M^2/B) + O(B/M^2)$$

Objeto	$M/M_\odot$	$\ln(M^2/B)$	$F(0)$	Error (%)
Estelar típica	1	174.8	1.99780	0.110
Binaria LIGO	60	191.6	1.99799	0.101
Sgr A*	4×10^6	208.4	1.99815	0.093
Supermasiva	10^8	212.6	1.99818	0.091

Espín a/M	$F(a/M)$	Δt (10 $M_\odot$)	Δt (30 $M_\odot$)	Δt (60 $M_\odot$)
0.00	2.00	~2.9 ms	~4.4 ms	~5.8 ms
0.50	2.31	~3.4 ms	~5.0 ms	~6.7 ms
0.70	2.66	~3.9 ms	~5.8 ms	~7.7 ms
0.90	3.62	~5.3 ms	~7.9 ms	~10.5 ms
0.99	7.05	~10.2 ms	~15.3 ms	~20.4 ms

Reflectividad efectiva: la amplitud no es libre.

La capa de saturación en $r_{\text{sat}} \approx 2\varpi_p$ actúa como una superficie parcialmente reflectante. La reflectividad efectiva se estima por matching de funciones de onda en coordenada de tortuga cerca de r_{sat} :

$$R \sim (B/M^2)^\gamma, A_{\text{eco}} \sim R \cdot A_{\text{ringdown}}$$

En el límite astrofísico ($M \gg \varpi_p$):

$$R \sim \exp(-M/\varpi_p) \Rightarrow A_{\text{eco}} \propto A_{\text{ringdown}} \text{ (supresión exponencial)}$$

El exponente γ es universal: no depende de parámetros libres, sino exclusivamente de la geometría de la capa de saturación cerca de r_{sat} . Su determinación analítica exacta requiere resolver la ecuación de perturbaciones en la métrica RSGM con condiciones de contorno en r_{sat} — trabajo de segunda generación.

Implicación para la falsabilidad: La amplitud está suprimida exponencialmente en M/ϖ_p . Para LIGO/Virgo/KAGRA actuales y objetos estelares típicos, la amplitud queda muy por debajo del umbral de detección. Una no-detección en detectores actuales **no** falsifica la teoría. Una no-detección en Einstein Telescope o Cosmic Explorer para masas $M \sim 10\text{--}100 M_\odot$, con $\text{SNR} > 3\sigma$ en el rango de tiempo predicho, **sí** la falsificaría.

15.2 Predicción 2 — Modo escalar masivo

$m^2 = c^3/(6\hbar G)$. Polarización breathing detectable por Einstein Telescope y Cosmic Explorer. Criterio de rechazo: ausencia del modo breathing con $m^2 = 1/(6B)$ en un análisis de polarización completo.

15.3 Predicción 3 — Ecuación de estado de energía oscura

$$w(z) = -1 + \delta w(z; B), \quad \delta w \neq 0 \text{ para todo } z > 0$$

Medible por DESI, Euclid, Vera Rubin Observatory. Criterio de rechazo: $w(z) = -1$ exacto (sin desviación) en todo el rango $z \in [0, 2.5]$.

15.4 Predicción 4 — Impronta en el CMB a bajos multipolos

Supresión de potencia en $\ell < 10$, consistente con la anomalía observada que ΛCDM no explica. Medible por CMB-S4, LiteBIRD. Criterio de rechazo: espectro en $\ell < 10$ completamente explicado por ΛCDM sin residuos sistemáticos.

15.5 Tests del sistema solar

$\text{BR}_\odot \sim 10^{-96}$: correcciones a la RG de orden 10^{-96} . Todos los tests post-newtonianos satisfechos con márgenes > 70 órdenes de magnitud.

15.6 Condiciones explícitas de rechazo

#	Condición	Implicación
R1	Singularidad física ($R > 1/B$ verificado)	Refuta directamente la saturación
R2	Curvatura no acotada sin saturación	Refuta la ley constitutiva

#	Condición	Implicación
R3	Horizonte perfectamente absorbente	Excluye superficie reflectante y ecos
R4	Destrucción verificable de información	Contradice P4
R5	$w(z) = -1$ exacto sin desviación	Falsifica $f(0) = 0 \implies \delta w \neq 0$
R6	Ausencia modo breathing en $m^2 = 1/(6B)$	Refuta el modo escalar predicho
R7	Ausencia ecos con $\text{SNR} > 3\sigma$ (ET/CE, $M \sim 10\text{-}100 M_\odot$)	Refuta la superficie reflectante
R8	GDL geométricos no reducibles a Σ	Invalida la ontología
R9	CMB en $\ell < 10$ explicado totalmente por ΛCDM	Refuta condiciones iniciales modificadas

PARTE VII — CIERRE ESTRUCTURAL: INEVITABILIDAD

16. El Teorema de Rigidez del marco Σ

Esta sección declara explícitamente lo que el marco fija, lo que no puede modificarse sin romperlo, y cuál es la estructura de inevitabilidad. No añade contenido nuevo: convierte en inevitabilidad declarada lo que está demostrado en las secciones anteriores.

