**UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI**

**TATIANE FABIANE FERREIRA DOS SANTOS**

# DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE DEPENDÊNCIA TECNORREPRODUTIVA (IDT): UM NOVO PARÂMETRO COMPARATIVO ENTRE PAÍSES DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MESTRADO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUÇÃO STRICTO SENSU**

**São José dos Campos, abril / 2026**

**UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI**

**TATIANE FABIANE FERREIRA DOS SANTOS**

# DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE DEPENDÊNCIA TECNORREPRODUTIVA (IDT): UM NOVO PARÂMETRO COMPARATIVO ENTRE PAÍSES DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Biomédica – Mestrado, da Universidade Anhembi Morumbi, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientadora: Prof Dra Luciana A. Campos Baltatu

Coorientador: Prof Dr Ovidiu C. Baltatu

**São José dos Campos, abril / 2026**

**UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI**

**TATIANE FABIANE FERREIRA DOS SANTOS**

# DESENVOLVIMENTO DO ÍNDICE DE DEPENDÊNCIA TECNORREPRODUTIVA(IDT): UM NOVO PARÂMETRO COMPARATIVO ENTRE PAÍSES DESENVOLVIDOS E EM DESENVOLVIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Biomédica – Mestrado, da Universidade Anhembi Morumbi, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Biomédica aprovada pela seguinte Banca Examinadora:

**Prof. Dra. Luciana A. Campos Baltatu**
Orientador
Mestrado em Engenharia Biomédica
Universidade Anhembi Morumbi

**Prof. Dra. Ana Paula Pinto**
Centro Universitário UFBRA

**Prof. Dra. Adriana Barrinha Fernandes Moretti**
Universidade Anhembi Morumbi

**Prof. Dr. Renato Amaro Zângaro**
Universidade Anhembi Morumbi

**Prof. Dr. Ovidiu Constantin Baltatu**
Universidade Anhembi Morumbi

**Prof. Dra Ana Carolina Brisola Brizzi**
Universidade de Taubaté

**São José dos Campos, abril /2026**

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da Universidade, o autor e do orientador.

**TATIANE FABIANE FERREIRA DOS SANTOS**

Fisioterapeuta graduada pela Universidade de Taubaté, Pós-graduada em fisioterapia em Unidade de Terapia Intensiva e Dermato Funcional pela Faculdade Inspirar, preceptora na Universidade Anhembi Morumbi.

Ficha Bibliográfica elaborada pela biblioteca AMO
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S233d Santos, Tatiane Fabiane Ferreira dos
Desenvolvimento do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT): Um novo parâmetro comparativo entre desenvolvidos e em desenvolvimento. / Tatiane Fabiane Ferreira dos Santos- 2026
87; 30 cm.

Orientador: Prof.ª. Drª. Luciana A. Campos Baltatu
Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo - 2025.
Bibliografia: f. 82 - 87

1. Tecnologia de reprodução assistida 2. Índice de dependência tecnorreprodutiva 3. Fertilidade 4. Índice composto 5. Índice geométrico I. Santos, Tatiane Fabiane Ferreira dos II. Título

CDD 610.28

Biblioteca Universidade Anhembi Morumbi

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta jornada, guiando meus passos e sustentando-me nos momentos de desafio.

Ao meu marido, pelo apoio incondicional, compreensão, incentivo constante e parceria diária, fundamentais para que eu pudesse seguir firme na construção deste trabalho e na realização deste sonho.

À instituição Ânima Educação, pela concessão da bolsa de estudos destinada a colaboradores, oportunidade essencial para a viabilização deste mestrado e para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

À minha orientadora, pela dedicação, paciência, generosidade intelectual e valiosas contribuições ao longo de todo o processo, que foram determinantes para o amadurecimento científico deste estudo.

**LISTA DE TABELAS**


| Tabela - Descrição | página |
|---|---|
| **Tabela 1**. Quantidade de países incluídos no estudo por continente | 12 |
| **Tabela 2.** Caracterização descritiva do painel país-ano e das variáveis do IRACRAN (2012–2019; N = 523). | 9 |
| **Tabela 3.** Evolução temporal (2012–2019): resumo por variável (medianas, IQR, Δ e teste global). | 15 |
| **Tabela 4.** Resumo por continente (medianas; IQR entre colchetes). | 17 |
| **Tabela 5.** Correlações principais entre variáveis (ρ de Pearson, p-valor). | 22 |
| **Tabela 6.** Convergência e consistência entre as metodologias de cálculo do IDT (IDT-A vs IDT-H). | 29 |
| **Tabela 7.** Correlações entre IDT e variáveis externas (Pearson). | 30 |
| **Tabela 8.** Regressão múltipla padronizada. | 32 |
| **Tabela 9.** Tendência média das variáveis principais (2012–2019). | 33 |
| **Tabela 10.** Mediana do IDH por continente e ano (2012–2019). | 33 |
| **Tabela 11.** Mediana do IDT-H por continente e ano (2012–2019). | |

**LISTA DE FIGURAS**


| Figura - Descrição | página |
|---|---|
| **Figura 1.** Boxplots das variáveis numéricas (2012–2019): distribuição, assimetria e outliers. | 13 |
| **Figura 2.** Boxplots por continente (2012–2019): padrões regionais de renda, dinâmica demográfica e reprodução assistida. | 19 |
| **Figura 3.** Matriz de correlação de Spearman entre as variáveis (base completa, 2012–2019). | 23 |
| **Figura 4.** Clusters 1D por variável – País – Unidade amostral. | 24 |
| **Figura 5.** Convergência entre metodologias do índice (IDT-A vs IDT-H). | 28 |
| **Figura 6.** Bland–Altman da concordância entre IDT-H e IDT-A. | 29 |
| **Figura 7.** Evolução temporal do IDT-H (2012–2019) por continente. | 35 |
| **Figura 8.** Relação entre IDT-H e GNI per capita. | 37 |
| **Figura 9.** Relação entre IDT-H e proporção de nascimentos por reprodução assistida (%RA). | 37 |
| **Figura 10.** Relação entre IDT-H e Taxa de Fertilidade Total (TFT). | 37 |
| **Figura 11.** Análise de agrupamento (Cluster k=3) a partir da PCA de GNI, TFT, %RA e IDT-H. | 38 |
| **Figura 12.** Biplot PCA com k-means (k=3) em GNI, TFT, %RA e IDT-H. | 39 |

**ABREVIATURAS E SIGLAS**

| Abreviatura | Significado |
|---|---|
| ANARA | African Network and Registry for Assisted |
| CRA | Ciclos de Reprodução Assistida |
| CRA_por_1000 | Ciclos de Reprodução Assistida por mil mulheres em idade fertil |
| ESHRE | European Society of Human Reproduction and Embryology |
| FIV | Fertilização in vitro |
| GBD | Global Burden of Disease |
| GNI | Renda Nacional Bruta |
| GNI PPP | Renda Nacional Bruta em Paridade do Poder de Compra |
| ICMART | Internacional Committee for Monitoring Assisted Reproductive Technologies |
| ICSI | Injeção intracitoplasmática de espermatozoides |
| IDH | Índice de Desenvolvimento Humano |
| IDT | Indice de dependência tecnorreprodutiva |
| IDT-A | Indice de dependência tecnorreprodutiva, modelo autoral |
| IDT-H | Indice de dependência tecnorreprodutiva, modelo IDH |
| IQR | Intervalo Interquartil |
| IRACRAN | Indice de representatividade da reprodução assistida no total de nascimentos |
| Nascidos RA/Total | Nascidos por reprodução assistida dividido pelo total de nascimentos daquele ano |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| PCA | Análise de componentes principais |
| PGT-A | Teste genético pré-implantacional para aneuploidias |
| RA | Reprodução Assistida |
| REDLARA | Rede Latino-Americana de Reprodução Assistida |
| SISEMBRIO | Sistema de Informações de Nascidos Vivos do Brasil |
| TFT | Taxa de fertilidade total |
| TGP | Taxa de Crescimento Populacional |
| TI | Taxa de infertilidade |
| TI_por_1000 | Taxa de infertilidade por mil mulheres em idade reprodutiva |
| UNDESA | Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas |

**Sumário**

1.INTRODUÇÃO ..... 12
1.2 Problema de pesquisa ..... 15
2. OBJETIVOS ..... 16
2.1 Objetivo geral ..... 16
2.2 Objetivos específicos ..... 16
3. METODOLOGIA ..... 17
3.1 Tipo de pesquisa ..... 17
3.2 Critérios de Inclusão e Exclusão ..... 17
3.3 Coleta e Organização dos Dados ..... 19
3.4 Construção do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva ..... 20
3.5 Análise de Dados ..... 22
4. RESULTADOS ..... 24
4.1 Índice ..... 36
4.2 Padronização - critérios e procedimento ..... 42
4.3 Construção do índice - duas formulações ..... 44
4.4 Controles de qualidade (executados junto à construção) ..... 45
4.5 Avaliação da Consistência e Comparação das Metodologias ..... 45
5. DISCUSSÃO ..... 61
5.1 Principais Achados ..... 61
5.2 Interpretação dos Dados comparando com as evidências existente ..... 61
5.3 Construção do Índice ..... 67
5.5 Implicações ..... 79
6. CONCLUSÃO ..... 81
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 82

**Resumo**

**Introdução:** As tecnologias de reprodução assistida (TRA) têm se tornado cada vez mais prevalentes mundialmente, porém sua relação com fatores demográficos e socioeconômicos permanece pouco conhecida. Este estudo pela primeira vez desenvolveu um Índice de Dependência Tecnoreprodutiva (IDT), uma métrica geométrica desenvolvida para quantificar a dependência populacional das tecnologias de reprodução assistida como fator contributivo para o crescimento populacional. **Objetivo:** Desenvolver e validar o Índice de Dependência Tecnoreprodutiva (IDT) e comparar padrões entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. **Metodologia:** Este estudo é observacional, retrospectivo, descritivo e exploratório de base de dados online de 66 países distribuídos em sete continentes (2012-2019, N=523 observações país-ano). As fontes de dados incluíram Global Burden of Disease (GBD), Banco Mundial, dados das Nações Unidas e base de dados de reprodução assistida governamentais. O IDT foi construído utilizando três variáveis centrais: ciclos de reprodução assistida (CRA), taxa de infertilidade (TI) e taxa de crescimento populacional (TGP%). As análises estatísticas incluíram estatísticas descritivas, matrizes de correlação, análise de componentes principais (PCA), agrupamento k-means e modelos de regressão múltipla.**Resultados:** A amostra compreendeu 523 observações, predominantemente da Europa (55,6%), seguida pela América Latina (18,4%) e África (12,2%). A mediana de nascimentos totais foi de 200.000 (IQR: 62.000-670.000), com mediana de nascimentos por reprodução assistida de 1.944 (IQR: 579-7.037). As metodologias IDT-H e IDT-A demonstraram forte convergência (correlação $\rho=0,928$, $p<0,001$; análise de Bland-Altman confirmou concordância). Foram identificadas correlações significativas entre IDT e GNI per capita, taxas de fertilidade e utilização de TRA. A análise temporal (2012-2019) revelou tendências crescentes na dependência tecnoreprodutiva, particularmente em países de alta renda. Variações continentais demonstraram padrões distintos, com Europa e América do Norte apresentando valores de IDT mais elevados comparados à África e América Latina. **Conclusões:** O Índice de Dependência Tecnoreprodutiva (IDT) representa uma ferramenta válida e confiável para quantificar a dependência dos países em relação às tecnologias de reprodução assistida. O índice captura com sucesso a complexa interação entre desenvolvimento econômico, transições demográficas e utilização de TRA. Os achados revelam disparidades substanciais entre nações desenvolvidas e em desenvolvimento, com implicações para políticas de saúde reprodutiva, alocação de recursos e equidade no acesso a tratamentos de fertilidade. O IDT fornece uma estrutura padronizada para monitorar tendências globais na dependência tecnoreprodutiva e pode subsidiar decisões multidisciplinares baseadas em evidências.

**Palavras-chave:** Tecnologia de Reprodução Assistida; Dependência Tecnoreprodutiva; Fertilidade; Índice Composto; Índice Geométrico; Índice de dependência tecnorreprodutiva.

## Abstract

**Title:** The Technoreproductive Dependency Index: A New Framework for Monitoring Demographic Transitions and Reproductive Health Equity

**Background:** Assisted reproductive technologies (ART) have become increasingly prevalent worldwide, yet no standardized metric exists to quantify population-level dependency on these technologies as a factor contributing to demographic dynamics. We aimed to develop and validate the Technoreproductive Dependency Index (TDI), a novel composite indicator integrating infertility prevalence, ART utilization, and population growth. **Methods:** This ecological, observational study analyzed 523 country-year observations from 66 countries across seven continents (2012–2019). Data were extracted from the Global Burden of Disease, World Bank, United Nations, and international ART registries. The TDI was constructed using min-max normalized variables: ART cycles per 1,000 women of reproductive age, infertility rate, and population growth rate. Both arithmetic (TDI-A) and geometric (TDI-H) aggregation methods were tested. Validation included correlation analyses, principal component analysis (PCA), k-means clustering, and multiple regression models. **Results:** The TDI-A and TDI-H demonstrated strong convergence ($\rho=0.928$, $p<0.001$). The TDI correlated significantly with GNI per capita ($r=0.62$), proportion of ART births ($r=0.76$), and inversely with total fertility rate ($r=-0.55$; all $p<0.001$). Three distinct dependency profiles emerged: Low (predominantly Africa; TDI<0.10), Intermediate (South America, Eastern Europe; $0.10\leq TDI<0.39$), and High (Europe, North America, Oceania, developed Asia; $TDI\geq0.39$). Between 2012 and 2019, median ART cycles increased by 128% globally, with continental TDI values rising from 0.03 to 0.06 in Africa and from 0.48 to 0.54 in Europe. **Conclusions:** The TDI represents a valid, reliable tool for quantifying and comparing technoreproductive dependency across countries. The index captures the interplay between economic development, demographic transition, and ART utilization, revealing substantial global disparities. This framework can inform reproductive health policies, resource allocation, and equity-focused interventions in fertility care.

**Keywords**: Assisted Reproductive Technology; Technoreproductive Dependence; Fertility; Composite Index; Geometric Index; Technoreproductive Dependence Index

## 1.INTRODUÇÃO

A reprodução humana vem passando por profundas transformações ao longo dos anos, ela enquanto processo biológico fundamental à perpetuação da espécie, vai além dos limites da fisiologia e se insere profundamente nas dinâmicas sociais e médicas da humanidade, estando sempre no centro das preocupações pois influencia diretamente o crescimento populacional, tornando uma questão demográfica e de saúde pública. Com o advento da tecnologia e os avanços médicos observa-se uma reconfiguração das relações familiares, ampliando possibilidades de parentalidade e desafiando concepções tradicionais de filiação e afetividade (1) (1). Paralelamente, a reprodução humana é atravessada por marcadores sociais como gênero, classe e raça, influenciando o acesso a serviços de saúde e revelando desigualdades estruturais, especialmente entre populações jovens e vulneráveis (2).

A crescente complexidade da reprodução humana contemporânea é intensificada pelos desafios da infertilidade, condição essa definida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como a incapacidade de alcançar uma gravidez após 12 meses ou mais de relações sexuais desprotegidas – essa é uma definição clínica e diagnóstica usada por médicos e serviços de saúde reprodutiva, que serve para identificar casais que podem precisar de avaliação médica precoce e tratamento- e é uma situação que pode ter causas femininas, masculinas ou ser inexplicada, afetando aproximadamente 17,5% da população adulta mundial, ou seja, uma em cada seis pessoas em idade reprodutiva (15 a 49 anos) (3), impactando sua saúde física, emocional e social representando um obstáculo no planejamento familiar. Nos últimos anos os estudos do Global Burden of Disease (GBD) têm fornecido estimativas mais precisas sobre a magnitude da infertilidade, no caso do GBD a definição de infertilidade se dá por casais em união há mais de cincos anos sem uso de contracepção e sem nascimento vivo (infertilidade primária), ou sem nascimento vivo após o último parto (para infertilidade secundária) e considera fatores epidemiológicos e demográfico - voltada para a comparabilidade entre países e longos períodos de tempo e suas repercussões globais (4). Segundo o GBD 2019, a prevalência de infertilidade feminina variou entre 7% e 12% entre mulheres em idade reprodutiva (15 a 49 anos), enquanto a infertilidade masculina apresentou taxas entre 10% e 15%, dependendo do país analisado. Essas informações revelam que a infertilidade deixou de ser apenas um problema individual e isolado em determinados contextos, para se constituir como um desafio coletivo, com repercussões econômicas, sociais e populacionais.

Paralelamente, é possível observar um processo histórico de transformação demográfica. Estudos na área de fecundidade revelam queda importante nas taxas de fecundidade (número médio de filhos que uma mulher tem ao longo da vida reprodutiva), especialmente em sociedades

de alta e média renda considerados mais desenvolvidos (5), desde a metade do século XX, muitos países passaram por uma transição demográfica, caracterizada por redução da fecundidade e mortalidade, resultando em populações envelhecidas e com uma taxa de crescimento populacional baixo. Porém este processo ocorre de forma diferente entre os países pois são influenciados por questões sociais, econômicas, culturais e governamentais(6).

Segundo organismos internacionais como Banco Mundial e a CIA World Factbook, o nível de reposição populacional é estimado em 2,1 filhos por mulher, este sendo um valor necessário para manter a estabilidade demográfica sem crescimento ou declínio populacional. Porém muitos países apresentam taxas abaixo desse número, o Japão, por exemplo, apresenta uma taxa de 1,3 filhos por mulher, Estados Unidos e França a taxa fica em torno de 1,7 e 1,8, respectivamente, o Brasil segue essa tendencia e registrou no último Censo de 2022 uma taxa de 1,6 filhos por mulher, já a África do Sul mantém uma taxa mais próxima da reposição, com cerca de 2,4. Esses dados revelam padrões distintos de fecundidade que impactam diretamente o envelhecimento populacional, a força de trabalho e as políticas públicas de cada país.

Esse fenômeno, de baixo crescimento populacional, está associado à urbanização e à inserção feminina no mercado de trabalho, o que resultou no adiamento da maternidade (7). Dentre as principais características que contribuíram para esse adiamento tem-se o aumento da escolaridade feminina, priorização no desenvolvimento de uma carreira, desigualdades políticas e estruturais de gênero principalmente no setor privado(8), aliado a isso também ocorreu o aumento do acesso a métodos contraceptivos que trouxe a mulher a possibilidade de escolher o momento da maternidade(9). Assim a infertilidade se apresenta em um cenário em que a reprodução natural é cada vez mais adiada e incerta.

É nesse contexto que as técnicas de reprodução assistida (RA) ganham destaque e representa um dos avanços mais significativos da medicina moderna, desde o nascimento do primeiro bebê nascido por fertilização in vitro em 1978 no Reino Unido, a reprodução assistida deixou de ser uma inovação experimental para se tornar um recurso consolidado em mais de 80 países (10). O sucesso inicial da FIV abriu caminho para inovações como a injeção intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI), a criopreservação de gametas e embriões e, mais recentemente, o uso de inteligência artificial na seleção embrionária(11). Na Europa entre os anos de 2012 e 2019 mais de um milhão e quinhentos mil crianças nasceram através da técnica de reprodução assistida, o que demonstra seu impacto populacional cumulativo e sua importância como instrumento biomédico (12).

A reprodução assistida, no entanto, não deve ser analisada somente como um fator biomédico, ela é também um fenômeno social e demográfico. Em países com uma taxa de crescimento populacional baixo, como o Japão, Coreia do Sul e grande parte da Europa, a

reprodução assistida cumpre o papel de mitigar parcialmente a queda no número de nascimentos, ainda que não seja capaz de sozinha reverter essa queda populacional , contudo países em desenvolvimento o acesso à reprodução assistida revela desigualdades econômicas e de políticas públicas, pois o custo é alto, existe uma baixa cobertura nos sistemas nacionais de saúde, fazendo com que a maior parte da população não tenha acesso, somente uma parcela com rendas mais altas conseguem custear o tratamento(5)(13).