Teorema de Rigidez del Marco Σ

Dadas las condiciones:

- (i) Capacidad finita $B > 0$ (P1 — finitud relacional),
- (ii) Saturación $R_{\max} = 1/B$ (P3),
- (iii) Recuperación exacta de RG para $BR \ll 1$ (P5),

se fijan hasta equivalencias:

- La ley constitutiva $R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma / (1 + B\rho_\Sigma)$
- La forma funcional $f(R) = R / (1 + BR)$
- La escala $m_s^2 = 1/(6B)$
- Todos los coeficientes $\alpha_n = (-B)^{n-1}$
- La dimensionalidad $D = 3 + 1$
- La ley de área $S = A/(4B)$

Cualquier modificación de $f(R)$ que preserve las cinco condiciones de unicidad reproduce necesariamente $R/(1+BR)$. No existe libertad paramétrica residual.

16.1 Qué fija a qué: la cadena de inevitabilidad

Condición	Consecuencia fijada	Sección
Capacidad finita B (P1)	Ley constitutiva $R(\rho_\Sigma)$	§7.1
Saturación $R_{\max} = 1/B$ (P3)	$f(R) = R/(1+BR)$ como única función	§7.2
Recuperación exacta de RG (P5)	$f(0) = 0$ y $f'(0) = 1$ sin ajuste	§7.2
Autodualidad de B	$D = 3$ y signatura 3+1	§4.5, §6
Holografía como corolario	$S = A/4B$ con $\alpha = 1/4$	§9.3
Sin parámetros adicionales	$\alpha_n = (-B)^{n-1}$	§12.1
$f(R) > 0 \forall R$ (condición 4)	Sin fantasma; estabilidad en todo R	§8.1
$f'(R) < 0 \forall R$ (condición 5)	$m_s^2 = 1/(6B) > 0$	§8.3

16.2 Qué no puede modificarse

Elemento	Consecuencia de modificarlo
$f(R) > 0$	Introduce fantasmas cinéticos $\rightarrow$ inestabilidad
$f(0) = 0$	Introduce Λ estructural $\rightarrow$ rompe P5
$\lim f(R) = 1/B$	Elimina la saturación $\rightarrow$ rompe P3
B único y autodual	Introduce segunda escala $\rightarrow$ rompe P1 (dos constantes)
$D = 3$ espacial	c_D no finito ni $O(1) \rightarrow$ no hay saturación consistente
$1/4$ en $S = A/4B$	Viola la termodinámica de Bekenstein-Hawking

16.3 Tabla de congruencias estructurales

Resultado	Origen en Σ	Estatus
$f(R) = R/(1+BR)$	Integración exacta de la ley constitutiva	Demostración exacta
Unicidad de $f(R)$	5 condiciones simultáneas	Demostración exacta
$D = 3 + 1$	Autodualidad de B + 3 argumentos	Demostración exacta
$S = A/4B$	Holografía como corolario	Demostración exacta
$m_s^2 = 1/6B$	$f' < 0$ en vacío	Demostración exacta
Reducción EFT a $f(R)$	Isotropía de Σ en saturación	Hipótesis constitutiva
Factores $(16\pi^2)^{n-1}$	Perturbativo vs. no perturbativo	Rasgo esperado
Regla de Born	Única asignación con B finito	Congruencia estructural
$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar$	No-conmutatividad de distinciones	Congruencia estructural
Schrödinger	Propagador de un paso	Congruencia estructural
Dirac y KG	Relativización de Σ	Congruencia estructural
$\hbar = Bc^3/G$	B en el régimen cuántico	Demostración exacta

PARTE VIII — EVIDENCIA COMPUTACIONAL: SIGMA-SIM

17. Los tres regímenes emergentes

Estatus epistemológico: Las simulaciones son evidencia corroborativa, no derivaciones desde primeros principios. Su valor reside en que la maquinaria matemática central genera el comportamiento predicho desde un único ingrediente: $C(i,j) = \exp(-\sigma \cdot d_{ij})$.

Régimen	Condición	Observable en Sigma-Sim	Correspondencia física
Lineal	$\sigma \ll \sigma_c$	Componente gigante $\approx 100\%$	RG válida, $BR \ll 1$
Crítico	$\sigma \approx \sigma_c$	Pico de 2ª componente, ecos emergentes	Frontera de fase, $R \rightarrow R_{\max}$
Saturación	$\sigma \gg \sigma_c$	Fragmentación completa	Interior RSGM, $\delta\Sigma = 0$

El punto crítico $\sigma_c = \ln(2) \cdot N$ no fue elegido a priori: es consecuencia directa de $C(i,j)$ con umbral $C > 0.5$.

17.1 Verificación cuantitativa

Observable	Predicción analítica	Simulación	Acuerdo
Punto crítico σ_c	$\ln(2) \cdot N = 138.6$	138.6 ± 0.2	99.9%
$I_{\max}$	$1/(8\pi \ln 2) \approx 0.057$ bits	0.065 ± 0.003 bits	86%†
Separación de ecos Δt	~ 4 u.t.	3.9 ± 0.4 u.t.	97%
Decaimiento de amplitud	$e^{-0.65n}$	$e^{-(0.63 \pm 0.04)n}$	97%
Dimensión espectral D_s	$D_s \rightarrow 3$	2.98 ± 0.05	99%
Divergencia C_v, χ	Simultánea en σ_c	Confirmada	100%

† El 86% de acuerdo para $I_{\max}$ no es un desacuerdo físico. La discrepancia se debe a diferencias de definición: (a) factor $\ln 2$ de conversión nat/bit; (b) factor 8π de la geometría esférica del horizonte en coordenadas de Schwarzschild; (c) efectos de tamaño finito $O(1/N)$. Lo que la simulación verifica es la estructura: $S_{\max} \propto A$, con máximo en $\sigma = \sigma_c$.

17.2 El exponente de decaimiento de ecos: universal o dependiente de N

El decaimiento entre ecos consecutivos observado en Sigma-Sim es $e^{-(0.63 \pm 0.04)n}$, compatible con la predicción analítica $e^{-0.65n}$. La pregunta de si este exponente es universal o depende de N tiene respuesta clara:

En el límite continuo ($N \rightarrow \infty$), el exponente converge al valor analítico $\gamma = 0.65$, que está determinado por la geometría del potencial efectivo en la zona de transición $r_{\text{sat}} < r < r_{\text{ph}}$. El exponente no depende de N en el límite termodinámico. Las fluctuaciones observadas (± 0.04) son efectos de tamaño finito que decaen como $1/\sqrt{N}$.

PARTE IX — CONTEXTO, ALCANCE Y PROBLEMAS ABIERTOS

18. Comparación con otros programas de investigación

Programa	Supuesto principal	Singul.?	Info.?	Predicciones
RG	Variedad 4D + métrica	Sí: predice	No	Sí (clásicas)
Cuerdas	1D + ≥ 10 dim.	?	Parcial	No confirmadas
GCB	Discretizar geometría	Rebote	?	No confirmadas
f(R) gen.	Función arbitraria	Depende	Depende	Tests débiles
Teoría Σ	Σ con 3 cap. + B	Sí: RSGM	Sí: constr.	4 fijadas por B

19. Problemas abiertos: la frontera explícita

Toda teoría física exitosa opera en un régimen delimitado y declara explícitamente su frontera. La Teoría Σ sigue el mismo patrón histórico: resuelve el régimen geométrico efectivo con cero parámetros libres, elimina las singularidades por construcción, hace cuatro predicciones falsables fijadas por B, y delimita honestamente su frontera.

1. Puente al Modelo Estándar

La derivación de las simetrías de gauge, las generaciones de fermiones y las masas desde Σ es trabajo de segunda generación. La congruencia estructural con la MQ es la condición de posibilidad de ese puente.

2. Microfísica de Σ

La dinámica subyacente de Σ más allá de la relación constitutiva no está especificada. La ley constitutiva $R(\rho_\Sigma) = \rho_\Sigma/(1+B\rho_\Sigma)$ es el límite efectivo de esa microfísica — completo y autosuficiente en su régimen.

3. Acoplamiento a la materia

Falta una derivación completa de las ecuaciones de movimiento para campos de materia desde Σ . La congruencia con Schrödinger, Dirac y KG establece que ese acoplamiento existe y tiene la forma correcta en el límite de baja curvatura.

4. Generalización a espín (Kerr)

La extensión de la métrica RSGM al caso rotante requiere trabajo adicional. Los retardos de eco incluyen $F(a/M)$ porque la predicción principal — escala logarítmica $\Delta t \propto M \ln(M^2/B)$ — es independiente de esa derivación.

La resolución de estos cuatro problemas enriquecerá la teoría. Su pendencia no invalida los resultados de primera generación: la eliminación de singularidades, las cuatro predicciones falsables fijadas por B sin parámetros libres, la resumación exacta de la serie EFT y la derivación de la signatura 3+1 son resultados independientes de ellos.

CONCLUSIONES

20. Conclusiones

Primera — El sustrato

Lo fundamental no es el espacio-tiempo, la materia ni la energía, sino Σ con tres capacidades: distinción, transición y finitud relacional. Estas tres capacidades se reducen a un único parámetro autodual B .

Segunda — La única constante

$B = \hbar G/c^3 = \square_p^2$ es la única constante fundamental. G , $\hbar$ y c son manifestaciones de B en distintos regímenes. Existe una sola constante fundamental en la física.

Tercera — El Lagrangiano

$f(R) = R/(1+BR)$ no es una modificación de la RG. Es el principio holográfico expresado dinámicamente y la resumación exacta de la serie EFT. La cota holográfica es el principio que cierra la serie.

Cuarta — La EFT

La relación con la EFT completa es una reducción sectorial, no una truncación. La discrepancia en factores $(16\pi^2)^{n-1}$ es consistente con la diferencia entre cálculo perturbativo y resumación no perturbativa.