Desta forma, ao mesmo tempo que a reprodução assistida representa um desejo individual, ela também se apresenta como uma ferramenta de interesse coletivo, a fim de manutenção da taxa de natalidade em sociedades que enfrentam queda no crescimento populacional. Essa dualidade coloca a reprodução assistida como objetivo privilegiado para compreender como a biomedicina, transformações sociais e dinâmicas sociais se interligam.

A biomedicina, enquanto campo científico voltado à compreensão e intervenção nos processos biológicos humanos, tem se tornado um agente ativo nas transformações sociais contemporâneas, influenciando diretamente as dinâmicas sociais, culturais e éticas. O avanço de tecnologias como edição genética, reprodução assistida, terapias celulares e medicina personalizada não apenas redefine os limites da saúde e da doença, mas também re-configura os modos de viver, de se relacionar e de compreender o corpo e a identidade (14,15)Essas inovações biomédicas geram novas formas de subjetivação e ampliam o debate sobre autonomia, acesso e justiça social, especialmente em contextos marcados por desigualdades estruturais. (16). Por exemplo, o uso de testes genéticos para prever predisposições a doenças tem implicações não apenas clínicas, mas também sociais, ao influenciar decisões familiares, políticas públicas e práticas de consumo. (17). Além disso, a biomedicina participa da construção de inovações para o futuro, como projetos de longevidade e aprimoramento humano, que desafiam concepções tradicionais de envelhecimento e normalidade. Nesse sentido, a intersecção entre biomedicina e transformações sociais revela em campo de tensões e possibilidades, onde ciência, cultura e política se entrelaçam de forma cada vez mais complexa.

A literatura atual tem avançado na descrição da prevalência da infertilidade, na análise dos resultados clínicos da reprodução assistida e na discussão ética sobre seus limites. Porém o desafio atual não é apenas medir o número de ciclos por nascimentos por reprodução assistida, mas compreender como a utilização dessas tecnologias se articula com a taxa de fertilidade e com o crescimento populacional. Essa abordagem possibilita avaliar a dependência tecnorreprodutiva das populações, ou seja, o grau em que sociedades contemporâneas necessitam recorrer a tecnologias biomédicas para manter sua dinâmica reprodutiva e demográfica. (18,19)(20)(21)

Porém, existe uma lacuna metodológica onde não há um indicador sintético capaz de mensurar, de forma comparável e integrada, a dependência tecnorreprodutiva entre os países e essa ausência dificulta a análise comparativa, a formulação de políticas públicas e monitoramento das transformações reprodutivas em escala global.

## 1.2 Problema de pesquisa

O questionamento científico que norteia esse estudo é como medir a dependência tecnorreprodutiva de forma multidimensional, comparável e sensível às desigualdades apresentadas por cada país. Sendo assim, a dissertação propõe a construção e validação do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva que se caracteriza como um indicador composto, que integra três dimensões: taxa de infertilidade, uso de reprodução assistida e crescimento populacional.

Essa perspectiva busca integrar os campos de saúde, demografia e ciências sociais, oferecendo uma contribuição inovadora para entender os impactos das biotecnologias na reprodução humana e evolução das populações e o quanto as tecnologias reprodutivas impactam o crescimento populacional. A seguir, apresentam-se os objetivos que nortearam o desenvolvimento deste estudo.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Desenvolver o Índice de Dependência Tecnorreprodutiva, um indicador composto destinado a mensurar o grau de dependência populacional das tecnologias de reprodução assistida como fator contributivo para o crescimento populacional, a partir da integração e análise de dados secundários provenientes de bases nacionais e internacionais de saúde e demografia.

### 2.2 Objetivos específicos

1. Selecionar e extrair variáveis representativas dos domínios de infertilidade, utilização de técnicas de reprodução assistida e crescimento populacional, a partir de bases nacionais e internacionais confiáveis.
2. Padronizar e normalizar os dados obtidos, assegurando uma forma de comparar as informações dos países, períodos e fontes diferentes.
3. Definir os pesos relativos das variáveis para a construção do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT), com base em relevância teórica e análise estatística.
4. Calcular o IDT para cada unidade de análise (país e ano) e estabelecer clusters e categorias de dependência.
5. Realizar análises descritivas e exploratórias, identificando padrões geográficos e socioeconômicos do IDT.
6. Comparar o IDT com indicadores globais, como Taxa de Fertilidade, Renda Nacional Bruta per Capita e Nascimentos Totais.
7. Interpretar os resultados obtidos à luz da bioética reprodutiva, planejamento demográfico e políticas públicas de saúde, discutindo implicações e limitações do índice.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Tipo de pesquisa

Este estudo foi conduzido com abordagem ecológica, de caráter observacional, retrospectivo, descritivo e exploratório de base de dados online teve como objetivo analisar o comportamento dos países em desenvolvimento e desenvolvidos, relacionados à reprodução assistida e sua dependência em diferentes contextos demográficos e geográficos, criando-se o Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT).

O estudo foi estruturado conforme as diretrizes metodológicas recomendadas pelo EQUATOR Network e as análises foram realizadas a partir de dados secundários agregados por país e período, obtidos em bases de dados oficiais e internacionalmente reconhecidas, como banco de dados de organizações multilaterais, institutos nacionais de estatística e registro de sociedades médicas especializadas. O modelo metodológico segue as recomendações do STROBE Statement (Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology), adaptado às particularidades de estudos ecológicos. Também foi utilizada as diretrizes da REDORD Statement para consulta e garantir adequada descrição das fontes de dados e dos procedimentos de extração e tratamento das informações, a fim de garantir transparência, reprodutibilidade e rigor científico na descrição dos métodos utilizados.

Os dados foram organizados em uma planilha estruturada para o cálculo do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT) e relacionou três indicadores: taxa de infertilidade, número de ciclos de reprodução assistida e taxa de crescimento populacional.

### 3.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram contemplados no estudo 66 países distribuídos pelos cinco continentes: Europa, Ásia, Oceania, África, e América que está subdividida em América do Norte, América Central e América do Sul, a divisão das Américas ocorreu para melhor refletir a dinâmica do continente. A seleção dos países foi realizada com base na disponibilidade, consistência e acessibilidade dos dados públicos relacionados à saúde reprodutiva, demografia e reprodução assistida. Foram incluídos apenas os países que apresentavam informações completas e atualizadas para todas as variáveis necessárias ao cálculo do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT).

O período de análise compreendeu os anos de 2012 a 2019, definido em função da cobertura temporal das bases de dados internacionais utilizadas. A escolha desse intervalo foi influenciada especialmente pela China, cuja base oficial de dados sobre reprodução assistida não disponibiliza informações anteriores a 2012, conforme as diretrizes de transparência estatística

adotada pelo governo chinês. A delimitação temporal até o ano de 2019 foi estabelecida com o objetivo de preservar a consistência e comparabilidade dos dados utilizados, a partir de 2020, a pandemia de COVID-19 provocou alterações significativas nos padrões de saúde reprodutiva em escala global, com impacto direto sobre os serviços de reprodução assistida. Diversas populações optaram por adiar ou suspender tratamentos devido às restrições sanitárias, ao redirecionamento de recursos médicos e à instabilidade socioeconômica. Além disso, após o período crítico da pandemia, muitos países, como os do continente Europeu e China, não disponibilizaram dados atualizados ou confiáveis sobre reprodução assistida, o que comprometeria a integridade metodológica do índice proposto. Dessa forma o recorte até 2019 foi considerado o mais adequado para garantir robustez estatística e validade comparativa entre os países analisados. De qualquer forma foram incluídos para análise e contextualização dados individuais do índice de Brasil e EUA, dos anos 2020, 2021 e 2022, esse período foi o limite uma vez que o governo americano somente disponibiliza dados completos até 2022 e parciais de 2023.

Entre os critérios de exclusão adotados, foram retirados da amostra países do Oriente Médio, pois países como Síria, Iraque, Iêmen e Palestina, enfrentam conflitos prolongados o que causa deslocamentos populacionais, colapsos de sistemas de saúde e ausência de registros confiáveis, o acesso à tecnologia de reprodução assistida é limitado ou inexistente em áreas de guerra, e os dados são frequentemente censurados ou não divulgados. Igualmente muitos países do continente africano também foram excluídos pois atualmente mais de 30 países enfrentam algum tipo de conflito ou instabilidade, nações como Sudão, República Democrática do Congo e Somália são exemplos de locais onde existem milhões de refugiados, aumento de pobreza e queda importante da expectativa de vida, o que leva uma fragilidade dos sistemas de saúde, dificultando a coleta dos dados.

Dessa forma se seguiu na exclusão com a decisão fundamentada em fatores estruturais que comprometem a qualidade, a padronização e a disponibilidade dos dados necessários à análise. Em muitos desses territórios, o contexto geopolítico instável, marcado por conflitos armados, crises humanitárias, instabilidade institucional e deslocamentos populacionais – afeta diretamente indicadores demográficos e sanitários essenciais para a construção e análise do índice. Além disso, a ausência de registros organizados, a fragmentação das fontes oficiais e a limitação na transparência dos dados dificultam a aplicação de critérios comparativos e a inclusão dessas nações poderia introduzir vieses estruturais.

Após a aplicação dos critérios de exclusão, foi possível consolidar uma amostra composta por países que apresentavam dados completos, padronizados e acessíveis para todas as variáveis necessárias à construção do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva. A seleção priorizou nações com registros consistentes sobre infertilidade, ciclos de reprodução assistida e

crescimento populacional, bem como disponibilidade de dados e consistência temporal, assim foi possível garantir a diversidade regional e a representatividade global da base analisada.

A distribuição dos países por continente foi organizada de acordo com a classificação geopolítica adotada pelas Nações Unidas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de países incluídos no estudo por continente

| Continente | Sub-região | Número de países incluídos |
|---|---|---|
| Europa | | 37 |
| Ásia | | 4 |
| Oceania | | 2 |
| África | | 8 |
| América | América do Norte, América Central, América do Sul | 15 |

3.3 Coleta e Organização dos Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento sistemático em bases secundárias, públicas e internacionalmente reconhecidas, com o objetivo de reunir informações padronizadas e comparáveis entre os países selecionados. As variáveis utilizadas para o cálculo do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT) foram: taxa de infertilidade, número de ciclos de reprodução assistida, população feminina em idade fértil (15 a 49 anos) e taxa de crescimento populacional. Essas informações foram extraídas de fontes oficiais e especializadas, como Banco Mundial (World Bank), a Organização Mundial da Saúde (OMS), o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (UNDESA), a Internacional Committee for Monitoring Assisted Reproductive Technologies (ICMART) e a European Society of Human Reproduction and Embryology (ESHRE). Complementarmente, foram utilizadas bases como o Global Burden of Disease (GBD), o Sistema de Informações de Nascidos Vivos do Brasil (SISEMBRIO), a Food and Drug Administration (FDA), a Rede Latino-Americana de Reprodução Assistida (REDLARA) e a Canadian Fertility e Andrology Society. Além das variáveis centrais utilizadas na composição do índice, foram incorporados indicadores complementares para fins de comparação e reforço analítico, entre esses indicadores, inclui-se: o número total de nascimentos, obtido a partir da base de dados das Nações Unidas (*United Nations*, 2024); o número absoluto de nascimentos por reprodução assistida, extraído das mesmas bases que reportam os ciclos de reprodução assistida; a renda nacional bruta per capita (*Gross National Income – GNI per capita*) referente à renda nacional bruta per capita utilizando os

seguintes filtros no site: Data / data e resources / buscar indicador: GNI per capita, PPP (current international $), o dado obtido para expressar a renda foi o GNI PPP que significa Renda Nacional Bruta (RNB) em Paridade do Poder de Compra, onde a renda média por pessoa é ajustada pelo custo de vida, expressa em dólares internacionais do ano corrente, dessa forma corrige distorções de preços e câmbio, conforme registros do *World Bank* (2024); e a taxa de fertilidade, obtida do *Global Burden of Disease* (GBD, 2024), entendida como a taxa de fecundidade total (TFT). Esta última métrica representa o número médio de filhos que uma mulher teria ao longo de sua vida reprodutiva, sendo calculada com base no número anual de nascimentos por mil mulheres em idade fértil (15 a 49 anos).

Também foram incluídos a fim de comparação os dados referentes ao Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) que foram obtidos a partir do banco de dados público do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (UNDP), disponível no portal Human Development Reports. Para fins de análise, foram selecionados apenas os países incluídos na amostra do estudo, considerando-se os valores anuais do IDH no período compreendido entre 2012 e 2019. Os países foram agrupados por continente e, para cada ano, foi calculada a mediana do IDH de todos os países de cada continente. A utilização da mediana como medida de tendência central buscou reduzir a influência de valores extremos e proporcionar uma representação mais robusta da condição de desenvolvimento humano observada em cada região ao longo do tempo.

A inclusão desses parâmetros permitiu uma avaliação mais abrangente e contextualizada dos cenários reprodutivos entre os países analisados.

### 3.4 Construção do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva

Após a apresentação geral das variáveis utilizadas na construção do IDT, torna-se necessário aprofundar os critérios de seleção, as fontes específicas e os métodos de extração de dados. Esta seção descreve, de forma sistemática, o processo adotado para cada variável, com vistas a garantir a consistência estatística e a integridade dos resultados. A seguir são apresentados os procedimentos específicos de obtenção, tratamento e padronização das variáveis que compõe o índice:

1. **Taxa de Infertilidade (TI_por_1000)**

Os dados de infertilidade forem extraídos do *Global Burden of Disease (GBD) Results Tool (IHME)*, os quais disponibilizam estimativas agregadas por país e por ano, utilizando os seguintes filtros: estimativa de GBD: Deficiencia / Measure: prevalence /Metric: Number /Impairment: Infertility/cause: all causes / Location: países que entraram na pesquisa / age: 15 a 49 years / sex:

female/Year: os anos selecionados 2012 a 2019. Para a presente análise, considerou-se o indicador de prevalência correspondente ao número absoluto de mulheres inférteis, que diferente da definição da OMS, que caracteriza a infertilidade como a incapacidade de alcançar uma gestação após 12 meses de relações sexuais regulares, sem o uso de métodos contraceptivos, o GBD define infertilidade após 5 anos da incapacidade de gerar uma gestação e estima infertilidade como incapacidade reprodutiva em nível populacional, não refletindo diretamente infertilidade clínica diagnosticada. As estimativas foram extraídas individualmente para cada país e ano, sendo posteriormente divididas pelo número total de mulheres em idade reprodutiva (15 a 49 anos), conforme registrado na base demográfica das Nações Unidas. O resultado foi expresso como o número de mulheres inférteis dividido por mil mulheres em idade reprodutiva.

2. **Ciclos de Reprodução Assistida (CRA_por_1000)**

O número de ciclos de reprodução assistida corresponde ao total de procedimentos iniciados, incluindo fertilização in vitro (FIV) e inseminação artificial, sendo cada tentativa completa contabilizada como um ciclo. Esses dados foram extraídos de fontes nacionais e regionais, como:

- Red Latino Americana de Reprodução Assistida (REDLARA): com os seguintes filtros registro / registros anuais / acesso aos relatórios dos anos correspondentes
- Sistema Nacional de Produção de Embriões (SISEMBRIO): painel disponível com as informações.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC): accessing NASS Data ou National ART Summary/ filtros de acordo com o ano
- European Society of Human Reproduction and Embryology (ESHRE):Data collection / consortia / EIM / ESHRE Publications and reports / relatórios disponibilizados por ano.
- International Committee for Monitoring Assisted Reproductive Technologies (ICMART): reports / world reports (published) / escolher o ano
- Canadian Fertility & Andrology Society: guidelines e resources /cartr reports / filtro do ano correspondente
- African Network and Registry for Assisted (ANARA): resources / publications

Após a coleta, o número absoluto de ciclos foi dividido por mil mulheres em idade reprodutiva (15 a 49 anos), conforme os dados populacionais das Nações Unidas.

3. **Taxa de Crescimento Populacional (TGP)**

A taxa de crescimento populacional anual foi extraída diretamente da base de dados das Nações Unidas. Por se tratar de um valor percentual, foi convertida em número absoluto para

fins de compatibilidade com a fórmula proposta para o IDT, permitindo sua integração com as demais variáveis de forma proporcional e comparável.

## 3.5 Análise de Dados

O processo analítico foi estruturado em etapas sequenciais e complementares, iniciando-se pela caracterização descritiva dos dados e avançando para análises bivariadas, modelagem multivariada, agrupamentos e classificação do índice em níveis interpretáveis.

A base de dados país também considerou e abrangeu variáveis de renda nacional bruta per capita (GNI per capita), taxa de fertilidade total (TFT) e proporção de nascimentos decorrentes de reprodução assistida (%RA) que considerou o número absoluto dos nascidos por reprodução assistida totais daquele país (utilizadas as mesmas bases de dados dos ciclos de reprodução assistida), dividido pelo número absoluto dos nascimentos totais (United Nation, Population Division, 2025), multiplicado por cem.

Para garantir comparabilidade entre países e anos, procedeu-se à padronização dos campos textuais e categóricos (como nomes de países e continentes) e à harmonização das unidades de medida.

Todas as variáveis numéricas foram convertidas para uma escala comum, variando de 0 a 1, por meio da padronização min-max. Esse procedimento garante que variáveis com unidades distintas possam ser comparadas e combinadas de forma proporcional, sem que uma sobreponha a outra em influência estatística. Além disso, a Taxa de Fertilidade Total (TFT) foi invertida após a padronização, de modo que valores mais altos passassem a representar menor fertilidade. Essa inversão foi necessária para alinhar a interpretação da variável à lógica do índice, em que menor fertilidade está associada a maior dependência de tecnologias de reprodução assistida.

O IDT-H foi construído a partir da média geométrica dessas três dimensões padronizadas (GNI*, %RA*, TFT†), representando de forma integrada o nível de dependência tecnorreprodutiva.

Valores mais próximos de 1 indicam contextos de alta dependência (alta renda, baixa fertilidade e maior uso de reprodução assistida), enquanto valores próximos de 0 refletem baixa dependência.

Inicialmente, realizou-se a análise descritiva dos dados, apresentando estatísticas de tendência central e dispersão (média, desvio-padrão, mediana e intervalo interquartil), além de valores mínimo e máximo das variáveis principais, estratificadas por continente e por ano.

As relações entre o IDT-H e cada uma das variáveis constituintes foram exploradas por meio de gráficos de dispersão, acompanhados de curvas de suavização (loess) e correlações de Spearman, de forma a identificar padrões de associação não lineares.

A etapa seguinte envolveu a abordagem multivariada, com aplicação de Análise de Componentes Principais (PCA) sobre as variáveis GNI, TFT, %RA e IDT-H, com o objetivo de reduzir a dimensionalidade e identificar eixos dominantes de variação entre os países.

Sobre os componentes principais, foi aplicado o método de agrupamento k-means, de forma a capturar padrões consistentes de dependência tecnorreprodutiva.

Essa escolha refletiu a presença empírica de três perfis: países de baixa, intermediária e alta dependência.

As médias das variáveis dentro de cada grupo foram utilizadas para caracterizar os perfis e calcular faixas de referência do índice.

A partir dos valores medianos do IDT-H em cada cluster, foram definidos pontos de corte aproximados que permitiram classificar os países em níveis baixo, intermediário e alto de dependência.

As visualizações incluíram gráficos de dispersão, boxplots do IDT-H por nível e por continente, mapas temáticos e a representação bidimensional da PCA colorida pelos clusters.

Todas as análises foram realizadas no ambiente RStudio, adotando-se nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

## 4. RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta a descrição inicial da amostra analisada (painel país-ano de 2012 a 2019) e das variáveis que compõem o índice IRACRAN (participação de nascimentos por reprodução assistida no total de nascimentos), além de correlatas demográficas/econômicas. Essa caracterização geral fornece o pano de fundo para as análises subsequentes.

O painel é quase balanceado: a maioria dos países possui 8 observações (2012–2019); exceção para a Eslováquia (3 observações). No total, são 523 registros distribuídos principalmente na Europa (55,6%), seguidos por América do Sul (18,4%), África (12,2%), Ásia (6,1%), América do Norte (3,1%), Oceania (3,1%) e América Central (1,5%). A distribuição anual é uniforme (=12,4–12,6% por ano).