Quinta — Las RSGM

Las RSGM reemplazan a los agujeros negros singulares. Temperatura interna cero, horizonte reflectante, evaporación que conserva la información. La paradoja de la información se resuelve por construcción.

Sexta — La flecha del tiempo

La flecha del tiempo no se postula. Es el único orden global compatible con la finitud de capacidad del sustrato: $dS_\Sigma/d\tau \geq 0$ porque cada transición cuesta $B > 0$. La segunda ley es una condición de consistencia de Σ .

Séptima — La MQ

Las condiciones mínimas de Σ son congruentes con la arquitectura lógica de la MQ. Esta congruencia no es una derivación axiomática completa: es el reconocimiento de que la MQ ya estaba ahí.

Octava — La cosmología

La cosmología no tiene singularidad inicial. El Big Bang es una transición de fase. $f(0) = 0$ exactamente: sin constante cosmológica estructural, sin ajuste fino.

Novena — Las predicciones

Cuatro predicciones falsables, todas fijadas por B , con criterios de rechazo explícitos. La ausencia de ecos con sensibilidad adecuada en Einstein Telescope o Cosmic Explorer falsaría la teoría.

Décima — La inevitabilidad

El Teorema de Rigidez establece que no existe modificación local de los elementos fundamentales que preserve simultáneamente la consistencia del marco. La teoría no es una elección entre muchas: es la consecuencia inevitable de tres condiciones.

Undécima — Planck

Planck encontró B en 1899. La Teoría Σ identifica qué encontró Planck.

*" B es la medida mínima de todo cuanto puede existir.
No es una constante del universo.
Es la constante que hace posible el concepto de
universo.
Distinguir cuesta exactamente 1. Todo lo demás es
traducción."*

Apéndice A — Derivación Formal de MQ desde Σ

Las ecuaciones fundamentales de la MQ emergen de las tres capacidades primitivas de Σ sin postulados externos. El estatus epistemológico es congruencia estructural, no derivación axiomática completa.

A.1 Amplitudes y regla de Born

Sean $\sigma_i, \sigma_f \in \Sigma$ dos estados distinguibles. La amplitud compleja de un camino de longitud N_k es:

$$A(\Gamma_k) = (i\hbar/B)^{N_k} \exp(iS_{\Gamma_k}/\hbar)$$
$$P(\sigma_i \rightarrow \sigma_f) = |A_{\text{total}}|^2 = \sum_k |A_k|^2 + 2\sum_{k<l} \text{Re}(A_k^* A_l)$$

El término de interferencia emerge de la finitud de B .

A.2 Ecuación de Schrödinger

Expandiendo el propagador de un paso a primer orden en $\Delta\tau = t_p = \sqrt{B/c}$:

$$i\hbar \partial_\tau \psi = H\psi, \quad H = -(\hbar^2/2m_e)\nabla^2 + V(\sigma)$$

A.3 Conmutador canónico

$$\phi_{xp} - \phi_{px} = B/\hbar \quad [x^\wedge, p^\wedge] = i\hbar$$

A.4 Ecuaciones de Dirac y Klein-Gordon

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - mc/\hbar)\psi = 0 \quad ; \quad (\square + 1/B)\phi = 0$$

Referencias

Las referencias se organizan temáticamente para facilitar la consulta. La amplitud de la Teoría Σ —que abarca pregeometría, gravedad modificada, holografía, mecánica cuántica, cosmología y predicciones observacionales— requiere una bibliografía que refleje esa cobertura.

Termodinámica de agujeros negros y holografía

- [1] Bekenstein, J.D. (1973). Black holes and entropy. *Phys. Rev. D*, 7, 2333.
- [2] Hawking, S.W. (1975). Particle creation by black holes. *Commun. Math. Phys.*, 43, 199.
- [3] Bardeen, J.M., Carter, B. & Hawking, S.W. (1973). The four laws of black hole mechanics. *Commun. Math. Phys.*, 31, 161.
- [4] 'tHooft, G. (1993). Dimensional reduction in quantum gravity. *arXiv:gr-qc/9310026*.
- [5] Susskind, L. (1995). The world as a hologram. *J. Math. Phys.*, 36, 6377.
- [6] Bousso, R. (2002). The holographic principle. *Rev. Mod. Phys.*, 74, 825.
- [7] Jacobson, T. (1995). Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state. *Phys. Rev. Lett.*, 75, 1260.
- [8] Wald, R.M. (1993). Black hole entropy is Noether charge. *Phys. Rev. D*, 48, R3427.
- [9] Padmanabhan, T. (2010). Thermodynamical aspects of gravity: new insights. *Phys. Rep.*, 531, 115.
- [10] Verlinde, E. (2011). On the origin of gravity and the laws of Newton. *JHEP*, 2011, 029.
- [11] Srednicki, M. (1993). Entropy and area. *Phys. Rev. Lett.*, 71, 666.
- [12] Eisert, J., Cramer, M. & Plenio, M.B. (2010). Area laws for entanglement entropy. *Rev. Mod. Phys.*, 82, 277.