O número total de nascimentos apresentou mediana de 200 mil (IQR: 61 mil–670 mil). A média foi de 1,2 milhão, com desvio-padrão de 3,7 milhões, e os valores variaram entre 4.032 e 25 milhões de nascimentos. O número de nascimentos por reprodução assistida apresentou mediana de 1.722 (IQR: 403–6.373). A média foi de aproximadamente 10 mil nascimentos, com desvio-padrão em torno de 30 mil, e os valores observados variaram entre 10 e 370 mil nascimentos. A proporção de nascimentos por reprodução assistida apresentou mediana de 2% (IQR: 0,3%–3%), com média de 2% e desvio-padrão de 2%; os valores mínimos e máximos observados foram 0,001% e 20%, respectivamente. A renda nacional bruta per capita apresentou mediana de US$ 25 mil (IQR: US$ 13 mil–43 mil), média de US$ 29 mil e desvio-padrão de US$ 18 mil, com valores variando entre US$ 1.650 e US$ 83 mil. A taxa de fecundidade total apresentou mediana de 1,7 (IQR: 1,5–2,1), média de 2,0 e desvio-padrão de 0,9, com valores entre 0,9 e 5,8. A taxa de infertilidade por 1.000 mulheres apresentou mediana de 27,5 (IQR: 16,9–45,5), média de 32,7 e desvio-padrão de 20,6, com variação de 2,0 a 87,9; foram analisadas 520 observações, com 3 valores ausentes. O número de ciclos de reprodução assistida por 1.000 mulheres apresentou mediana de 2,7 (IQR: 0,4–6,5), média de 4,1 e desvio-padrão de 4,3, com valores variando entre 0,001 e 18,3; também foram consideradas 520 observações, com 3 valores ausentes. Por fim, a taxa de crescimento populacional apresentou mediana de 0,7% (IQR: −0,01%–1,3%), média de 0,7% e desvio-padrão de 1,0%, com valores observados entre −3,5% e 4,2%.

A presença de caudas longas em contagens e razões (nascimentos totais, nascimentos por RA, CRA_por_1000, TI_por_1000) justifica a normalização por goalposts (p5–p95) e a média geométrica no IRACRAN (Indice de representatividade da reprodução assistida nos nascimentos), correspondente à proporção de nascidos vivos oriundos de técnicas de reprodução

assistida (RA) em relação ao total de nascimentos registrados em determinado contexto geográfico e temporal, bem como transformações logarítmicas ou padronização em regressões.

A amostra cobre adequadamente 2012–2019 e revela grande heterogeneidade entre países e continentes nas dimensões centrais do índice (infertilidade, oferta/uso de RA e dinâmica populacional). Essa variabilidade é a base para investigar diferenças regionais e validar o IRACRAN nas análises seguintes (Tabela 1).

**Tabela 2.** Caracterização descritiva do painel país-ano e das variáveis do IRACRAN (2012–2019; N = 523).

| **Variáveis – Categorias - Descritiva** | | **N = 523**[1] |
|---|---|---|
| **País** | Albânia | 8 (1.5%) |
| | Argentina | 8 (1.5%) |
| | Armenia | 8 (1.5%) |
| | Australia | 8 (1.5%) |
| | Áustria | 8 (1.5%) |
| | Bielorrússia | 8 (1.5%) |
| | Bélgica | 8 (1.5%) |
| | Benin | 8 (1.5%) |
| | Bolívia | 8 (1.5%) |
| | Brasil | 8 (1.5%) |
| | Bulgária | 8 (1.5%) |
| | Camerões | 8 (1.5%) |
| | Canadá | 8 (1.5%) |
| | Chile | 8 (1.5%) |
| | China | 8 (1.5%) |
| | Colômbia | 8 (1.5%) |
| | República Tcheca | 8 (1.5%) |
| | Dinamarca | 8 (1.5%) |
| | Equador | 8 (1.5%) |
| | Egito | 8 (1.5%) |
| | Estônia | 8 (1.5%) |
| | Finlândia | 8 (1.5%) |
| | França | 8 (1.5%) |
| | Alemanha | 8 (1.5%) |
| | Grecia | 8 (1.5%) |
| | Guatemala | 8 (1.5%) |
| | Hungria | 8 (1.5%) |
| | Islândia | 8 (1.5%) |
| | Índia | 8 (1.5%) |
| | Irlanda | 8 (1.5%) |
| | Itália | 8 (1.5%) |
| | Japão | 8 (1.5%) |
| | Letônia | 8 (1.5%) |

| | | |
|---|---|---|
| | Lituânia | 8 (1.5%) |
| | Luxembourg | 8 (1.5%) |
| | Malta | 8 (1.5%) |
| | México | 8 (1.5%) |
| | Montenegro | 8 (1.5%) |
| | Marrocos | 8 (1.5%) |
| | Países Baixos | 8 (1.5%) |
| | Nova Zelândia | 8 (1.5%) |
| | Nigéria | 8 (1.5%) |
| | Macedônia do Norte | 8 (1.5%) |
| | Noruega | 8 (1.5%) |
| | Panamá | 8 (1.5%) |
| | Paraguai | 8 (1.5%) |
| | Peru | 8 (1.5%) |
| | Polônia | 8 (1.5%) |
| | Portugal | 8 (1.5%) |
| | República da Coreia | 8 (1.5%) |
| | Romenia | 8 (1.5%) |
| | Federeção Russa | 8 (1.5%) |
| | Sérvia | 8 (1.5%) |
| | Eslováquia | 3 (0.6%) |
| | Eslovênia | 8 (1.5%) |
| | África do Sul | 8 (1.5%) |
| | Espanha | 8 (1.5%) |
| | Suécia | 8 (1.5%) |
| | Suíça | 8 (1.5%) |
| | Togo | 8 (1.5%) |
| | Tunísia | 8 (1.5%) |
| | Ucrânia | 8 (1.5%) |
| | Reino Unido | 8 (1.5%) |
| | Estados Unidos da América | 8 (1.5%) |
| | Uruguai | 8 (1.5%) |
| | Venezuela | 8 (1.5%) |
| | Total | 523 (100.0%) |
| **Continente** | Europa | 291 (55.6%) |
| | América do Sul | 96 (18.4%) |
| | África | 64 (12.2%) |
| | Ásia | 32 (6.1%) |
| | América do Norte | 16 (3.1%) |
| | Oceania | 16 (3.1%) |
| | América Central | 8 (1.5%) |
| | Total | 523 (100.0%) |
| **Ano** | 2012 | 66 (12.6%) |
| | 2013 | 66 (12.6%) |
| | 2014 | 66 (12.6%) |
| | 2015 | 65 (12.4%) |
| | 2016 | 65 (12.4%) |
| | 2017 | 65 (12.4%) |

| | | |
|---|---|---|
| | 2018 | 65 (12.4%) |
| | 2019 | 65 (12.4%) |
| | Total | 523 (100.0%) |
| **Nascimentos Totais** | Min / Max | 4032.0 / 2.5e+07 |
| | Med [IQR] | 2.0e+05 [6.1e+04;6.7e+05] |
| | Média (std) | 1.2e+06 (3.7e+06) |
| | N (NA) | 523 (0) |
| **Nascimentos por Reprodução Assistida (RA)** | Min / Max | 10.0 / 3.7e+05 |
| | Med [IQR] | 1722.0 [403.0;6373.0] |
| | Média (std) | 1.0e+04 (3.0e+04) |
| | N (NA) | 523 (0) |
| **Nascidos RA x Totais (%)** | Min / Max | 1.2e-05 / 0.2 |
| | Med [IQR] | 0.02 [0.003;0.03] |
| | Média (std) | 0.02 (0.02) |
| | N (NA) | 523 (0) |
| **GNI per capita** | Min / Max | 1650.0 / 8.3e+04 |
| | Med [IQR] | 2.5e+04 [1.3e+04;4.3e+04] |
| | Média (std) | 2.9e+04 (1.8e+04) |
| | N (NA) | 523 (0) |
| **Taxa de Fertilidade Total** | Min / Max | 0.9 / 5.8 |
| | Med [IQR] | 1.7 [1.5;2.1] |
| | Média (std) | 2.0 (0.9) |
| | N (NA) | 523 (0) |
| **Taxa de Infertilidade por 1000 (TI)** | Min / Max | 2.0 / 87.9 |
| | Med [IQR] | 27.5 [16.9;45.5] |
| | Média (std) | 32.7 (20.6) |
| | N (NA) | 520 (0) |
| **Ciclo Reprodução Assistida por 1000** | Min / Max | 0.001 / 18.3 |
| | Med [IQR] | 2.7 [0.4;6.5] |
| | Média (std) | 4.1 (4.3) |
| | N (NA) | 520 (0) |
| **Taxa de crescimento populacional (TGP %)** | Min / Max | -3.5 / 4.2 |
| | Med [IQR] | 0.7 [-0.01;1.3] |
| | Média (std) | 0.7 (1.0) |
| | N (NA) | 523 (0) |

**[1] n (%)**

a – Para variáveis qualitativas, n (%); Média;

Min: Mínimo, Max: Máximo, IQR: Intervalo *Interquartil;*

A figura 1 apresenta os boxplots que as variáveis de contagem/valor (Nascimentos Totais, Nascimentos por RA e GNI per capita) apresentam forte assimetria à direita e muitos outliers altos.

Em especial, Nascimentos Totais concentra-se em valores relativamente baixos para a maioria dos países, mas há observações muito elevadas (países mais populosos), o que amplia o intervalo e “achata” visualmente as demais variáveis no eixo x. Nascimentos por RA repete esse padrão, sugerindo grande heterogeneidade na magnitude dos programas de RA entre países/anos. GNI per capita exibe ampla dispersão, compatível com diferentes níveis de desenvolvimento econômico na amostra.

Entre as variáveis demográficas, a Taxa de Fecundidade Total (TFT) concentra-se majoritariamente entre ~1,5 e 2,1, com poucos valores altos, enquanto a Taxa de Crescimento Populacional (TGP_%) fica centrada próximo de zero, com presença de valores negativos (contração) e positivos (expansão), refletindo estágios distintos da dinâmica populacional. As métricas relacionadas à reprodução assistida mostram comportamentos distintos: CRA_por_1000 apresenta grande variação relativa (de valores próximos a zero até >15 por mil), indicando diferenças marcantes de oferta/uso de RA; já TI_por_1000 é mais concentrada, porém com cauda alta, sugerindo contextos em que a infertilidade atinge níveis elevados.

Implicações descritivas imediatas. (i) Em variáveis com grande magnitude e cauda longa (Nascimentos, GNI), medianas e IQR descrevem melhor o centro e a dispersão do que a média; (ii) comparações entre países/anos são sensíveis a outliers legítimos; (iii) para visualização complementar, é útil repetir estes boxplots em escala log10 para Nascimentos Totais, Nascimentos por RA e GNI, bem como apresentar versões estratificadas por continente e por faixas de renda (quartis de GNI), de modo a evidenciar padrões regionais e por nível socioeconômico (Figura 1).

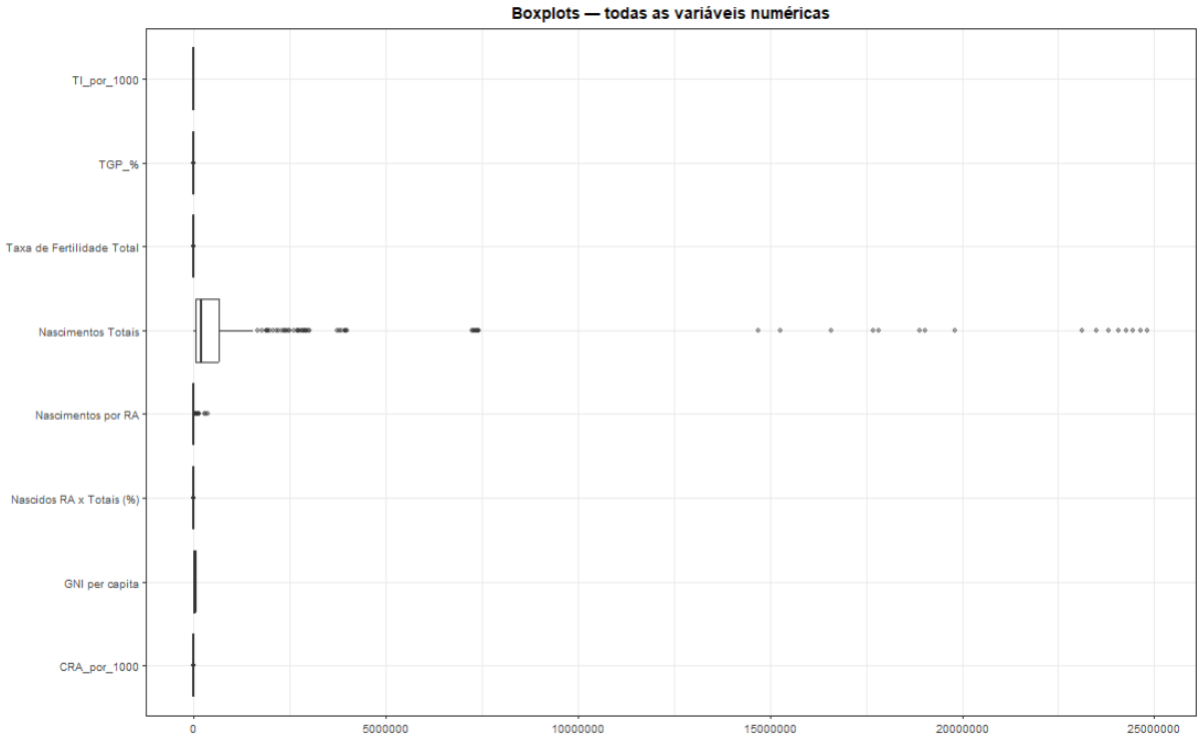



**Figura 1.** Boxplots das variáveis numéricas (2012–2019): distribuição, assimetria e outliers**.**

A Tabela 3 resume a evolução temporal (2012–2019) das variáveis com medianas anuais e intervalos interquartílicos (IQR = Q1–Q3), métricas mais robustas à assimetria e a outliers do que a média. Para cada variável, mostramos a Med [IQR] em 2012 e 2019; o Δ absoluto (2019 – 2012) e o Δ % (variação relativa em relação a 2012), que quantificam a magnitude da mudança no período; e o Teste global (p), que avalia se há diferenças entre anos considerando toda a série 2012–2019.

As unidades são: RA/Totais em proporção (0–1), CRA em ciclos por 1.000 mulheres, TI em casos por 1.000 mulheres, TGP em % ao ano, GNI em US$ correntes, TFT em filhos por mulher.

A composição da amostra manteve-se estável ao longo de todo o período: a distribuição por continente é praticamente idêntica em cada ano (Fisher, p=1,000), e o número de observações anuais é uniforme (=12,4–12,6% por ano). Essa estabilidade de composição permite comparar séries temporais sem viés de estrutura amostral.

Nos desfechos de magnitude populacional, Nascimentos Totais apresentam mediana próxima de 200 mil em todos os anos, com IQRs semelhantes e grande assimetria à direita; não

se observa tendência sistemática (Kruskal–Wallis, p=1,000), sugerindo que a variação entre países domina a variação no tempo.

Em Nascimentos por RA (contagem) há um incremento discreto da mediana, de 1.612 em 2012 para 1.944 em 2019 (=+21%), acompanhado de aumento de dispersão nos últimos anos (p=0,958).

A proporção de nascidos por RA sobre o total permanece estável em torno de 2% (p=0,699), indicando que, embora o volume absoluto de nascimentos por RA tenha crescido, sua participação relativa no total de nascimentos não se alterou de forma consistente no agregado.

Entre as variáveis demográficas centrais, observamos sinais coerentes com a transição demográfica: a Taxa de Fecundidade Total (TFT) mostra leve declínio da mediana (de 1,7 para 1,6) com estreitamento interquartil no final da série (ANOVA, p=0,776), enquanto a Taxa de Crescimento Populacional (TGP, % a.a.) permanece centrada próxima de 0,6–0,9% em todos os anos, com presença de valores negativos e positivos (ANOVA, p=0,999), caracterizando estabilidade global dessa dinâmica no horizonte analisado.

Nas variáveis diretamente ligadas ao acesso/necessidade de reprodução assistida, a TI_por_1000 (infertilidade por 1.000 mulheres em idade fértil) apresenta aumento leve da mediana (26,9 → 28,1; =+4%) e pequenas elevações na média (de 31,5 para 33,8), porém sem diferença global entre anos (p=0,999).

Em contraste, o CRA_por_1000 (ciclos por 1.000 mulheres em idade fértil) exibe a mudança mais nítida: a mediana mais que dobra ao longo do período (1,8 → 4,1; =+128%), e as médias anuais também crescem (3,2 → 4,9). Ainda que o teste global por postos não aponte diferença estatística (p=0,399), reflexo da elevada heterogeneidade entre países, o perfil monotônico de medianas descreve uma expansão substantiva da oferta/uso de RA no agregado internacional.

Nos indicadores contextuais, o GNI per capita apresenta tendência de alta: a mediana evolui de cerca de US$ 21 mil (2012) para US$ 31 mil (2019) (=+48%), apesar do p-valor não significativo no teste global (p=0,274), novamente por forte dispersão entre países.

Em síntese, os dados de 2012–2019 mostram um quadro estável de composição e evidências consistentes de expansão do CRA_por_1000, combinadas a ganhos econômicos (GNI), leve queda da TFT, aumento modesto da TI_por_1000 e estabilidade da TGP.

Do ponto de vista descritivo, portanto, sugere-se que a oferta/uso de RA cresceu de maneira monotônica na mediana global, enquanto a participação relativa da RA nos nascimentos se manteve estável e os fundamentos demográficos (crescimento e fecundidade) mudaram apenas moderadamente no período.

Para comunicação sintética, recomendamos uma tabela-resumo com medianas de 2012 e 2019, variação absoluta e relativa e o p-valor do teste global por variável, destacando especialmente o ganho em CRA_por_1000 e em GNI per capita (Tabela 3).

**Tabela 3.** Evolução temporal (2012–2019): resumo por variável (medianas, IQR, Δ e teste global):

| Variável | 2012 Med [IQR] | 2019 Med [IQR] | Δ abs (2012→2019) | Δ % | Teste global (p) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Nascimentos Totais** | 2,0e5 [6,2e4; 6,5e5] | 2,0e5 [6,1e4; 6,3e5] | ~0 | ~0% | Kruskal–Wallis (p=1,000) |
| **Nascimentos por RA** | 1.612 [379; 5.774] | 1.944 [579; 7.037] | 332 | 21% | Kruskal–Wallis (p=0,958) |
| **RA / Totais (%)** | 0,02 [0,003; 0,03] | 0,02 [0,004; 0,04] | ~0,00 | ~0% | Kruskal–Wallis (p=0,699) |
| **CRA por 1.000 mulheres** | 1,8 [0,4; 4,7] | 4,1 [0,8; 7,4] | 2,3 | 128% | Kruskal–Wallis (p=0,399) |
| **TI por 1.000 mulheres** | 26,9 [15,7; 44,9] | 28,1 [18,8; 46,7] | 1,2 | 4% | Kruskal–Wallis (p=0,999) |
| **TGP (%)** | 0,6 [0,01; 1,3] | 0,6 [−0,004; 1,4] | 0 | 0% | ANOVA (p=0,999) |
| **TFT** | 1,7 [1,5; 2,2] | 1,6 [1,4; 1,9] | −0,1 | −6% | ANOVA (p=0,776) |
| **GNI per capita (US$)** | 2,1e4 [1,1e4; 3,8e4] | 3,1e4 [1,5e4; 5,0e4] | 1,00E+04 | 48% | Kruskal–Wallis (p=0,274) |

**Notas:** Mediana e IQR (Q1–Q3) por ano; Δ=2019−2012 (absoluto e relativo sobre 2012). P-values dos testes globais consideram todos os anos (2012–2019). Unidades: RA/ Totais em proporção (0–1), CRA em ciclos/1.000 mulheres, TI em casos/1.000 mulheres, TGP em % a.a., GNI em US$ correntes, TFT em filhos por mulher.