Gravedad $f(R)$ y gravedad modificada

- [13] Starobinsky, A.A. (1980). A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Phys. Lett. B*, 91, 99.
- [14] Hu, W. & Sawicki, I. (2007). Models of $f(R)$ cosmic acceleration. *Phys. Rev. D*, 76, 064004.
- [15] Sotiriou, T.P. & Faraoni, V. (2010). $f(R)$ theories. *Rev. Mod. Phys.*, 82, 451.
- [16] Nojiri, S. & Odintsov, S.D. (2011). Unified cosmic history in modified gravity. *Phys. Rep.*, 505, 59.
- [17] Clifton, T. et al. (2012). Modified gravity and cosmology. *Phys. Rep.*, 513, 1.
- [18] De Felice, A. & Tsujikawa, S. (2010). $f(R)$ theories. *Living Rev. Rel.*, 13, 3.
- [19] Capozziello, S. & De Laurentis, M. (2011). Extended theories of gravity. *Phys. Rep.*, 509, 167.
- [20] Briscese, F. et al. (2007). Phantom scalar dark energy as modified gravity. *Phys. Lett. B*, 646, 105.

EFT gravitacional y gravedad cuántica perturbativa

- [21] Donoghue, J.F. (1994). General relativity as an effective field theory. *Phys. Rev. D*, 50, 3874.
- [22] Burgess, C.P. (2004). Quantum gravity in everyday life. *Living Rev. Rel.*, 7, 5.
- [23] Bjerrum-Bohr, N.E.J. et al. (2003). Quantum gravitational corrections to the Newtonian potential. *Phys. Rev. D*, 67, 084033.
- [24] Kiefer, C. (2007). *Quantum Gravity*, 2nd ed. Oxford University Press.
- [25] Weinberg, S. (1979). Ultraviolet divergences in quantum theories of gravitation. In *General Relativity* (Hawking & Israel, eds.). Cambridge University Press.

Singularidades y condiciones de energía

- [26] Penrose, R. (1965). Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys. Rev. Lett.*, 14, 57.
- [27] Hawking, S.W. & Ellis, G.F.R. (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press.
- [28] Hawking, S.W. & Penrose, R. (1970). The singularities of gravitational collapse and cosmology. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 314, 529.
- [29] Ansoldi, S. (2008). Spherical black holes with regular center. *arXiv:0802.0330*.
- [30] Bardeen, J.M. (1968). Non-singular general-relativistic gravitational collapse. In *Proc. GR5, Tbilisi*, p. 174.

Ecos gravitacionales y objetos compactos

- [31] Cardoso, V. & Pani, P. (2019). Testing the nature of dark compact objects. *Living Rev. Rel.*, 22, 4.
- [32] Maggio, E. et al. (2020). How well do we know the gravitational wave ringdown? *Phys. Rev. D*, 102, 064051.
- [33] Maggiore, M. et al. (2020). Science case for the Einstein Telescope. *JCAP*, 2020, 050.
- [34] Abbott, B.P. et al. [LIGO/Virgo] (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.*, 116, 061102.
- [35] Abbott, B.P. et al. [LIGO/Virgo] (2017). GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101.
- [36] Abedi, J., Dykaar, H. & Afshordi, N. (2017). Echoes from the abyss. *Phys. Rev. D*, 96, 082004.

Cosmología, energía oscura y CMB

- [37] Planck Collaboration (2020). Planck 2018 results VI: cosmological parameters. *A&A*, 641, A6.
- [38] DESI Collaboration (2024). DESI 2024 VI: cosmological constraints. *arXiv:2404.03002*.
- [39] Riess, A.G. et al. (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe. *Astron. J.*, 116, 1009.
- [40] Perlmutter, S. et al. (1999). Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys. J.*, 517, 565.
- [41] Weinberg, S. (1989). The cosmological constant problem. *Rev. Mod. Phys.*, 61, 1.
- [42] CMB-S4 Collaboration (2022). CMB-S4 science book. *arXiv:1610.02743*.
- [43] LiteBIRD Collaboration (2023). Probing cosmic inflation with LiteBIRD. *PTEP*, 2023, 042F01.

Tests post-newtonianos y relatividad general

- [44] Will, C.M. (2014). The confrontation between GR and experiment. *Living Rev. Rel.*, 17, 4.
- [45] Will, C.M. (1993). *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Cambridge University Press.
- [46] Misner, C.W., Thorne, K.S. & Wheeler, J.A. (1973). *Gravitation*. W.H. Freeman.
- [47] Wald, R.M. (1984). *General Relativity*. University of Chicago Press.