A comparação entre continentes, apresentado na Tabela 4, revela diferenças substanciais em renda, dinâmica demográfica e indicadores ligados à reprodução assistida, todas estatisticamente significativas (Kruskal–Wallis, $p < 0,0001$ para as variáveis centrais).

Oceania apresenta os maiores níveis de oferta/uso de RA: CRA/1000 mediana 7,9 (IQR 4,5–12,4) e Nascidos RA/Total em torno de 4% (IQR 2%–5%). A infertilidade é a mais baixa (mediana 4,5/1000), a renda é elevada (GNI pc mediana US$ 43 mil) e a fecundidade é baixa (TFT = 1,9). A TGP é relativamente alta (1,6%), refletindo crescimento populacional positivo.

Europa exibe CRA/1000 alto (mediana 5,0; IQR 2,6–8,5) e Nascidos RA/Total de 3% (2%–4%), com GNI pc mediano US$ 34 mil. A infertilidade é elevada (mediana 36,4/1000, com cauda alta), TFT baixa (1,6) e crescimento próximo de zero (TGP mediana 0,1%), compondo um quadro de demanda potencialmente alta por RA combinada abaixo crescimento natural.

A América do Norte também mantém CRA/1000 elevado (mediana 3,6; IQR 3,1–4,1) e proporção de nascidos por RA =2% (estreita). A infertilidade é baixa a moderada (mediana 10,9/1000), renda muito alta (GNI pc US$ 51 mil) e TFT baixa (1,7), com TGP = 0,9%–1,0%.

Ásia é o continente mais heterogêneo: CRA/1000 mediana 3,1, mas com IQR 0,6–12,5, e Nascidos RA/Total mediano 3% (chegando a 10% nos quartis superiores). A infertilidade tem mediana 34,5/1000, porém com IQR muito amplo (14,0–79,9), evidenciando realidades nacionais bastante distintas. GNI pc mediano US$ 26 mil, TFT 1,4 e TGP 0,6%.

América do Sul mostra CRA/1000 baixo (mediana 0,3; 0,1–0,8) e Nascidos RA/Total em torno de 0,3% (0,09%–0,6%). A infertilidade é intermediária (mediana 21,1/1000), TFT 2,4 e TGP 1,4%; a renda é mediana US$ 14 mil. O perfil sugere demanda potencial com capacidade ainda limitada.

África tem o menor CRA/1000 (mediana 0,1; 0,04–0,3) e Nascidos RA/Total =0,09%, com infertilidade moderada (33,5/1000), TFT muito alta (4,2) e TGP elevado (2,3%). GNI pc mediano US$ 6,2 mil. O descompasso entre necessidade e oferta é o mais pronunciado.

América Central (amostra pequena, n=8) apresenta CRA/1000 0,3 (0,3–0,5), Nascidos RA/Total 0,3%, infertilidade alta (47,9/1000, IQR estreito), TFT 2,2 e GNI pc em US$ 19 mil.

Em síntese, há um gradiente claro: Oceania/Europa/Am. do Norte concentram alta oferta/uso de RA, renda elevada e baixa fecundidade; Am. Latina/África/Am. Central combinam baixa oferta de RA com infertilidade não desprezível e maior fecundidade/crescimento; Ásia mistura ambos os mundos, com grande heterogeneidade interna (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resumo por continente (medianas; IQR entre colchetes):

| Variável | África | Am. Central | Am. do Norte | Am. do Sul | Ásia | Europa | Oceania |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CRA/1000 | 0,1 [0,04–0,3] | 0,3 [0,3–0,5] | 3,6 [3,1–4,1] | 0,3 [0,1–0,8] | 3,1 [0,6–12,5] | 5,0 [2,6–8,5] | 7,9 [4,5–12,4] |
| TI/1000 | 33,5 [21,7–40,1] | 47,9 [47,3–48,1] | 10,9 [9,6–20,2] | 21,1 [7,2–32,7] | 34,5 [14,0–79,9] | 36,4 [22,5–53,4] | 4,5 [2,4–6,4] |
| RA/Total (%) | 0,09 [0,01–0,4] | 0,3 [0,2–0,3] | 2,0 [2,0–2,0] | 0,3 [0,09–0,6] | 3,0 [0,4–10,0] | 3,0 [2,0–4,0] | 4,0 [2,0–5,0] |
| GNI pc (US$) | 6.175 [3.100–11.000] | 19.000 [18.000–20.000] | 51.000 [46.000–58.000] | 14.000 [11.000–20.000] | 26.000 [10.000–41.000] | 34.000 [23.000–48.000] | 43.000 [38.000–46.000] |
| TFT (filhos/mulher) | 4,2 [2,4–5,0] | 2,2 [2,1–2,3] | 1,7 [1,6–1,8] | 2,4 [2,0–2,6] | 1,4 [1,3–1,8] | 1,6 [1,4–1,7] | 1,9 [1,8–1,9] |
| TGP (% a.a.) | 2,3 [1,3–2,7] | 1,0 [0,9–1,2] | 0,9 [0,9–1,1] | 1,4 [0,9–1,6] | 0,6 [0,2–1,0] | 0,1 [−0,3–0,6] | 1,6 [1,5–1,9] |

**Notas:** Valores são medianas por continente; IQR (Q1–Q3) entre colchetes. Unidades: CRA em ciclos por 1.000 mulheres; TI em casos por 1.000 mulheres; RA/Total em %; GNI em US$ correntes; TGP em % ao ano; TFT em filhos por mulher. Diferenças entre continentes foram significativas (Kruskal–Wallis $p < 0,0001$) para as variáveis apresentadas.

A figura 2 sintetiza as distribuições por continente e confirma o gradiente observado nas tabelas.

Nos indicadores diretamente ligados à reprodução assistida, nota-se que Oceania e Europa concentram os níveis mais altos de oferta/uso: os boxplots de CRA_por_1000 e da proporção de Nascidos RA/Total deslocam-se para valores superiores, com faixas interquartílicas elevadas, enquanto América do Norte mantém patamar alto e mais estável.

Em sentido oposto, África e América Latina apresentam concentrações próximas de zero para CRA_por_1000 e proporções baixas de nascidos por RA, e a América Central, embora com amostra pequena, posiciona-se no mesmo bloco de baixa oferta. A Ásia exibe a maior heterogeneidade: as caixas são largas e as caudas se estendem para cima, indicando países com níveis muito distintos de utilização de RA.

Esse desenho dialoga com a renda: os boxplots de GNI per capita são mais altos em Oceania, Europa e América do Norte, intermediários na Ásia e América do Sul e baixos em África, sugerindo que a capacidade econômica acompanha o maior uso de RA.

A dinâmica demográfica reforça esse quadro: as distribuições de TFT são mais altas em África e América do Sul e baixas em Europa, Ásia, América do Norte e Oceania; já o TGP% é positivo e elevado em África e Oceania, intermediário na América do Sul e próximo de zero, inclusive com valores negativos, na Europa, enquanto a Ásia permanece em baixos positivos.

Em infertilidade (TI_por_1000), Oceania e América do Norte situam-se em níveis baixos, ao passo que Europa e Ásia mostram valores mais altos e maior dispersão; África e América do Sul ocupam posições intermediárias.

Os painéis de Nascimentos Totais evidenciam o efeito de escala, sobretudo na Ásia, com caudas superiores muito longas, o que justifica a preferência por medidas robustas (mediana e IQR) e, quando necessário, escalas logarítmicas para comparação.

Em conjunto, os boxplots confirmam diferenças regionais marcantes, estatisticamente significativas nas variáveis centrais, e sustentam a leitura de que continentes de maior renda e menor fecundidade concentram maior oferta e uso de RA, enquanto regiões de menor renda, mesmo enfrentando infertilidade não desprezível, apresentam baixa disponibilidade relativa do serviço.

Assim, os boxplots reforçam um padrão estrutural: continentes de alta renda e baixa fecundidade (Oceania/Europa/Am. Norte) concentram maior oferta/uso de RA;

continentes com renda mais baixa e maior fecundidade (África/Am. Sul/Am. Central) exibem baixa oferta apesar de níveis não desprezíveis de infertilidade; Ásia combina realidades muito distintas.

Essas diferenças são estatisticamente significativas (Kruskal–Wallis $p<0,0001$ nas variáveis centrais) e explicam a heterogeneidade observada nas estatísticas globais (Figura 2).

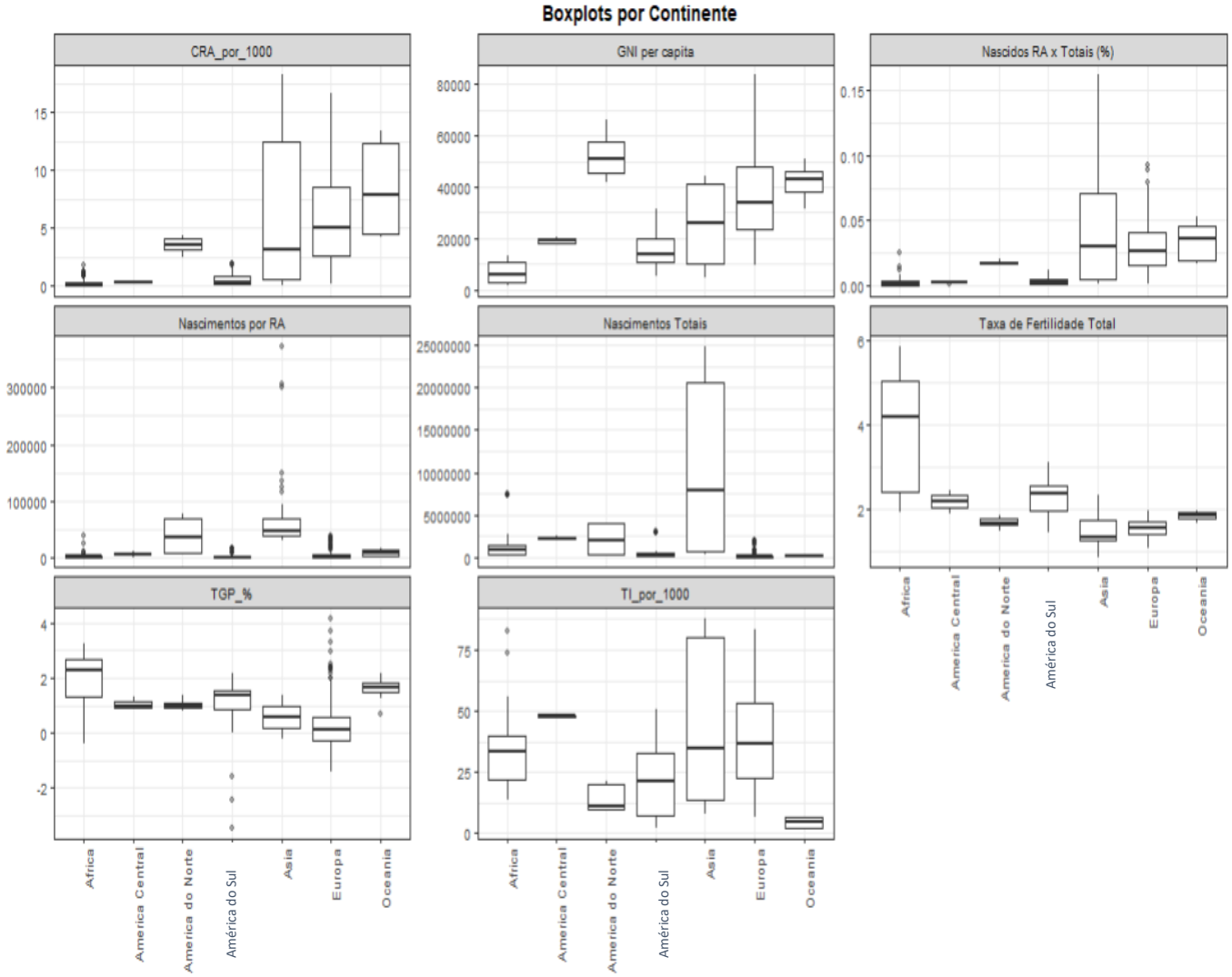



**Figura 2.** Boxplots por continente (2012–2019): padrões regionais de renda, dinâmica demográfica e reprodução assistida.

## 4.1 Índice

Trabalhou-se com um painel país-ano de 2012 a 2019 (N=523), com composição anual estável e predominância de observações da Europa, seguida por América do Sul, África, Ásia e demais regiões. Consideraram-se como variáveis centrais: TI_por_1000 (taxa de infertilidade), CRA_por_1000 (ciclos de RA por 1.000 mulheres), TGP_% (crescimento populacional), Nascimentos Totais, Nascimentos por RA, GNI per capita e TFT.

Na exploração inicial das distribuições (Figura 1 - Boxplots univariados das variáveis numéricas), identificou-se assimetria à direita e presença de outliers legítimos nas variáveis de contagem/montante (Nascimentos Totais, nascidos por RA, GNI).

Observou-se heterogeneidade ampla em CRA_por_1000 (valores próximos de zero até >15 por mil) e TI_por_1000 mais concentrada, porém com cauda superior. TGP_% distribuiu-se em torno de zero, refletindo países em contração e expansão demográfica, e TFT concentrou-se majoritariamente entre ~1,5 e 2,1.

Esses padrões justificam o uso de mediana e IQR como estatísticas robustas e apontam a necessidade de padronização antes de qualquer agregação.

A evolução temporal (Tabela 3) mostrou expansão consistente de CRA_por_1000 (mediana ~1,8→4,1; =+128%) e aumento do GNI (=+48% em média), além de leve queda de TFT (1,7→1,6). TI_por_1000 apresentou elevação suave (=26,9→28,1), enquanto TGP_% permaneceu estável em torno de 0,7% ao ano.

Esses sinais temporais indicam mudanças estruturais na oferta/uso de RA e no contexto socioeconômico, reforçando a conveniência de normalizadores globais (ao invés de específicos por ano) para permitir comparabilidade longitudinal.

A comparação entre continentes (Tabela 4; Figura 2 - Boxplots por continente) evidenciou um gradiente nítido: Oceania, Europa e América do Norte concentram maior oferta/uso de RA e maior renda, enquanto América do Sul, África e América Central exibem baixa oferta a despeito de infertilidade não trivial; Ásia apresenta heterogeneidade interna acentuada.

Tais contrastes regionais corroboram a futura inclusão de efeitos fixos ou, ao menos, a avaliação de robustez por recorte geográfico quando se modelam associações.

A matriz de correlação (Tabela 5; Figura 3) confirmou relações fortes e alinhadas ao racional do estudo.

Verificou-se correlação muito alta entre CRA_por_1000 e Nascidos RA/Total ($\rho$=0,95; p≪0,001), indicando que ambos capturam o mesmo eixo de capacidade/uso relativo de RA no sistema. De forma consistente, observou-se correlação elevada entre GNI per capita e CRA_por_1000 ($\rho$=0,82; p≪0,001), bem como correlação moderada-alta entre GNI e Nascidos RA/Total ($\rho$=0,77; p≪0,001), sugerindo que níveis de renda mais altos se associam a maior acesso tecnológico e maior participação da RA entre os nascimentos.

No sentido oposto, a TFT apresentou correlação negativa com CRA_por_1000 ($\rho$=−0,59; p≪0,001) e com Nascidos RA/Total ($\rho$=−0,63; p≪0,001), padrão compatível com a transição demográfica (fertilidade mais baixa associada a maior uso relativo de RA).

O TGP_% também se correlacionou negativamente com CRA_por_1000 ($\rho$=−0,37; p≪0,001). Em contrapartida, TFT e TGP_% exibiram correlação positiva e forte entre si ($\rho$=0,67; p≪0,001), refletindo coerência interna entre os indicadores demográficos.

As variáveis de porte do sistema apresentaram relações estatisticamente muito significativas, porém com magnitudes moderadas: Nascimentos Totais correlacionou-se negativamente com Nascidos RA/Total ($\rho$=−0,37; p≪0,001) e com CRA_por_1000 ($\rho$=−0,39; p≪0,001), e positivamente com TFT ($\rho$=0,36; p≪0,001) e TGP_% ($\rho$=0,30; p≪0,001). Esses achados sugerem que países com maiores volumes absolutos tendem, em média, a apresentar participações relativas e razões per capita de RA menores, além de maior fertilidade—mas, crucialmente, tais correlações não dominam a estrutura quando trabalhamos com medidas normalizadas e per capita, reduzindo o risco de que um índice sintético reflita apenas o tamanho populacional.

Por fim, TI_por_1000 exibiu correlações fracas a muito fracas com a maioria das variáveis (por exemplo, $\rho$=−0,09 com GNI, p=0,032; $\rho$=−0,04 com CRA_por_1000, p=0,31), e uma associação moderada e negativa com TGP_% ($\rho$=−0,34; p≪0,001). Em termos práticos, TI_por_1000 tem baixo peso estrutural neste conjunto, ao contrário do trio CRA_por_1000, Nascidos RA/Total e GNI, que formam o núcleo das relações observadas.

Os modelos de regressão com coeficientes padronizados ($\beta^*$) sintetizaram as relações condicionais entre preditores e desfecho, permitindo comparar magnitudes em unidades de desvio-padrão.

Modelos bivariados (uma covariável por vez; n = 520). Observou-se um gradiente claro: o crescimento populacional (TGP_%) apresentou associação negativa e estatisticamente muito expressiva com o desfecho (β* = −0,328; p <0,001; $R^2$ = 0,108), seguido pelo porte do sistema (Nascimentos Totais), também negativo (β* = −0,260; p <0,001; $R^2$ = 0,068).

Já Nascidos por RA (absoluto) mostrou efeito positivo, porém pequeno e não significativo ao nível de 5% (β* = +0,077; p = 0,079; $R^2$ = 0,006), enquanto TI_1000 apresentou associação negativa discreta e não significativa (β* = −0,069; p = 0,117; $R^2$ = 0,005).

Em termos substantivos, sem controles adicionais, países com maior crescimento populacional e maior porte tendem a exibir níveis mais baixos do fenômeno relativo estudado.

Modelo múltiplo padronizado (quatro preditores). Ao incluir simultaneamente TI_1000, TGP%, Nascimentos Totais e Nascidos por RA (absoluto), o ajuste global foi moderado ($R^2$ = 0,216; $R^2$_aj = 0,210).

Os efeitos mantiveram coerência com as correlações: Nascimentos Totais (β* = −0,342; p < 0,001) e TGP% (β* = −0,302; p<0,001) permaneceram negativos e de magnitude relevante; nascidos por RA (absoluto) tornou-se positivo e significativo (β* = +0,277; p = 0,009); e TI_1000 manteve efeito negativo pequeno, porém estatisticamente significativo (β* = −0,097; p = 0,031). Os diagnósticos indicaram baixa colinearidade (VIF = 1,2–1,75) e erros-padrão robustos (HC3) confirmaram a significância dos principais coeficientes.

Modelo múltiplo com efeitos fixos de Continente. Com a inclusão de dummies de Continente, observou-se ganho substancial de ajuste ($R^2$ = 0,689; $R^2$_aj = 0,682), evidenciando heterogeneidade estrutural entre regiões.

Neste enquadramento, Nascimentos Totais manteve-se como determinante estável e negativo (β* = −0,383; p < 0,001), nascidos por RA (absoluto) permaneceu positivo e significativo (β* = +0,128; p = 0,030) e TI_1000 seguiu negativo, com pequena magnitude (β* = −0,080; p = 0,020).

Notavelmente, o sinal de TGP% inverteu para positivo dentro de continentes (β* = +0,157; p < 0,001), sugerindo que o efeito negativo observado sem efeitos fixos refletia, em parte, diferenças de composição regional.

Em outras palavras, comparações entre continentes captam um estágio da transição demográfica distinto daquele observado dentro de cada região, onde contextos institucionais e de oferta podem alterar a direção da associação.

O porte do sistema exerce efeito freio consistente sobre o desfecho, independentemente da especificação. O gradiente demográfico (TGP%) é sensível à estrutura regional, negativo sem controles regionais, positivo quando comparamos países dentro do mesmo continente.

E por fim, nascidos por RA (absoluto) agrega informação relevante mesmo após controlar por porte e demografia, enquanto TI_1000 contribui de forma modesta.

A baixa colinearidade e a consistência sob erros-padrão robustos conferem solidez às inferências e orientam especificações futuras: separar métricas de porte de indicadores relativos/per capita, testar modelos com e sem efeitos fixos regionais e acompanhar o comportamento de TGP% por estratos geográficos.

**Nota:** Coeficiente padronizado (β*): mede o impacto em desvios-padrão do desfecho (y) associado a um aumento de +1 desvio-padrão no preditor, mantidos os demais constantes (no modelo múltiplo).

- Sinal: positivo → *y* tende a aumentar; negativo → *y* tende a diminuir.
- Magnitude: |β*| maior implica efeito mais forte e comparável entre variáveis (por estarem na mesma escala).

*p*-valor: $p < 0,05$: evidência estatística de que o efeito não é nulo (nível de 5%).

$R^2$ ajustado ($R^2$_aj): proporção da variabilidade explicada pelo modelo; comparável entre modelos com números diferentes de covariáveis; quanto maior, melhor o ajuste sem inflar artificialmente por adicionar variáveis.

Para explorar estruturas de grupo ao longo de cada eixo, aplicaram-se clusters unidimensionais (k-means 1D) por variável, com centros indicados por linhas verticais e faixas representando intervalos de cluster Figura 4.

Em CRA_por_1000, delinearam-se três faixas empíricas: um cluster inferior (~0–1/1.000; grande parte de África e América do Sul), um intermediário (~2–8/1.000; parcela da Europa e da Ásia) e um superior (~8–18/1.000; Europa/Oceania de alta renda e alguns asiáticos).

Em TI_por_1000, observaram-se estratos de baixa, média e alta infertilidade; Europa e África concentraram-se em faixas médias, Oceania no estrato inferior, e Ásia apresentou a maior dispersão. Em TGP os clusters separaram países em contração, estabilidade e expansão; Europa mostrou-se majoritariamente em crescimento baixo ou negativo, enquanto África e América do Sul se distribuíram nos estratos positivos.

Em GNI per capita, os clusters ordenaram o gradiente de renda, com Oceânia/América do Norte/Europa no topo e África na base, e Ásia novamente heterogênea.

Esses agrupamentos corroboram os contrastes regionais e, sobretudo, fornecem pontos de corte empíricos que justificam a adoção de goalposts percentílicos (p5–p95) na padronização, evitando que poucos outliers definam a escala.

Em síntese, a análise exploratória, distribuída em sumários anuais e regionais, correlações, modelos de regressão e clusters, produziu evidências consistentes para a etapa de padronização: as variáveis apresentam escalas e caudas heterogêneas, dois eixos substantivos bem definidos (uso/capacidade de RA e desenvolvimento) e contrastes regionais pronunciados, ao mesmo tempo em que não há indicação de que o futuro índice, uma vez normalizado, venha a ser dominado por porte populacional.

Com base nessas evidências, avançar-se-á para a padronização tipo-IDH com goalposts p5–p95 e clamping, respeitando a direcionalidade substantiva (CRA direto; TI e TGP invertidos), passo necessário para que, posteriormente, se componha o índice sintético de forma comparável entre países e ao longo do tempo.

**Tabela 5.** Correlações entre variáveis (ρ de Pearson, p-valor):

| Variável 1 | Variável 2 | Coeficiente de Correlação (ρ) | p-valor | Interpretação da Correlação |
|---|---|---|---|---|
| Nasc_RA_Totais | CRA_1000 | 0,954 | <0,001 | Positiva, muito forte, altamente significativa |
| GNI_pc | CRA_1000 | 0,817 | <0,001 | Positiva, muito forte, altamente significativa |
| Nasc_RA_Totais | GNI_pc | 0,774 | 0,002 | Positiva, muito forte, significativa |
| TFT | TGP_pct | 0,67 | <0,001 | Positiva, forte, altamente significativa |
| Nasc_RA_Totais | TFT | -0,627 | <0,001 | Negativa, forte, altamente significativa |
| TFT | CRA_1000 | -0,589 | <0,001 | Negativa, forte, altamente significativa |
| Nasc_totais | Nasc_ra | 0,566 | <0,001 | Positiva, forte, altamente significativa |
| GNI_pc | TFT | -0,509 | <0,001 | Negativa, forte, altamente significativa |
| Nasc_ra | Nasc_RA_Totais | 0,474 | <0,001 | Positiva, moderada, altamente significativa |
| Nasc_ra | CRA_1000 | 0,429 | <0,001 | Positiva, moderada, altamente significativa |
| Nasc_totais | CRA_1000 | -0,385 | <0,001 | Negativa, moderada, altamente significativa |
| Nasc_RA_Totais | TGP_pct | -0,375 | 0,001 | Negativa, moderada, altamente significativa |
| Nasc_totais | Nasc_RA_Totais | -0,372 | <0,001 | Negativa, moderada, altamente significativa |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nasc_ra | GNI_pc | 0,366 | <0,001 | Positiva, moderada, altamente significativa |
| CRA_1000 | TGP_pct | -0,365 | <0,001 | Negativa, moderada, altamente significativa |
| Nasc_totais | TFT | 0,355 | <0,001 | Positiva, moderada, altamente significativa |
| TI_1000 | TGP_pct | -0,341 | <0,001 | Negativa, moderada, altamente significativa |
| Nasc_totais | GNI_pc | -0,327 | <0,001 | Negativa, moderada, altamente significativa |
| Nasc_totais | TGP_pct | 0,303 | <0,001 | Positiva, moderada, altamente significativa |
| Nasc_ra | TFT | -0,275 | <0,001 | Negativa, fraca, altamente significativa |
| GNI_pc | TGP_pct | -0,155 | <0,001 | Negativa, fraca, altamente significativa |
| TFT | TI_1000 | -0,153 | <0,001 | Negativa, fraca, altamente significativa |
| Nasc_ra | TGP_pct | -0,134 | 0,002 | Negativa, fraca, significativa |
| GNI_pc | TI_1000 | -0,094 | 0,032 | Negativa, muito fraca, significativa |
| Nasc_ra | TI_1000 | 0,058 | 0,183 | Positiva, muito fraca, não significativa |
| TI_1000 | CRA_1000 | -0,044 | 0,312 | Negativa, muito fraca, não significativa |
| Nasc_RA_Totais | TI_1000 | -0,023 | 0,594 | Negativa, muito fraca, não significativa |
| Nasc_totais | TI_1000 | 0,008 | 0,852 | Positiva, muito fraca, não significativa |

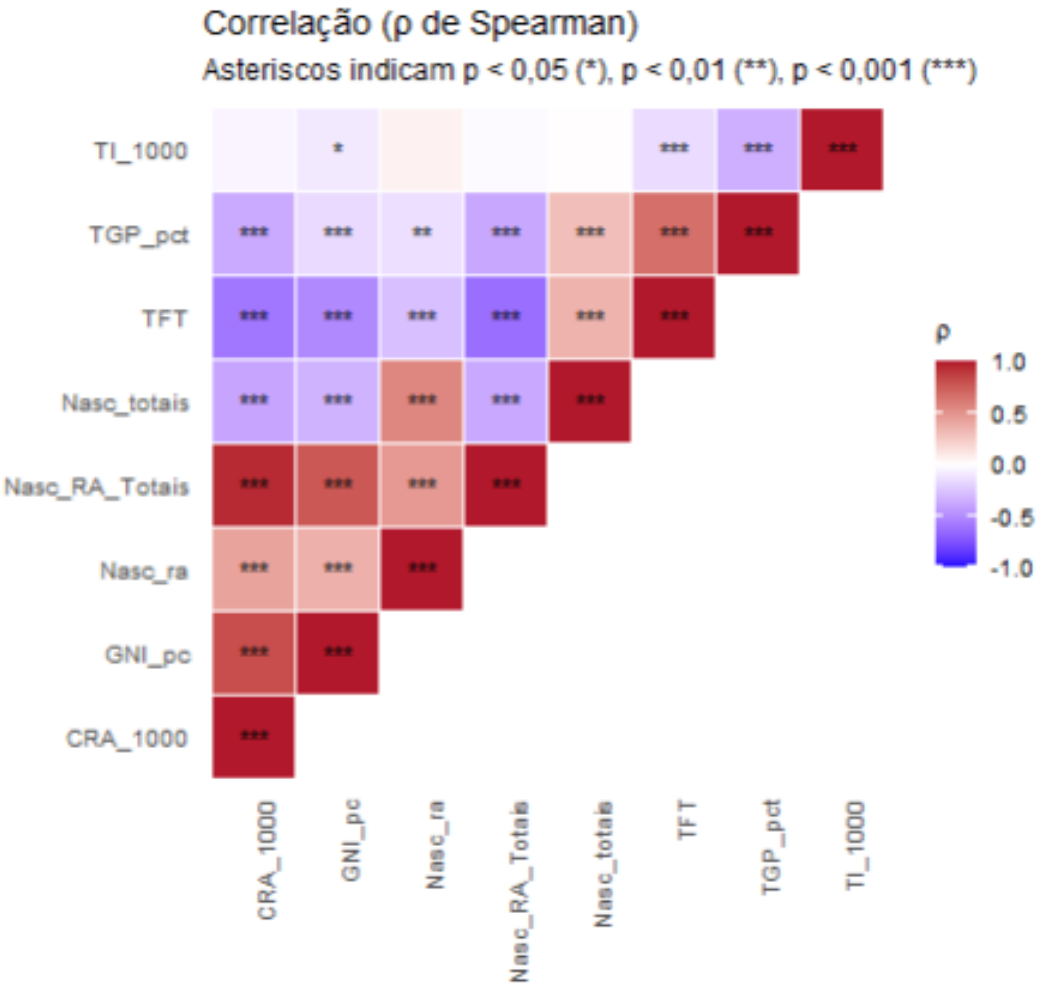



**Figura 3.** Matriz de correlação de Spearman entre as variáveis.

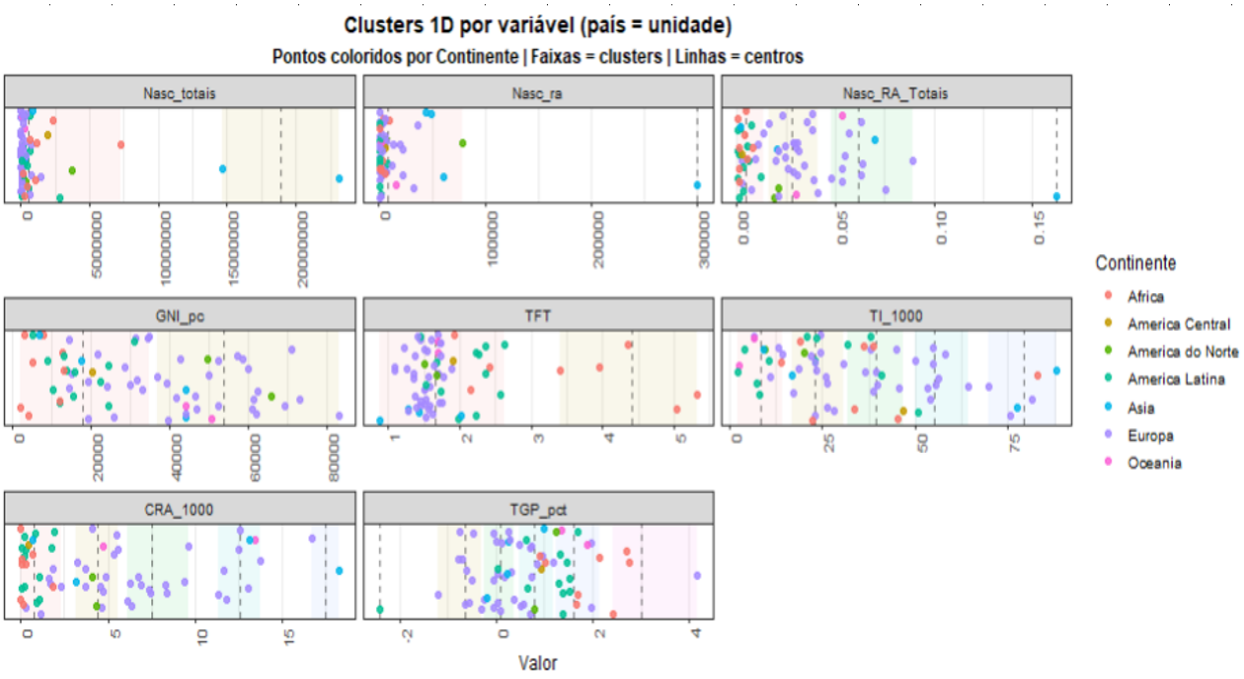



**Figura 4.** Clusters 1D por variável – País – Unidade amostral.
(pontos = país-ano; faixas = clusters; linhas = centros; cores = continentes).

**Nota:** Observam-se três estratos em CRA_por_1000 (~0–1; ~2–8; ~8–18 por mil), estratos de baixa/média/alta em TI_por_1000, e grupos de contração/estabilidade/expansão em TGP_%.
Os clusters alinham-se ao gradiente de renda e desenvolvimento por continente, justificando goalposts percentílicos (p5–p95) na padronização.

## 4.2 Padronização - critérios e procedimento

Para tornar comparáveis variáveis em escalas e unidades distintas, e ao mesmo tempo robustas a assimetrias e outliers, adotou-se um procedimento de padronização min–max robusto com *goalposts* percentílicos, comum a todo o período 2012–2019.

Esse desenho persegue quatro metas: (i) colocar todas as variáveis de interesse em escala [0,1]; (ii) suavizar caudas longas sem distorcer o miolo das distribuições; (iii) preservar a direcionalidade substantiva (o que é "melhor" deve apontar para valores mais altos); e (iv) garantir comparabilidade temporal, usando a mesma "régua" em todos os anos.

Régua robusta (p5–p95) e clamping:

Definiram-se os goalposts como os percentis p5 (limite inferior) e p95 (superior) estimados sobre toda a janela 2012–2019. Observações abaixo de p5 e acima de p95 são "encapadas" (clamping) nesses limites, evitando que poucos pontos extremos comprimam a escala do restante da amostra. Com isso, protege-se a comparabilidade entre anos e países.

Transformação: Denotando por $x$ a variável original e por $x_{p5}$, $x_{p95}$ os percentis:

$$Rescale(x) = \frac{minmax(x, x_{p5}), x_{p95} - x_{p5}}{x_{p95} - x_{p5}} \epsilon [0,1]$$

**Direções (benefício vs. risco).**

- Capacidade/uso de RA - CRA_por_1000: Direto

$$I_{cra} = rescale(CRA_{1000})$$

- Infertilidade (necessidade) - TI_por_1000: Invertido

$$I_{inf} = 1 - rescale(TI_{1000})$$

- Dinâmica demográfica - TGP_% por convenção, crescimentos mais altos aumentam a dependência tecnorreprodutiva; logo, invertido

$$I_{grw} = 1 - rescale(TGP\%)$$

Esse arranjo garante que, após a padronização, valores maiores indiquem condições mais favoráveis ao fenômeno que se deseja sintetizar (maior capacidade/uso; menor infertilidade; menor pressão de crescimento).

Observações com valores ausentes nas variáveis que entram no índice são excluídas apenas da etapa correspondente, mantendo-se o restante do painel. Em médias geométricas (ver adiante), aplica-se um $\boldsymbol{\varepsilon}$ numérico pequeno (e.g $10^{-9}$) quando necessário, apenas para evitar produto nulo em casos raros com algum componente exatamente zero após o clamping, sem efeito prático na ordenação.

Dadas as caudas longas observadas em variáveis de contagem e montante, o z-score amplificaria outliers e tornaria a escala dependente do ano. A régua p5–p95 com *clamping* é mais estável e interpretável para compor índices.

4.3 Construção do índice - duas formulações

Concluída a padronização, compôs-se o Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT) a partir dos três componentes normalizados ($I_{cra}$ , $I_{inf}$ , $I_{grw}$ ). Optou-se por duas formulações complementares, ambas com pesos iguais (transparência e neutralidade inicial), por refletirem filosofias distintas de agregação:

**Índice Aritmético (IDT-A, autoral):**

Média simples dos três eixos, valorizando interpretação direta e transparência:

$$IDT_A = \frac{I_{cra} + I_{inf} + I_{grw}}{3}$$

Vantagem: estabilidade quando um dos eixos está extremo; interpretação direta como "média dos componentes".
Limitação: não penaliza fortemente desbalanceamentos (um eixo muito baixo pode ser compensado pelos demais).

**Índice Geométrico (IDT-H, "estilo-IDH")**

Média geométrica, que penaliza desbalanceamentos (um eixo muito baixo derruba o composto):

$$IDT_H = \left(I_{cra} \, . I_{inf} \, . I_{grw}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Vantagem: penaliza desbalanceamentos (um componente muito baixo derruba o composto), alinhado ao racional do IDH.
Limitação: mais sensível a valores próximos de zero (mitigado com *clamping* e $\boldsymbol{\varepsilon}$ técnico quando necessário).

Adotar as duas versões permite triangular a leitura: o IDT-A oferece estabilidade e comunicação simples; o IDT-H impõe coerência mínima nos três eixos. A convergência entre ambas (alta correlação e *ranks* próximos no topo/base) será tratada como checagem interna de consistência.

Na especificação base, usaram-se pesos iguais por princípio de parcimônia. Alternativas (p.ex., maior ênfase em capacidade/uso de RA) serão exploradas na análise de sensibilidade da seção de validação, comparando impactos em correlação e ordenação.

O índice é calculado por país e ano, sempre com a mesma régua p5–p95. Com isso, diferenças interanuais refletem mudanças reais nos componentes, e não "trocas de escala".

## 4.4 Controles de qualidade (executados junto à construção)

1. Direcionalidade verificada: sinais das correlações e dos coeficientes padronizados nas regressões exploratórias foram usados apenas como checagem de coerência (ex.: capacidade↑ associando-se ao composto↑; infertilidade↑ associando-se ao composto↓).
2. Colinearidade sob controle: inspeções de VIF na modelagem auxiliar indicaram níveis baixos a moderados, sugerindo que nenhum componente domina os demais por redundância.
3. Independência de porte: por construção, componentes per capita/normalizados reduzem o risco de o índice refletir apenas tamanho populacional.

Nota: estes passos não "validam" o índice, apenas asseguram que a construção é coerente e estável. A validação externa é apresentada na seção seguinte.

Assim, padronizou-se cada componente crítico (capacidade/uso, infertilidade, crescimento) para [0,1] com percentis p5–p95 e *clamping*, respeitando direcionalidade.

Em seguida, agregou-se por média aritmética (IDT-A) e geométrica (IDT-H) com pesos iguais, preparando terreno para a validação externa e para a apresentação de rankings e comparações, que serão introduzidos na próxima seção.

## 4.5 Avaliação da Consistência e Comparação das Metodologias

A comparação entre as duas formulações do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-A, baseado em média aritmética, e IDT-H, baseado em média geométrica) foi conduzida para avaliar a consistência interna e a convergência metodológica. Ambas as abordagens partem das mesmas variáveis padronizadas, CRA_por_1000, TI_por_1000 e TGP%, e diferem apenas na forma de agregação, o que

permite verificar se as interpretações se mantêm estáveis independentemente do método de síntese.

A Figura 5 apresenta o diagrama de dispersão entre as duas versões do índice. Observou-se forte relação linear positiva (r de Pearson = 0,928; r de Spearman = 0,934; n = 520), evidenciando elevada concordância entre as metodologias. A linha de tendência (azul) manteve-se próxima da linha de identidade (pontilhada), o que indica ausência de viés sistemático e boa estabilidade em toda a faixa de variação. Nos níveis baixos do índice, o IDT-H tende a apresentar valores ligeiramente inferiores ao IDT-A, comportamento esperado, pois a média geométrica é mais sensível a desequilíbrios entre componentes, ou seja, um desempenho muito baixo em um eixo reduz mais fortemente o valor final. Em níveis intermediários e altos (IDT > 0,4), as duas métricas tornam-se praticamente equivalentes, reforçando a robustez e coerência estrutural do indicador.