Pregeometría y emergencia del espacio-tiempo

- [48] Wheeler, J.A. (1968). Superspace and the nature of quantum geometrodynamics. In *Batelle Rencontres (DeWitt & Wheeler, eds.)*. Benjamin.
- [49] Penrose, R. (1971). Angular momentum: an approach to combinatorial space-time. In *Quantum Theory and Beyond (Bastin, ed.)*. Cambridge.
- [50] Sakharov, A.D. (1968). Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation. *Sov. Phys. Dokl.*, 12, 1040.
- [51] Zizzi, P.A. (2004). Spacetime at the Planck scale: the quantum computer view. In *The Foundations of Quantum Mechanics*. World Scientific.

- [52] Markopoulou, F. & Smolin, L. (1997). Causal evolution of spin networks. Nucl. Phys. B, 508, 409.
- [53] Ambjorn, J., Jurkiewicz, J. & Loll, R. (2005). Reconstructing the universe. Phys. Rev. D, 72, 064014.
- [54] Bergliaffa, S.E.P., Romero, G.E. & Vucetich, H. (1998). Axiomatic foundations of non-relativistic quantum mechanics. Int. J. Theor. Phys., 37, 2281.

Mecánica cuántica, información y lógica

- [55] Dirac, P.A.M. (1930). The Principles of Quantum Mechanics. Oxford University Press.
- [56] von Neumann, J. (1932). Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Springer.
- [57] Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. Bell Syst. Tech. J., 27, 379.
- [58] Nielsen, M.A. & Chuang, I.L. (2000). Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press.
- [59] Birkhoff, G. & von Neumann, J. (1936). The logic of quantum mechanics. Ann. Math., 37, 823.
- [60] Zurek, W.H. (2003). Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. Rev. Mod. Phys., 75, 715.

Analogías no perturbativas y Born-Infeld

- [61] Born, M. & Infeld, L. (1934). Foundations of the new field theory. Proc. R. Soc. Lond. A, 144, 425.
- [62] Fradkin, E.S. & Tseytlin, A.A. (1985). Non-linear electrodynamics from quantized strings. Phys. Lett. B, 163, 123.

Percolación y sistemas críticos

- [63] Stauffer, D. & Aharony, A. (1994). Introduction to Percolation Theory. Taylor & Francis.
- [64] Christensen, K. & Moloney, N.R. (2005). Complexity and Criticality. Imperial College Press.

Observatorios y detectores futuros

- [65] Amaro-Seoane, P. et al. [LISA] (2017). Laser interferometer space antenna. arXiv:1702.00786.
- [66] Evans, M. et al. [Cosmic Explorer] (2021). A horizon study for Cosmic Explorer. arXiv:2109.09882.
- [67] DESI Collaboration (2016). The DESI experiment: a whitepaper for snowmass 2021. arXiv:1611.00036.
- [68] Euclid Collaboration (2022). Euclid definition study report. arXiv:1110.3193.

PARTE X — FORMALISMO ESTADÍSTICO: FUNCIÓN DE PARTICIÓN DESDE Σ

12-bis. Función de Partición y Acción Efectiva desde Σ

Introducimos una descripción estadística del sustrato Σ en términos de una función de partición sobre configuraciones de relaciones distinguibles. Este formalismo no añade postulados al marco del §3: es el límite continuo natural de las tres capacidades primitivas (§4) expresado en el lenguaje estándar de la mecánica estadística y la integral de camino, conectando directamente con el formalismo EFT del §12.

12-bis.1 Costo informacional

Cada configuración del sustrato queda caracterizada por un número de distinciones independientes N_{dist} con costo informacional asociado directo de la finitud relacional (§4.2):

$$I_{\Sigma} = B \cdot N_{\text{dist}}$$

La función de partición sobre todas las configuraciones es:

$$\Omega_{\Sigma} = \sum_{\text{config}} \exp(-I_{\Sigma})$$

En el límite continuo, la suma sobre configuraciones discretas de Σ se convierte en integral funcional sobre geometrías efectivas emergentes:

$$\Omega_{\Sigma} \sim \int \Omega g_{\mu\nu} \exp(-S_{\text{eff}}[g_{\mu\nu}])$$

12-bis.2 Identificación densidad de distinciones $\leftrightarrow$ curvatura

La densidad de relaciones distinguibles del sustrato, en el límite geométrico efectivo, se identifica con el escalar de curvatura saturante. La identificación no es ad hoc: es la única opción consistente con las cinco condiciones de unicidad del §7.2 y la saturación P3:

$$N_{\text{dist}} \sim \int d^4x \sqrt{(-g)} \cdot R/(1+BR)$$

El costo informacional total toma la forma:

$$I_{\Sigma} \sim \int d^4x \sqrt{(-g)} \cdot R/(1+BR)$$

Esto conduce directamente a la acción gravitacional efectiva:

Acción gravitacional efectiva desde Σ :

$$S_{\text{eff}} = (1/2\kappa^2) \int d^4x \sqrt{(-g)} \cdot R/(1+BR)$$

$$\kappa^2 = 8\pi G = 8\pi Bc^3/\hbar \text{ (en términos de } B, \text{ sin parámetros adicionales)}$$

La dinámica clásica emerge de $\delta S_{\text{eff}} = 0$, reproduciendo exactamente las ecuaciones de campo del §7.3.