A Figura 6, com o gráfico de BlandAltman, complementa essa análise mostrando a diferença entre as metodologias (IDT-H – IDT-A) em função da média entre ambas. O padrão observado indica viés negativo concentrado nas faixas inferiores do índice, confirmando que o IDT geométrico é mais conservador em contextos de menor desempenho tecnorreprodutivo.

À medida que os valores médios aumentam, as diferenças se aproximam de zero e tornam-se simetricamente distribuídas, demonstrando concordância crescente e ausência de tendência sistemática. Mais de 95% das observações situam-se dentro dos limites de concordância (±1,96 DP), o que confirma a estabilidade entre as abordagens.

Os resultados numéricos complementares indicam diferença média absoluta entre rankings de 37,7 posições, com desvio moderado (p90 = 85; máximo = 261), o que é aceitável em indicadores compostos desse tipo, especialmente considerando diferenças de escala e penalização geométrica.

Portanto, conclui-se que as duas versões do índice são altamente consistentes, estatisticamente convergentes e metodologicamente compatíveis, podendo ser utilizadas de forma complementar, o IDT-A pela simplicidade interpretativa e o IDT-H pela aderência conceitual a índices internacionais baseados em média geométrica (como o IDH).

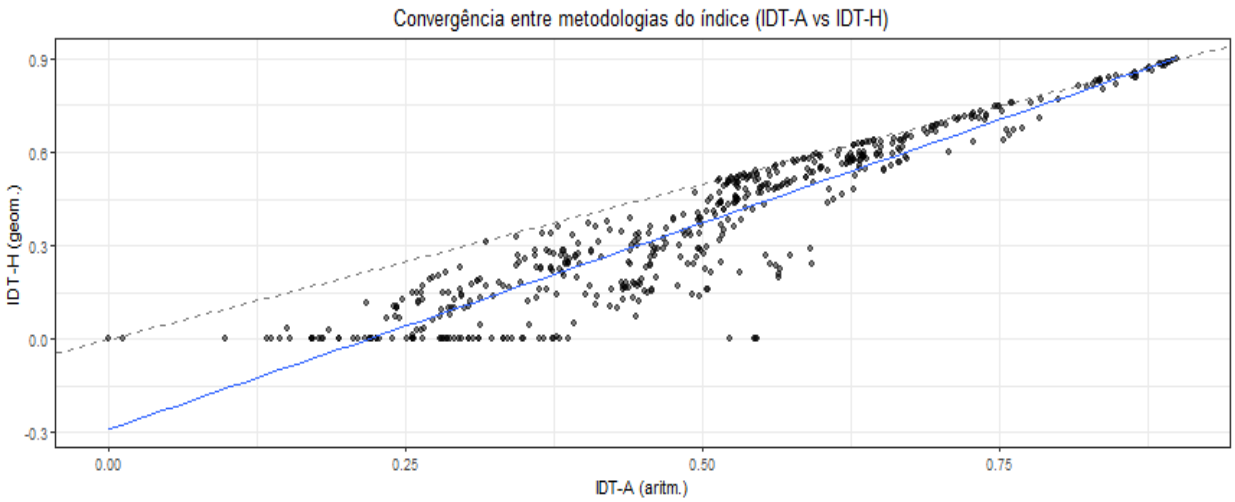



**Figura 5.** Convergência entre metodologias do índice (IDT-A vs IDT-H).

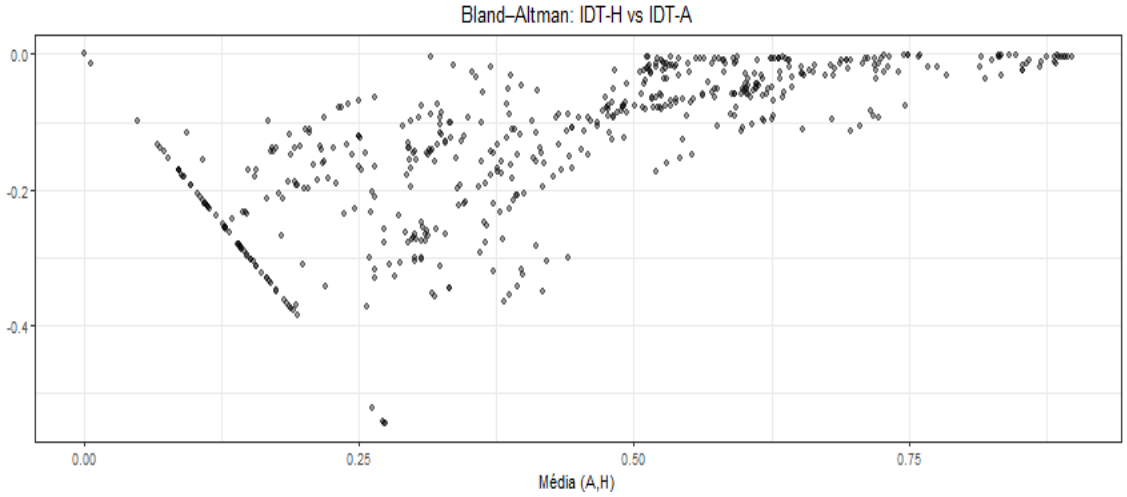



**Figura 6.** Bland–Altman da concordância entre IDT-H e IDT-A.

As duas formulações do Índice de Dependência TecnorreprodutivaI, IDT-A (média aritmética) e IDT-H (média geométrica), mostraram altíssima convergência.

As correlações de Pearson (r = 0,928) e de Spearman (ρ = 0,934) evidenciam que ambas as abordagens capturam essencialmente o mesmo padrão de variação entre países e anos, sem distorções relevantes de ordenamento.

As diferenças entre rankings foram modestas (média = 37,7 posições; P90 = 85; máximo = 261), o que confirma a consistência interna do índice e a robustez do construto, mesmo quando se utiliza uma forma de agregação mais penalizadora (geométrica).

Assim, o IDT-A oferece maior simplicidade interpretativa, enquanto o IDT-H garante maior rigor na comparação de desempenhos desbalanceados, sendo ambos adequados e coerentes para uso conjunto nas análises comparativas e temporais.

**Tabela 6.** Convergência e consistência entre as metodologias de cálculo do IDT (IDT-A vs IDT-H):

| **Correlação de Pearson** | **Correlação de Spearman** | **N** |
|---|---|---|
| 0.928 | 0.934 | 520 |
| **Diferença média absoluta** | **Percentil 90** | **Máximo** |
| 37.7 | 85 | 261 |

Com o intuito de verificar a validade externa do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT) e sua coerência empírica frente a variáveis socioeconômicas e demográficas conhecidas, conduziu-se uma série de análises de correlação e regressão. Foram utilizadas, como variáveis externas, o GNI per capita (indicador de renda e desenvolvimento), a taxa de fertilidade total (TFT) e o percentual de nascimentos oriundos de reprodução assistida (RA) em relação ao total de nascimentos. Todas as análises foram realizadas considerando o painel país-ano de 2012 a 2019 (N=520 observações), de forma a explorar simultaneamente a variação temporal e entre países.

Inicialmente, calcularam-se correlações de Pearson entre o IDT, em suas duas formulações, aritmética (IDT-A) e geométrica (IDT-H), e as variáveis externas. Os resultados evidenciaram padrões altamente coerentes com o racional teórico do índice.

O IDT correlacionou positivamente com o GNI per capita (r=0,54 para IDT-A; r=0,62 para IDT-H), indicando que países de maior renda tendem a apresentar maior dependência tecnorreprodutiva, possivelmente por maior acesso e disponibilidade de tecnologias reprodutivas. Também se observou correlação fortemente positiva entre o IDT e o percentual de nascimentos por RA (r=0,72 e r=0,76, respectivamente), o que reforça que o índice expressa adequadamente o eixo de uso e capacidade tecnológica.

Por outro lado, a correlação com a taxa de fertilidade total foi negativa (r=−0,55 para ambas as versões), refletindo que contextos de menor fecundidade natural está associado a maior demanda e uso de tecnologias reprodutivas. Todas as associações foram altamente significativas (p<0,001), confirmando a consistência externa do indicador (Tabela 7).

**Tabela 7.** Correlações entre IDT e variáveis externas (Pearson):

| Índice | Variável externa | r | p | Interpretação |
|---|---|---|---|---|
| IDT-A | GNI per capita | 0.539 | <0.001 | Renda mais alta → maior dependência tecnorreprodutiva |
| IDT-A | % nascidos por RA | 0.723 | <0.001 | Oferta/uso de RA acompanha o IDT |
| IDT-A | Taxa de fertilidade total | −0.561 | <0.001 | Menor fertilidade global → maior dependência tecnológica |
| IDT-H | GNI per capita | 0.624 | <0.001 | Confirma convergência entre desenvolvimento e IDT |
| IDT-H | % nascidos por RA | 0.756 | <0.001 | Correlação muito alta e esperada |
| IDT-H | Taxa de fertilidade total | −0.553 | <0.001 | Sinal coerente com transição demográfica |

Esses achados foram complementados por análises de regressão linear padronizada, nas quais os coeficientes foram expressos em desvios-padrão (β*), permitindo comparabilidade direta entre os efeitos.

Nas regressões bivariadas, o CRA_por_1000 (ciclos de reprodução assistida por mil mulheres) foi o preditor isolado mais forte do IDT (β*=0,82; $R^2$=0,67), seguido pelo percentual de nascimentos por RA (β*=0,76; $R^2$=0,57) e pelo GNI per capita (β*=0,62; $R^2$=0,39).

Em contrapartida, TFT, TGP% (crescimento populacional) e TI_por_1000 (taxa de infertilidade) apresentaram efeitos negativos, confirmando que a dependência tecnorreprodutiva tende a aumentar à medida que a fertilidade natural e o crescimento populacional diminuem. Tais padrões são consistentes com a lógica da transição demográfica e reprodutiva observada em países de alta renda.

Na análise múltipla, todos os efeitos foram avaliados de forma conjunta, controlando as colinearidades entre as variáveis.

O modelo apresentou excelente ajuste global ($R^2$ ajustado = 0,875; N=520), indicando que os preditores explicam a maior parte da variação observada no índice.

O componente de capacidade tecnológica (CRA_por_1000) manteve-se como o principal determinante (β*=0,49; p<0,001), seguido do efeito negativo da infertilidade (TI_por_1000) (β*=−0,34; p<0,001).

O crescimento populacional (TGP_%) também apresentou associação negativa robusta (β*=−0,41; p<0,001), enquanto o GNI per capita manteve contribuição positiva, embora mais modesta (β*=0,16; p<0,001).

O percentual de nascimentos por RA manteve efeito independente e significativo, reforçando que o índice captura tanto o acesso quanto o uso efetivo das tecnologias. A taxa de fertilidade, por sua vez, perdeu significância após o controle conjunto (p=0,84), o que sugere que seu efeito é mediado pelas demais variáveis do modelo.

A inspeção dos fatores de inflação da variância (VIF) indicou colinearidade baixa a moderada, sustentando a estabilidade da especificação. De modo geral, o modelo confirmou a estrutura teórica esperada: o IDT aumenta com o desenvolvimento econômico e com o uso de tecnologias reprodutivas, e diminui em contextos de alta fertilidade natural ou crescimento demográfico acelerado.

Esses resultados demonstram que o índice, em ambas as versões (IDT-A e IDT-H), apresenta robustez estatística, coerência teórica e validade empírica externa, podendo ser utilizado de forma comparável entre países e ao longo do tempo.

O IDT-H mostrou-se ligeiramente mais sensível às diferenças entre países, enquanto o IDT-A oferece maior estabilidade frente a valores extremos, o que reforça a recomendação de relatar ambas as versões em conjunto (Tabela 8).

**Tabela 8.** Regressão múltipla padronizada:

| Variável | β* | p | Interpretação |
|---|---|---|---|
| CRA_por_1000 | 0.491 | <0.001 | Efeito positivo robusto, capacidade de RA é determinante |
| TI_por_1000 | −0.344 | <0.001 | Infertilidade elevada reduz o escore do IDT |
| TGP_% | −0.410 | <0.001 | Crescimento populacional inversamente associado |
| GNI per capita | 0.156 | <0.001 | Renda contribui, mas perde força após controle conjunto |
| % Nasc. por RA | 0.117 | <0.001 | Mantém efeito independente e positivo |
| TFT | 0.009 | 0.841 | Sem efeito próprio após controle |
| $R^2$ ajustado = 0.875 (N=520) | | | Excelente ajuste global |

**Notas:** Após controle simultâneo, o modelo manteve alta capacidade explicativa ($R^2$_aj = 0.88). As variáveis de capacidade tecnológica (CRA_por_1000, %RA) e infertilidade explicam a maior parte da variação do índice. TGP_% manteve efeito negativo, indicando

que países em expansão populacional tendem a depender menos de RA, enquanto GNI per capita exerce efeito secundário. A ausência de multicolinearidade relevante reforça a robustez estatística e coerência interna do IDT.

A Tabela 9 apresenta a análise longitudinal dos oito anos, o qual revelou padrões distintos entre as variáveis associadas à dependência tecnorreprodutiva.

Observou-se, em escala global, crescimento consistente do IDT-H, indicando expansão da capacidade tecnológica e do uso de reprodução assistida (RA) ao longo do tempo. Esse aumento acompanha tanto o avanço das práticas clínicas quanto o amadurecimento econômico e institucional em diferentes países.

Evolução média por variável:

- CRA_por_1000: crescimento acentuado (= +128 % na mediana global entre 2012 e 2019), indicando ampliação da oferta e da demanda por RA.
- GNI per capita: aumento de cerca de +48 % no período, compatível com o avanço econômico médio das amostras observadas.
- TFT: queda leve, de 1,7 → 1,6 filhos/mulher, caracterizando continuidade da transição demográfica.
- TI_por_1000: leve aumento (= 26,9 → 28,1), sinalizando que, embora a capacidade tecnológica aumente, a infertilidade reportada mantém tendência de crescimento.
- TGP_%: estabilidade global próxima de 0,7 % a.a., mas com contrastes regionais, Europa e Ásia com taxas próximas a 0 ou negativas; África e América Latina em crescimento positivo.

Esses movimentos refletem uma dinâmica de convergência tecnológica, com países de alta renda mantendo valores altos e estáveis de IDT, e países emergentes mostrando trajetória ascendente.

Em síntese, o período 2012–2019 mostra avanço consistente da capacidade tecnorreprodutiva mundial, associado a renda crescente e declínio da fecundidade, condições que sustentam a elevação gradual do IDT.

Os gráficos de linha (por continente e por país) reforçam essa tendência: Europa e Oceania exibem níveis altos e estabilizados, América Latina e Ásia crescimento progressivo, e África níveis baixos, mas ascensão gradual.

**Tabela 9.** Tendência média das variáveis principais (2012–2019):

| Variável | 2012 (Mediana) | 2019 (Mediana) | Variação (%) | Interpretação |
|---|---|---|---|---|
| CRA_por_1000 | 1,8 | 4,1 | 128 | Expansão do uso de RA |
| GNI per capita (US$) | ~10 000 | ~14 800 | 48 | Crescimento econômico global |
| TFT | 1,7 | 1,6 | −6 | Continuidade da transição demográfica |
| TI_por_1000 | 26,9 | 28,1 | 4 | Aumento moderado da infertilidade |
| TGP_% | 0,7 | 0,7 | =0 | Estabilidade, mas com contrastes regionais |

O objetivo desta etapa foi avaliar a evolução temporal do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) ao longo do período de 2012 a 2019, considerando também as variações na taxa de fertilidade total (TFT) e na proporção de nascimentos por reprodução assistida (%RA).

Essa análise visa compreender se o avanço tecnológico e o acesso às técnicas de reprodução assistida têm se expandido de forma homogênea entre as regiões, ou se persistem desigualdades estruturais entre continentes.

Para contextualizar a análise regional, foram também examinadas as medianas anuais do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) por continente ao longo do período de 2012 a 2019. Esses dados permitem caracterizar o nível geral de desenvolvimento socioenomico das regiões consideradas para a evolução temporal do IDT-H, da taxa de fecundidade total e da proporção de nascimentos por reprodução assistida nas análises subsequentes.

Ao longo do período de 2012 a 2019, observou-se uma evolução gradual da mediana do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) em todos os continentes, ainda que em níveis distintos. A África apresentou as menores medianas em todo o período, com valores que variaram de 0,59 em 2012 para 0,63 em 2019, indicando crescimento moderado ao longo dos anos. Na América Central e na América Latina, as medianas do IDH situaram-se em patamares intermediários, com aumento progressivo de 0,76 para 0,79 e de 0,75 para 0,78, respectivamente. A Ásia apresentou medianas superiores às das

Américas Central e Sul, passando de 0,81 em 2012 para 0,85 em 2019, enquanto a Europa manteve valores elevados e relativamente estáveis, variando de 0,88 para 0,90 no período analisado. A América do Norte e a Oceania concentraram as maiores medianas do IDH em todos os anos, com valores próximos ou superiores a 0,93, alcançando 0,94 em 2019, e apresentaram variação mínima ao longo da série temporal. Os resultados estão sintetizados na Tabela 10

**Tabela 10.** Mediana do IDH por continente e ano (2012–2019):

| Continente | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| África | 0,59 | 0,60 | 0,61 | 0,62 | 0,62 | 0,63 | 0,63 | 0,63 |
| América Central | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,78 | 0,78 | 0,79 | 0,79 |
| América do Norte | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,94 |
| América do Sul | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,78 |
| Ásia | 0,81 | 0,82 | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,85 |
| Europa | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Oceania | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |

Com base nesse contexto socioeconômico e demográfico, a análise passou a focalizar diretamente o comportamento do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva Humana (IDT-H) ao longo do período estudado, foram calculadas as medianas anuais do IDT-H por continente, de modo a reduzir a influência de valores extremos e destacar tendências centrais. Os resultados estão sintetizados na Tabela 11.

**Tabela 11.** Mediana do IDT-H por continente e ano (2012–2019):

| Continente | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| África | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.06 |
| América Central | 0.20 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.25 | 0.26 |
| América do Norte | 0.44 | 0.45 | 0.46 | 0.46 | 0.48 | 0.50 | 0.53 | 0.53 |
| América do Sul | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 | 0.31 | 0.32 |
| Ásia | 0.30 | 0.32 | 0.32 | 0.34 | 0.35 | 0.37 | 0.41 | 0.42 |
| Europa | 0.48 | 0.49 | 0.50 | 0.51 | 0.51 | 0.52 | 0.53 | 0.54 |
| Oceania | 0.59 | 0.58 | 0.57 | 0.55 | 0.54 | 0.56 | 0.58 | 0.59 |

A Figura 7 apresenta a evolução temporal da mediana do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) entre os anos de 2012 e 2019, estratificada por continente. Observa-se um padrão global de crescimento moderado, ainda que com fortes discrepâncias regionais.

De forma geral, Oceania e Europa mantêm os níveis mais elevados de IDT-H durante todo o período analisado, com leve oscilação negativa em torno de 2015–2016, seguida por recuperação consistente até 2019. Esse comportamento sugere uma consolidação dos sistemas de reprodução assistida em países com alta renda e políticas consolidadas de saúde reprodutiva.

A América do Norte apresenta trajetória ascendente, partindo de níveis intermediários (~0,45) e alcançando valores próximos aos da Europa ao final do período, indicando amadurecimento tecnológico e expansão do uso da RA. Já a Ásia destaca-se pelo crescimento mais acentuado, sobretudo a partir de 2015, refletindo avanços rápidos em países emergentes e investimento crescente em biotecnologia reprodutiva.

Na América do Sul, observa-se tendência positiva gradual, embora em níveis inferiores aos continentes mais desenvolvidos, sugerindo expansão desigual da infraestrutura e acesso restrito a serviços especializados. América Central apresenta um comportamento semelhante, mas com valores mais baixos e estabilidade após 2017.

Por fim, a África mantém o menor patamar de IDT-H, com crescimento percentualmente grande, porém ainda discreto ao longo do tempo, o que indica limitações persistentes no acesso às tecnologias de reprodução assistida e desigualdade estrutural no contexto global.

No período analisado, em termos percentuais o Indice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) apresentou crescimento de 100% no continente Africano, 30% América Central, 20,5% América do Norte, 28% América do Sul, 40% na Asia, 12,5% na Europa e 0% na Oceania entre os anos de 2012 e 2019. Esse aumento reflete a variação média observada entre os países da amostra. Embora o ritmo de crescimento tenha variado entre os continentes, o avanço global do IDT-H indica tendencia de intensificação no uso de tecnologias de reprodução assistida ao longo da última década.

Em síntese, a figura demonstra que, embora haja uma tendência global de aumento da dependência tecnorreprodutiva, os ritmos de crescimento variam substancialmente entre continentes, refletindo diferenças de desenvolvimento humano, renda e estrutura dos sistemas de saúde (Figura 7).

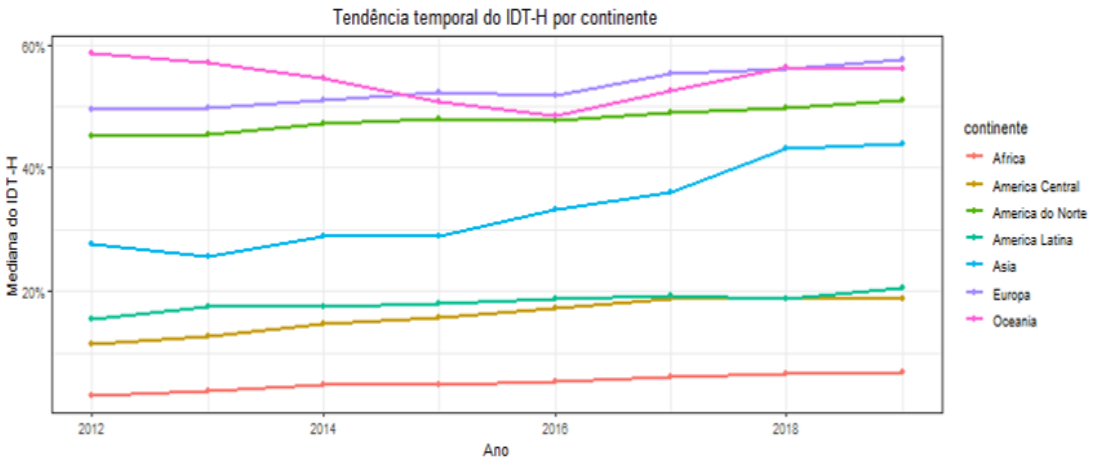



**Figura 7.** Evolução temporal do IDT-H (2012–2019) por continente.

Aplicou-se agrupamento não supervisionado (k-means) para identificar perfis de países à luz de indicadores socioeconômicos e demográficos associados à dependência tecnorreprodutiva.

Utilizaram-se duas especificações: um modelo "core" com GNI per capita, proporção de nascimentos por reprodução assistida (%RA) e taxa de fertilidade total (TFT), e um modelo estendido que adiciona TI_por_1000 e TGP_%. As variáveis foram agregadas por país por meio da média no período 2012–2019 e padronizadas (z-score) antes do agrupamento.

O k-means foi estimado no espaço multivariado formado por GNI, TFT, % RA e IDT-H (este último incluído como uma das dimensões).

Para facilitar a comunicação substantiva, os clusters resultantes foram rebatizados como Baixo, Intermediário e Alto a partir de pontos de corte do IDT-H definidos entre as medianas dos clusters.

Assim, qualquer novo país/ano pode ser classificado diretamente pelo IDT-H: valores abaixo de 0,102 indicam nível Baixo, entre 0,102 e 0,391indicam intermediário, e iguais ou superiores a 0,391 indicam alto.

Os achados bivariados que embasam essa estrutura aparecem nas Figuras 8 a 11. A Figura 8 (IDT-H vs GNI per capita) revela um gradiente econômico robusto: países com maior renda apresentam IDT-H mais elevado, com forte concentração de observações de Europa e Ásia nas faixas superiores; em contraste, África e parte da

América Latina se situam em patamares mais baixos de GNI e do índice, sugerindo restrições de acesso e financiamento para tecnologias reprodutivas.

A Figura 9 (IDT-H vs %RA) confirma uma relação crescente e não linear: incrementos modestos em %RA já se associam a aumentos relevantes do índice, sobretudo em contextos de renda média/alta, indicando sensibilidade do IDT-H à incorporação tecnológica. Em sentido oposto, a Figura 10 (IDT-H vs TFT) mostra uma associação inversa clara: menor fertilidade acompanha níveis mais altos do índice, padrão compatível com estágios avançados da transição demográfica e com o maior recurso a tecnologias de RA.

A síntese multivariada aparece nas Figuras 11 e 12. A Figura 11 mostra a separação dos grupos no plano principal da PCA a partir de GNI, TFT, %RA e IDT-H, enquanto a Figura 12 apresenta o biplot da PCA com k-means (k=3), em que a Dimensão 1 explica cerca de 70,2% da variância e a Dimensão 2, 14,4%. Nesse biplot, as setas de GNI e %RA se alinham positivamente ao IDT-H e a seta de TFT aponta em direção oposta, compondo um gradiente econômico-demográfico-tecnológico ao longo da primeira componente. Vê-se, nessa ordenação, que o nível Baixo corresponde a países com GNI baixo, TFT alta e %RA residual, com grande presença de África e América Latina e com sinais de acesso e necessidade percebida ainda limitados; o nível Intermediário reúne perfis de renda e fertilidade moderadas com incorporação parcial de RA, caracterizando uma zona de transição onde oferta e demanda tecnológicas se expandem; e o nível Alto agrega países de GNI elevado, baixa fertilidade e %RA alto, contextos nos quais a RA está institucionalizada e sustentada por infraestrutura e financiamento, com predominância de Europa, Ásia desenvolvida e Oceania.

Tomadas em conjunto, as Figuras 8 a 12 sustentam três conclusões integradas. Primeiro, os níveis do IDT-H refletem a interação entre renda, transição demográfica (TFT) e uso efetivo de RA: o índice aumenta quando GNI e %RA sobem e quando a TFT cai.

Segundo, há heterogeneidade por continente, mas o desenho predominante é econômico-demográfico, não meramente geográfico. Terceiro, a segmentação em três perfis, com cortes entre-medianas de 0,102 e 0,391, confere validade externa ao índice e oferece uma regra simples e replicável para classificar novos casos, além de um mapa prático para políticas públicas: foco em acesso e financiamento nos contextos de baixo índice, expansão regulada e qualificação de serviços na faixa intermediária e ênfase em sustentabilidade e eficiência nos contextos de alto índice.

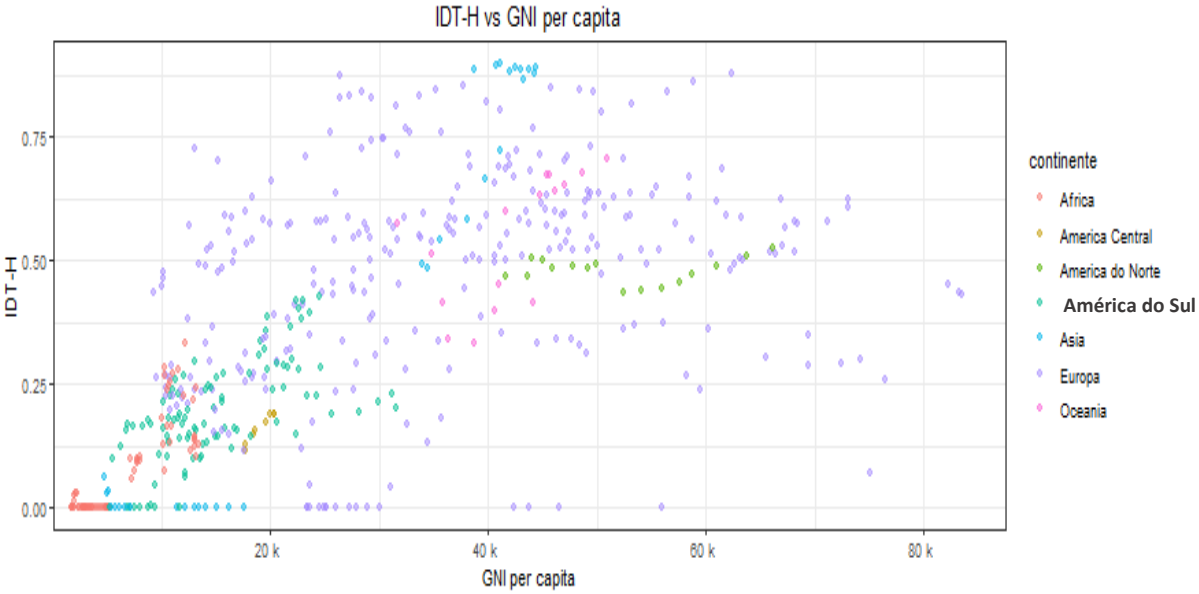



**Figura 8.** Relação entre IDT-H e GNI per capita.

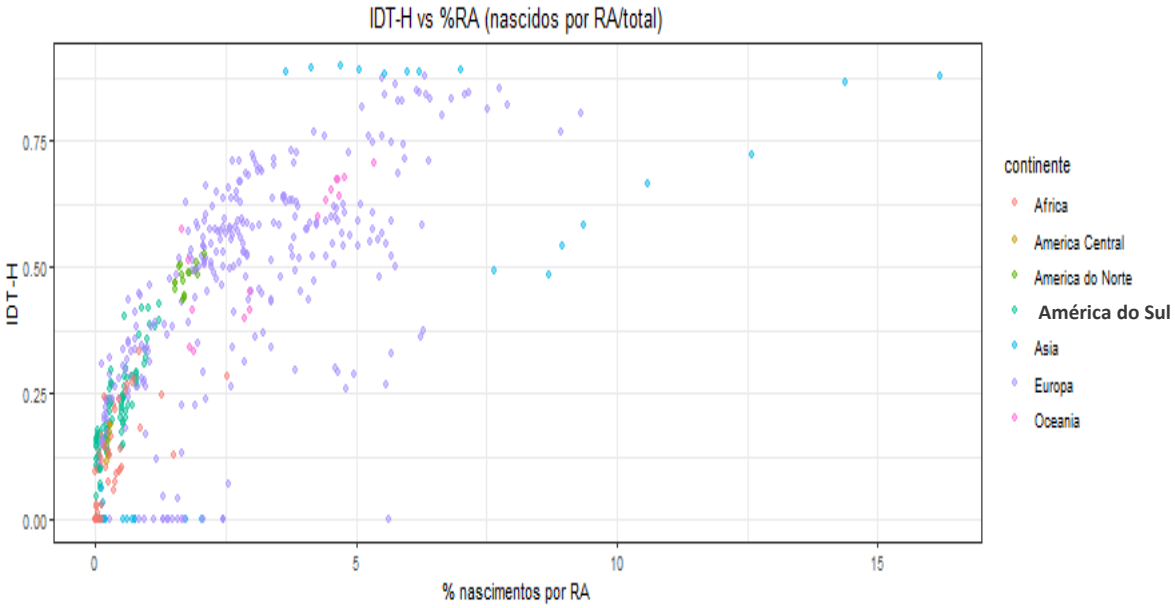



**Figura 9.** Relação entre IDT-H e proporção de nascimentos por reprodução assistida (%RA).

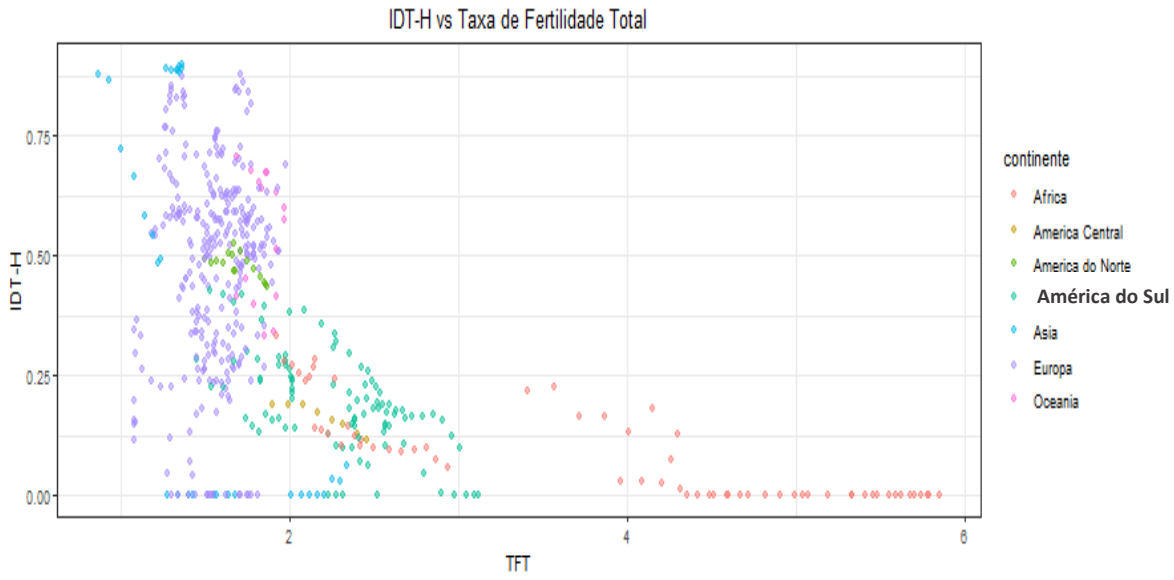



**Figura 10.** Relação entre IDT-H e Taxa de Fertilidade Total (TFT).

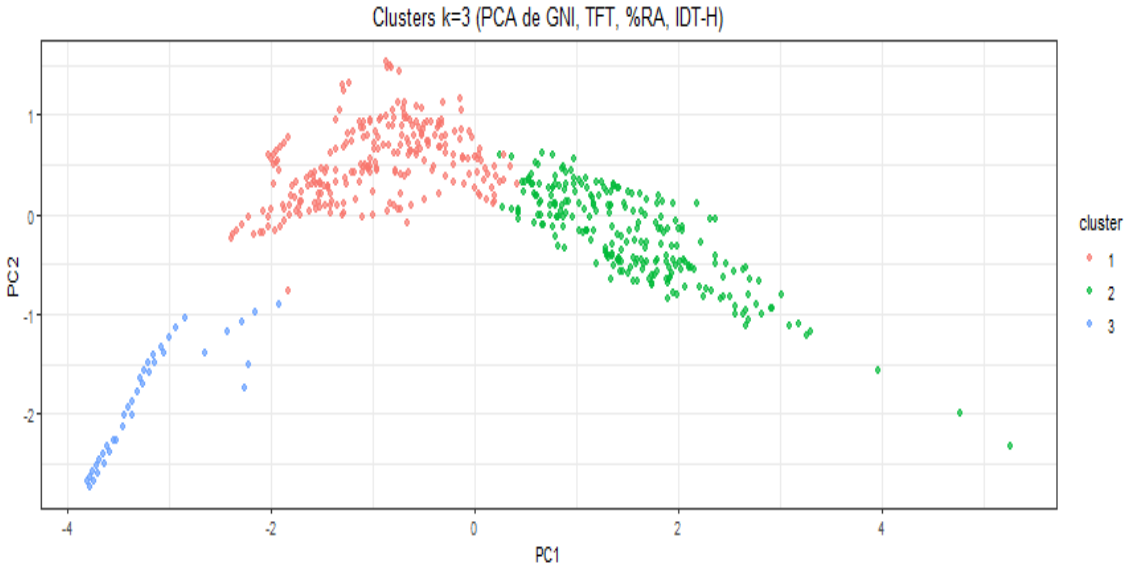



**Figura 11.** Análise de agrupamento (Cluster k=3) a partir da PCA de GNI, TFT, %RA e IDT-H.

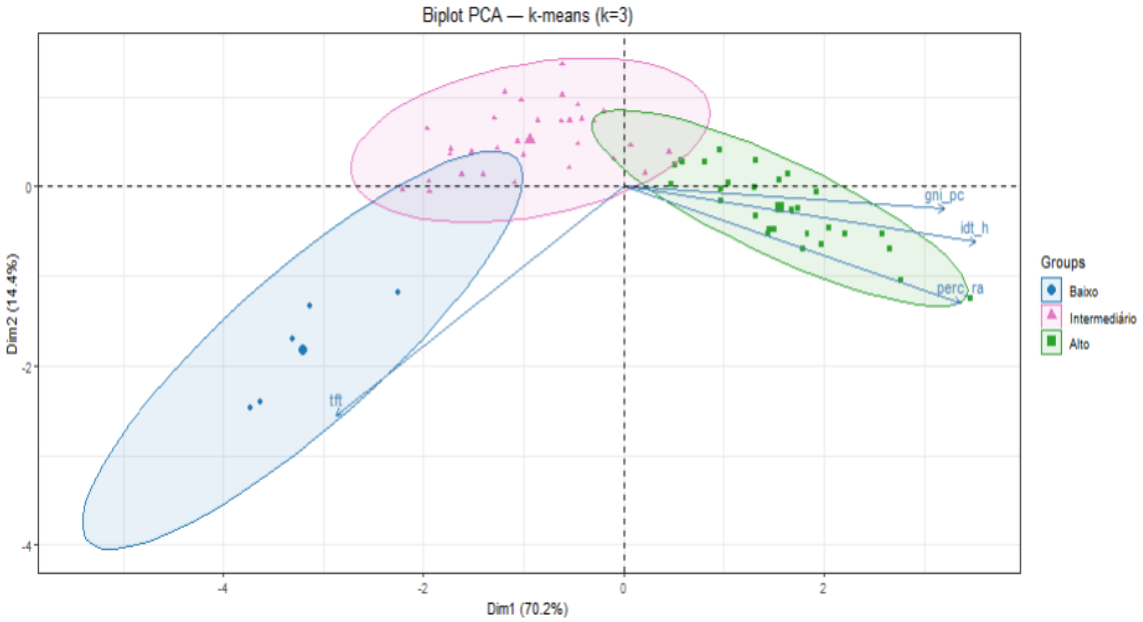



**Figura 12.** Biplot PCA com k-means (k=3) em GNI, TFT, %RA e IDT-H.

**Nota:** Biplot PCA com k-means (k=3) em GNI, TFT, %RA e IDT-H.
Ellipses a 95% por nível de dependência. Dim1 (70,2%) organiza o gradiente econômico-demográfico-tecnológico: GNI e %RA alinham-se positivamente ao IDT-H; TFT, em sentido oposto

O Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) mostrou-se um indicador robusto e coerente da relação entre renda, fertilidade e uso de tecnologias reprodutivas assistidas (RA).

Observa-se um padrão consistente: países com maior GNI per capita tendem a apresentar IDT-H mais alto, enquanto taxas de fertilidade total (TFT) elevadas concentram-se em níveis mais baixos do índice. Essa dinâmica indica que avanço econômico e redução da fertilidade caminham junto à expansão da RA, reforçando a natureza integrada do indicador.

O comportamento crescente do IDT-H frente ao aumento do percentual de nascimentos por RA confirma sua sensibilidade à incorporação tecnológica, especialmente em contextos mais desenvolvidos. Na análise multivariada (GNI, TFT, %RA e o próprio IDT-H), emergem três estágios de dependência tecnorreprodutiva:

1. Baixo: baixa renda, alta fertilidade e baixo acesso/uso de RA;

2. Intermediário: transição socioeconômica e tecnológica, com renda e fertilidade moderadas e incorporação parcial de RA;

3. Alto: alta renda, baixa fertilidade e uso elevado de RA, nos quais o IDT-H atinge seus maiores valores.

Essa segmentação sintetiza múltiplas dimensões em um único escore, oferecendo leitura clara do estágio tecnorreprodutivo e evidenciando que as diferenças observadas respondem sobretudo a níveis de desenvolvimento econômico e demográfico, não apenas à geografia. De forma integrada, os resultados indicam que o IDT-H é produto das relações entre desenvolvimento, transição demográfica e inovação tecnológica, sendo um marcador útil e comparável para estudos internacionais.