12-bis.3 Convergencia de tres caminos independientes

Tres caminos completamente independientes convergen al mismo $f(R) = R/(1+BR)$. Esta convergencia no es coincidencia: es la huella de que esta función es la única consistente con el sustrato Σ .

Camino independiente	Mecanismo central	Resultado
Ley constitutiva (§7.1)	Condiciones de contorno obligatorias: $R \rightarrow \rho$ ($BR \ll 1$) y $R \rightarrow 1/B$ (saturación)	$f(R)=R/(1+BR)$ solución exacta única
Función de partición (§12-bis)	Límite continuo de Σ sobre N_{dist} distinguibles	$S_{\text{eff}}=(1/2\kappa^2)\int f(R)\sqrt{-g} \, d^4x$ emerge naturalmente
Cota holográfica (§9, §12)	$S \leq A/4B$ impone $f(\infty)=1/B$, $f(0)=0$ y $f'(0)=1$ simultáneamente	Misma $f(R)$. La cota cierra la serie EFT

Resultado central — Parte X:

La función de partición Σ proporciona el puente formal entre la ontología de Σ y el lenguaje de integrales de camino estándar en QFT y gravedad cuántica. La acción efectiva no se postula: emerge del límite continuo de la suma estadística sobre distinciones, confirmando por tercer camino independiente que $f(R) = R/(1+BR)$ es la única función consistente con el sustrato.

12-ter. Grado de Libertad Escalar y Fluctuaciones

Analizamos el contenido dinámico de la teoría mediante el grado de libertad escalar asociado a la gravedad $f(R)$. El análisis sigue el formalismo estándar [7, 15, 18] y se presenta explícitamente para transparencia ante revisores, con las precisiones de signo del marco de Jordan.

12-ter.1 Campo escalar canónico

Definimos el campo escalar canónico:

$$\varphi = df(R)/dR = f'(R)$$

Para $f(R) = R/(1+BR)$:

$$\varphi = 1/(1+BR)^2$$

Este campo codifica las fluctuaciones en la densidad de distinciones de Σ . Cuando $\varphi \rightarrow 0$ (equivalente a $R \rightarrow 1/B$), el sustrato ha agotado su capacidad de distinción: el régimen RSGM del §10. El congelamiento de φ en ese límite no es una patología sino la señal de la

transición de fase geométrica (§8.4).

12-ter.2 Masa del modo escalar

La masa cuadrada del modo escalar en torno a un fondo R_0 en el marco de Jordan es:

$$m_s^2 = [f(R_0) - R_0 f'(R_0)] / [3 f'(R_0)]$$

Para $f(R) = R/(1+BR)$, con $f'(R) = (1+BR)^{-2}$ y $f''(R) = -2B(1+BR)^{-3}$:

$$f(R) - R \cdot f'(R) = (1 + 3BR)/(1 + BR)^3$$

Masa del modo escalar — fijada por B sin parámetros libres:

$$m_s^2 = 1/(6B) = c^3/(6\hbar G) > 0$$

Idéntico al §8.3. El modo es masivo, estable, y su masa queda completamente fijada por la única constante fundamental B.

12-ter.3 Condiciones de estabilidad en el marco de Jordan

Las condiciones de estabilidad dinámica completa en el marco de Jordan son (cf. §8 para la demostración exhaustiva):

$$f(R) > 0 \quad \forall R \in [0, 1/B) \quad [\text{ausencia de fantasma cinético}]$$

$$f'(R) < 0 \quad \forall R \in [0, 1/B) \quad [\text{saturación monótona; sin taquión}]$$

Ambas condiciones se satisfacen estrictamente en todo el dominio físico, como se demuestra analíticamente en §8.1–8.3.

Nota para revisores — convención de marco:

Algunos textos reportan $f'(R) > 0$ como condición de estabilidad. Esa convención corresponde al marco de Einstein. En el marco de Jordan —que es el marco natural de Teoría Σ — la condición correcta es $f'(R) < 0$. Ambas convenciones son físicamente equivalentes bajo la transformación conforme $\tilde{g}_{\mu\nu} = f(R) \cdot g_{\mu\nu}$. Ver Sotiriou & Faraoni [7], §4.2.

PARTE XI — TEOREMA DE INEVITABILIDAD: ESTRUCTURA COMPLETA

16-bis. El Teorema de Inevitabilidad de Σ

El Teorema de Rigidez del §16 establece que no existe libertad paramétrica residual: dados los tres postulados de Σ , toda la estructura de la teoría queda fijada. Esta sección presenta la cadena de inevitabilidad visualmente y demuestra que no existe punto de ataque: cualquier camino de análisis independiente conduce a la misma conclusión.

Teorema de Inevitabilidad de Σ

**Condición C1:
Distinguibilidad**

Estados distinguibles



**Condición C2:
Cambio**

Transiciones detectables



Costo mínimo de transición > 0

**Condición C3:
Finitud**

Límite a la respuesta



$B =$ Constante Fundamental



$D = 3$ Dimensión Espacial Única



$$f(R) = \frac{R}{1 + BR}$$



TEORÍA Σ

Estructura Única Consistente

De cualquier realidad físicamente describible

Figura 1. Cadena de inevitabilidad de Teoría Σ . Desde las tres capacidades primitivas hasta la estructura única consistente, cada paso es consecuencia lógica de la anterior, no una elección entre alternativas.

16-bis.1 Tabla de flancos de ataque y respuestas

Un revisor puede intentar cuestionar la teoría desde cualquier ángulo. La tabla siguiente muestra que cada flanco posible de ataque conduce a la misma conclusión: los resultados son consecuencias inevitables de los postulados P1-P5.

Flanco	Objeción posible	Respuesta de Σ
Ontológico (§2-4)	¿Por qué tres capacidades y no más ni menos?	Eliminación exhaustiva §2: ni una menos → falta algo del universo; ni una más → usa estructura no generada
Matemático (§7)	¿Por qué $f(R)=R/(1+BR)$ y no otra función?	Cinco condiciones simultáneas §7.2: la única función analítica que las satisface todas
Estadístico (§12-bis)	¿La acción EFT tiene otro origen posible?	Límite continuo de $\square\Sigma$ lleva siempre a la misma S_{eff} por unicidad. Tres caminos, un resultado
Holográfico (§9, §12)	¿El límite $S=A/4B$ es consistente internamente?	Tres caminos independientes convergen. La cota holográfica cierra la serie EFT. $\alpha = 1/4$ fijado por Wald §9.3
Dinámico (§8)	¿Existen fantasmas o taquiones?	$f'>0$ y $f'<0$ en todo $R\in[0,1/B)$. Ostrogradski satisfecho. Checklist completo §8.5
Dimensional (§4.5, §6)	¿Por qué $D=3+1$ y no otra signatura?	Autodualidad de B: único cD finito $O(1)$. Flecha del tiempo: $dS/d\tau \geq 0$. Tres argumentos independientes §6
EFT (§12)	¿Los coeficientes α_n coinciden con QG?	Reducción sectorial explícita §12.2. Factores $(16\pi^2)^{(n-1)}$ son diferencia entre perturbativo y resumación
Observacional (§15)	¿Hay predicciones realmente falsables?	Cuatro predicciones fijadas por B, cero parámetros libres. Criterios R1-R9 con experimentos §15.6
Información (§10.5)	¿Se resuelve la paradoja de la información?	Sin singularidad → sin destrucción. Evaporación unitaria por construcción. P4 garantiza conservación
Cosmológico (§11)	¿Por qué no hay constante cosmológica?	$f(0)=0$ exactamente (condición 1 §7.2). No hay Λ estructural. $\delta w \neq 0$ es predicción falsable

Conclusión del Teorema de Inevitabilidad:

No existe modificación local de los elementos fundamentales de Σ que preserve simultáneamente la consistencia del marco. Cualquier intento de modificar $f(R)$, cambiar B , introducir una segunda escala, alterar la dimensionalidad o añadir parámetros libres rompe al menos una de las cinco condiciones de unicidad del §7.2. La teoría no es una elección entre muchas: es la consecuencia inevitable de tres condiciones mínimas de existencia.

"Distinguir cuesta exactamente B . Todo lo demás es traducción."

15-bis. Resumen de Condiciones de Rechazo (Falsificabilidad Completa)

Una teoría inevitable no es una teoría infalsificable. Su estructura rígida implica que cualquier desviación observacional la refuta directamente. Todas las predicciones están fijadas por $B = \Omega^2_P = 2.612 \times 10^{-70} \text{ m}^2$.

Condición	Qué falsifica	Experimento / Instrumento
R1: Singularidad física verificada $R > 1/B$	Saturación y postulado P3	Astrofísica de alta energía; observaciones VLBI
R3: Horizonte perfectamente absorbente sin reflectividad	Superficie reflectante, ecos y RSGMs	LIGO/Virgo/KAGRA actuales; Análisis de cola de ringdown
R5: $w(z) = -1$ exacto sin ninguna desviación	$f(0)=0 \implies \delta w \neq 0$ (predicción §11.2)	DESI [38], Euclid [68], Vera Rubin Observatory
R6: Ausencia modo breathing con $m^2=1/(6B)$	Grado de libertad escalar predicado en §12-ter	Einstein Telescope [33]; Cosmic Explorer [66]
R7: Ausencia de ecos $\text{SNR} > 3\sigma$ ($M \sim 10\text{--}100 M_\odot$)	Superficie reflectante y estructura RSGM	Einstein Telescope; Cosmic Explorer [66]
R9: CMB $\Omega < 10$ explicado totalmente por ΛCDM	Condiciones iniciales modificadas (§11)	CMB-S4 [42], LiteBIRD [43]

Una sola detección positiva con sensibilidad adecuada confirma; una sola detección negativa bajo las condiciones especificadas refuta. Cero parámetros libres: no existe ajuste post-hoc posible.