Para tornar a classificação operacional e replicável, definiu-se pontos de corte no IDT-H a partir dos próprios dados (método "entre-medianas" dos três grupos estimados): $c_{12} \approx 0{,}102 \; e \; c_{23} \approx 0{,}391$.

Assim, qualquer país/ano pode ser classificado diretamente por IDT-H:

- Baixo se IDT-H < 0,102
- Intermediário se 0,102 ≤ IDT-H <0,391
- Alto se IDT-H ≥0,391.

Em síntese, o IDT-H se consolida como um indicador multidimensional, sensível e aplicável, capaz de traduzir em uma métrica única o grau de dependência tecnológica reprodutiva das sociedades contemporâneas, um reflexo direto do modo como ciência, economia e demografia se entrelaçam na construção da fertilidade moderna.

# 5. DISCUSSÃO

## 5.1 Principais Achados

Este trabalho teve como objetivo principal propor e aplicar o Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H), construído a partir de variáveis demográficas e clínicas relacionadas à infertilidade, ao uso de tecnologias de reprodução assistida e à dinâmica populacional. A partir da padronização dessas variáveis e da aplicação do índice em países de diferentes continentes, buscou-se compreender o grau de dependência tecnológica na reprodução humana e suas variações ao longo do tempo. Com base nos resultados obtidos entre os anos 2012 e 2019, esta seção discute os padrões observados, as disparidades regionais, os fatores que influenciam a evolução do índice e suas possíveis implicações para políticas públicas e saúde reprodutiva global.

## 5.2 **Interpretação dos Dados comparando com as evidências existente**

A etapa inicial da análise foi dedicada ao tratamento estatístico das variáveis, o que permitiu estabelecer uma base sólida para a construção do IDT (Índice de Dependência Tecnorreprodutiva). A aplicação de medidas como média, mediana e padronização min-max foi importante para garantir comparabilidade entre países com diferentes escalas demográficas, tecnológicas e clínicas. A análise de correlação entre variáveis revelou relações consistentes, especialmente entre a taxa de infertilidade e número de ciclos de reprodução assistida, o que reforça a lógica de integração desses indicadores no índice. Esses procedimentos não apenas asseguraram a integridade estatística do modelo, como evidenciaram a coerência interna entre os componentes do IDT, conferindo maior confiabilidade dos resultados obtidos.(22).

A análise exploratória das variáveis revelou padrões estatísticos que refletem desigualdades estruturais entre os países da amostra. A forte assimetria à direita e a presença de outliers elevados nas variáveis de contagem, como Nascimentos Totais, Nascimentos por Reprodução Assistida (RA) e GNI per capita, indicam concentração de valores em países menos populosos ou com menor capacidade econômica, enquanto poucos países concentram extremos superiores. Esse comportamento é compatível com os estudos que apontam a concentração da oferta de tecnologias reprodutivas em países de alta renda e com sistemas de saúde estruturados (23). A heterogeneidade observada em Nascimentos por RA reforça a ideia de que o acesso à reprodução assistida é desigual

e fortemente influenciado por fatores econômicos e políticos, como já discutido por (24) em estudos sobre a Oceania. Por sua vez, a dispersão do GNI per capita e a concentração da Taxa de Fecundidade Total (TFT) entre 1,5 e 2,1 refletem o envelhecimento populacional e a transição demográfica em curso, fenômenos amplamente documentados em países com baixa reposição populacional(25). A variação acentuada da CRA_por_1000 e a cauda alta da TI_por_1000 sugerem que, embora a infertilidade seja uma condição presente em diversos contextos, sua expressão clínica e o acesso ao tratamento variam substancialmente, o que reforça a importância de políticas públicas voltadas à equidade reprodutiva.

Nesse contexto, a análise do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) permitiu aprofundar a compreensão das desigualdades estruturais subjacentes entre os continentes. Os níveis diferenciados de desenvolvimento humano observados ao longo do período analisado oferecem um referencial importante para a interpretação dos padrões de acesso às tecnologias de reprodução assistida e da dependência tecnorreprodutiva, situando os resultados do IDT-H em um quadro mais amplo de condições socioeconômicas e institucionais.

Os resultados das medianas do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) por continente fornecem um eixo interpretativo fundamental para a compreensão do comportamento do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H). Observa-se que continentes com níveis elevados e estáveis de IDH ao longo do período analisado, como Europa, América do Norte e Oceania, concentram contextos estruturais mais favoráveis à incorporação, financiamento e sustentação das tecnologias de reprodução assistida, o que se reflete em maiores níveis de dependência tecnorreprodutiva captados pelo IDT-H. Evidências recentes indicam que países com maior desenvolvimento humano (especialmente seus componentes de renda, educação e longevidade), apresentam sistemas de saúde mais complexos, maior capacidade regulatória e maior investimento em tecnologias médicas avançadas, fatores diretamente associados à expansão do uso da reprodução assistida (26). Em contraste, regiões com medianas de IDH mais baixas, como África e partes da América do Sul, enfrentam limitações estruturais que restringem tanto o acesso quanto a institucionalização dessas tecnologias, resultando em menor expressão do IDT-H e maior dependência externa de serviços reprodutivos. Nesse sentido, o IDT-H revela-se sensível às assimetrias globais de desenvolvimento humano, operando como um indicador sintético que integra dimensões demográficas, clínicas e tecnológicas, sem dissociá-las do contexto socioeconômico em que estão inseridas,

reforçando a noção de que a tecnificação da reprodução é um fenômeno estruturalmente mediado e socialmente desigual (27).

A análise longitudinal das medianas e intervalos entre os quartis das variáveis centrais entre 2012 e 2019 mostram transformações relevantes no uso da reprodução assistida (RA) e em seus determinantes contextuais. O crescimento expressivo da mediana de ciclos por 1.000 mulheres (CRA_por_1000), que mais que dobrou no período (+128%), sugere uma intensificação da oferta e da demanda por tecnologias reprodutivas, fenômeno que acompanha tendências globais de ampliação do acesso à Reprodução Assistida em países com infraestrutura clínica consolidada e políticas públicas favoráveis (28).

Apesar do aumento absoluto nos nascimentos por RA, a estabilidade da proporção relativa (~2%) indica que, no contexto internacional, a RA ainda representa uma fração modesta da dinâmica reprodutiva. Esse padrão é compatível com estudos que apontam barreiras econômicas e sociais persistentes, especialmente em países de renda média e baixa, onde o acesso à RA é limitado por custos elevados e ausência de cobertura pública (29).

A leve queda na Taxa de Fecundidade Total (TFT) e a estabilidade da Taxa de Crescimento Populacional (TGP) refletem estágios distintos da transição demográfica, com países em diferentes ritmos de envelhecimento e reposição populacional. Segundo o World Population Prospects (UN, 2024), a maioria dos países de alta renda já opera abaixo do nível de reposição populacional, que é de 2,1 filhos por mulher, o que reforça a relevância da RA como estratégia compensatória frente à queda da fecundidade espontânea.

O aumento do GNI per capita (+48%) no período analisado corrobora a associação entre crescimento econômico e maior capacidade de investimento em saúde reprodutiva. As técnicas avançadas de reprodução assistida, como o teste genético pré-implantacional para aneuploidias (PGT-A) e a injeção intracitoplasmática de espermatozoides (ICSI), têm sido amplamente incorporadas em clínicas privadas, especialmente em países de alta renda. No entanto, evidências recentes indicam que essas intervenções apresentam eficácia variável conforme o perfil clínico dos pacientes.

O PGT-A demonstra benefícios principalmente em mulheres com idade materna avançada ou histórico de abortos recorrentes, pois permite identificar embriões cromossomicamente normais e reduzir a taxa de falhas de implantação (30). Entretanto, em populações mais jovens e sem fatores de risco, a utilização rotineira do PGT-A não

aumenta significativamente as taxas de nascidos vivos, além de elevar os custos do tratamento e o risco de descarte indevido de embriões viáveis (31).

De forma semelhante, a ICSI inicialmente desenvolvida para casos de infertilidade masculina severa, tem se expandido para outros perfis de pacientes. Embora melhore as taxas de fertilização em casos de comprometimento espermático, seu uso indiscriminado em casais sem fator masculino identificado não demonstra vantagens em relação à fertilização in vitro convencional, mantendo custos mais elevado (32,33).

Dessa forma, observa-se que, embora essas tecnologias possam aumentar a taxa de sucesso em subgrupos específicos, sua aplicação generalizada não é custo-efetiva, o que reforça a concentração de seu uso em sistemas privados e contextos de maior renda.

Resumindo, os dados apontam para uma expansão sempre crescente da RA em termos absolutos, mas com participação relativamente estável nos nascimentos totais, sugerindo que o avanço tecnológico não tem sido acompanhado por uma democratização proporcional do acesso. A literatura reforça que, para que a RA tenha impacto demográfico significativo, é necessário superar barreiras estruturais e ampliar sua integração aos sistemas públicos de saúde, especialmente em contextos de baixa fecundidade e envelhecimento populacional.

O caso do Japão ilustra com clareza a limitação do avanço tecnológico isolado como solução para o declínio populacional. Apesar de contar com uma das políticas públicas de reprodução assistida mais estruturadas do mundo, com mais de 600 clínicas registradas e cerca de 10% dos nascimentos anuais provenientes de RA, o país continua enfrentando uma queda acentuada na taxa de crescimento populacional. Em 2022, o número de nascimentos caiu para menos de 800 mil, e a taxa de fecundidade total atingiu o valor histórico de 1,26 filhos por mulher. Projeções oficiais indicam que a população japonesa pode encolher em cerca de 30% até 2070, com um aumento expressivo na proporção de idoso (34).

Esse paradoxo, alta oferta de RA e queda populacional, revela que o impacto demográfico da reprodução assistida depende de múltiplos fatores. Primeiro, a idade média das mulheres que acessam RA no Japão é de 37,6 anos, com quase 40% dos ciclos realizados em mulheres com mais de 40 anos. A literatura mostra que, embora a RA possa compensar parcialmente a infertilidade relacionada à idade, suas taxas de sucesso diminuem significativamente após os 38 anos (35), o que limita seu efeito populacional agregado.

Além disso, fatores socioculturais e econômicos desempenham papel central. O adiamento do casamento, a instabilidade no mercado de trabalho e os altos custos de criação de filhos são barreiras que a tecnologia não resolve. A 16ª Pesquisa Nacional de Fertilidade do Japão revelou que muitos jovens não desejam ter filhos ou não se sentem preparados para formar família, mesmo com incentivos governamentais. Isso reforça que políticas de RA, por mais avançadas que sejam, não substituem políticas integradas de apoio à família, igualdade de gênero e segurança econômica (36).

Portanto, o exemplo japonês confirma que a expansão da RA em termos absolutos não garante impacto demográfico significativo. A tecnologia precisa estar inserida em um ecossistema de políticas públicas que enfrentam simultaneamente os desafios da fecundidade tardia, da desigualdade de acesso e das barreiras culturais à parentalidade. Sem isso, a reprodução assistida tende a beneficiar segmentos específicos da população, sem alterar substancialmente os indicadores de crescimento populacional.

Embora o exemplo japonês evidencie que políticas públicas robustas de reprodução assistida não garantem, por si só, reversão das tendências demográficas, é importante reconhecer que os desafios da tecnorreprodução não se manifestam de forma homogênea entre países. Para compreender melhor essa diversidade, a análise de agrupamentos por variável permite identificar padrões regionais e estruturais que influenciam o acesso à RA, a prevalência da infertilidade e os indicadores demográficos. Ao observar como os países se distribuem em clusters segundo seus valores específicos, torna-se possível revelar configurações continentais e socioeconômicas que aprofundam a compreensão sobre as desigualdades tecnorreprodutivas e suas implicações populacionais.

A visualização dos clusters unidimensionais por variável, com países como unidades e agrupamentos por continente, permite identificar como diferentes regiões se distribuem em relação aos indicadores demográficos, econômicos e clínicos. Essa abordagem é especialmente útil para revelar padrões latentes que não emergem em análises agregadas. Estudos como (37) demonstram que a aplicação de técnicas de cluster em indicadores sociodemográficos permite diferenciar grupos de países com perfis estruturais semelhantes, mesmo quando separados geograficamente.

No gráfico de cluster 1D da figura 4, observa-se que variáveis como GNI per capita e CRA_1000 apresentam clusters bem definidos, com países da Europa, América do Norte e Oceania concentrados nos grupos de maior valor. Isso reforça a tese de que o acesso à reprodução assistida está fortemente vinculado à capacidade econômica e à

infraestrutura de saúde, como já apontado por (38), que destacam o papel dos indicadores econômicos como preditores indiretos da cobertura em saúde reprodutiva.

Por outro lado, variáveis como TFT e TGP_pct mostram uma distribuição mais dispersa entre continentes, com países da África e América Latina ocupando faixas superiores e intermediárias respectivamente. Essa heterogeneidade sugere que, embora a fecundidade e o crescimento populacional estejam em declínio em países de alta renda, regiões em desenvolvimento mantêm dinâmicas demográficas mais intensas, o que pode gerar pressões distintas sobre os sistemas de saúde reprodutiva(39).

A variável TI_1000, que representa a taxa de infertilidade por 1.000 mulheres em idade reprodutiva, apresenta clusters menos nítidos, indicando que a infertilidade clínica não segue um padrão estritamente regional. Isso está alinhado com a literatura que aponta a infertilidade como um fenômeno multifatorial, influenciado por idade, estilo de vida, poluição e fatores genéticos, mais do que por localização geográfica isolada (38).

Já os indicadores Nasc_RA_Totais e Nasc_RA revelam uma concentração de países com baixa magnitude, com poucos países em clusters superiores, geralmente os mesmos com alto GNI e CRA_1000. Isso reforça a ideia de que, mesmo com infraestrutura disponível, a RA ainda representa uma fração limitada dos nascimentos totais, e sua distribuição é desigual entre continentes.

Em síntese, a análise de clusters por variável permite visualizar divisões em camadas regionais que complementam os achados anteriores. Ela evidencia que o acesso à tecnologia reprodutiva, os padrões de fecundidade e os indicadores econômicos formam sistemas interdependentes, cujas configurações variam substancialmente entre continentes. Essa abordagem de agrupamento por variável é particularmente útil para fortalecer a construção e a capacidade analítica do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H), pois permite identificar padrões estruturais e regionais que não seriam captados por medidas agregadas. Ao revelar como países se distribuem em faixas de valor segundo seus indicadores demográficos, econômicos e clínicos, os clusters oferecem uma base empírica para calibrar o índice de forma sensível às desigualdades contextuais. Isso garante que o IDT-H não apenas sintetize múltiplas dimensões da tecnorreprodução, mas também preserve nuances regionais e socioeconômicas, ampliando sua aplicabilidade comparativa e sua relevância para formulação de políticas públicas. Em termos metodológicos, a incorporação de padrões de agrupamento reforça a validade externa do índice, ao demonstrar que ele é capaz de refletir configurações reais

e heterogêneas entre países com diferentes perfis populacionais e níveis de acesso à reprodução assistida (40).

## 5.3 **Construção do Índice**

A construção do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) baseou-se na agregação de variáveis padronizadas que representam dimensões clínicas, demográficas e econômicas relacionadas à reprodução assistida. Para compor o índice, foram testadas duas abordagens de agregação: a média aritmética simples e a média geométrica. A escolha metodológica entre essas formas de síntese não é trivial, pois afeta diretamente a sensibilidade do índice à variação entre componentes. A média geométrica, por exemplo, é utilizada na construção do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) desde sua reformulação em 2010, justamente por penalizar desequilíbrios entre dimensões e evitar que valores extremos em uma variável compensem desempenhos baixos em outras (41). Essa propriedade torna o índice mais robusto para capturar desigualdades estruturais, o que é particularmente relevante em contextos como o da tecnorreprodução, onde o acesso e a prevalência variam substancialmente entre países.

A análise conjunta dos índices e representação dos gráficos de dispersão e Bland-Altman entre o índice aritmético (IDT-A) e o índice geométrico (IDT-H) oferece uma validação estatística robusta da abordagem dupla adotada na construção do IDT (Índice de Dependência Tecnorreprodutiva). O gráfico de dispersão revela uma forte correlação entre os dois métodos, com os pontos distribuídos próximos à linha de igualdade ($y = x$) e uma regressão linear ajustada que confirma a convergência entre os resultados. Essa proximidade indica que, apesar das diferenças conceituais entre as médias aritméticas e geométrica, ambas fornecem estimativas consistentes dos padrões de dependência tecnorreprodutiva entre os países.

Complementando, o gráfico de Bland-Altman aprofunda essa análise ao evidenciar a magnitude e a direção das discrepâncias entre os índices. Observa-se que os desvios são sistemáticos: países com médias mais baixas entre os índices tendem a apresentar diferenças negativas mais acentuadas (IDT-H < IDT-A), o que é coerente com a natureza penalizadora da média geométrica frente a componentes desbalanceados. Essa propriedade é metodologicamente desejável, pois impede que desempenhos elevados em uma dimensão, como alta oferta de RA, ocultem fragilidades em outras, como baixa taxa de crescimento populacional ou prevalência crítica de infertilidade.

A convergência observada nos extremos (topo e base dos rankings) e a previsibilidade dos desvios reforçam a validade interna do índice e justificam a adoção simultânea das duas versões. O IDT-A oferece estabilidade e comunicação direta, enquanto o IDT-H impõe coerência mínima entre os eixos, sendo mais sensível a assimetrias estruturais. Essa estratégia de triangulação é recomendada em estudos de agregação multidimensional, como demonstrado por (42), que destacam a complementaridade entre médias aritméticas e geométricas na construção de índices compostos.

Dessa forma, a análise integrada dos dois gráficos confirma que o IDT-H é estatisticamente consistente, metodologicamente sólido e sensível às desigualdades tecnorreprodutivas. A abordagem dupla amplia a capacidade interpretativa do modelo, permitindo leituras mais refinadas sobre os perfis reprodutivos dos países.

Depois da definição da fórmula e sua compreensão matemática, foi realizada a correlação com as variáveis para entender como o índice se comporta em diferentes cenários.

A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson entre os índices compostos (IDT-A e IDT-H) e variáveis externas selecionadas, GNI per capita, percentual de nascimentos por reprodução assistida (%RA) e taxa de fertilidade total (TFT), permite avaliar a validade convergente do modelo. Os resultados obtidos indicam correlações estatisticamente significativas ($p < 0,001$) e conceitualmente coerentes, reforçando a capacidade dos índices de sintetizar dimensões relevantes da dependência tecnorreprodutiva.

A correlação positiva entre o IDT-H e o GNI per capita ($r = 0,624$) é particularmente expressiva, sugerindo que países com maior renda tendem a apresentar maior dependência tecnológica na reprodução humana. Esse padrão é observado em países como Coreia do Sul, Alemanha e Austrália, que combinam alta renda com políticas públicas ou privadas consolidadas de reprodução assistida. Estudos recentes indicam que o investimento em infraestrutura reprodutiva acompanha o crescimento econômico, mas também responde a pressões demográficas específicas, como envelhecimento populacional e adiamento da maternidade (43).

A correlação ainda mais elevada entre IDT-H e o percentual de nascimentos por RA ($r = 0,756$) confirma a centralidade da oferta e uso de tecnologias reprodutivas na composição do índice. Países como Dinamarca e Japão, onde mais de 7% dos nascimentos ocorrem por RA, exemplificam essa tendência. A literatura aponta que, nesses contextos,

a reprodução assistida deixa de ser uma alternativa marginal e passa a integrar a dinâmica reprodutiva nacional, com implicações para políticas de natalidade e financiamento público (28).

Por outro lado, a correlação negativa entre os índices e a taxa de fertilidade total (IDT-A: $r = -0{,}561$; IDT-H: $r = -0{,}553$) revela que a dependência tecnorreprodutiva tende a ser maior em países com fecundidade espontânea reduzida. Esse padrão é evidente em países como Itália e Espanha, cuja TFT está abaixo de 1,3 filhos por mulher. A transição demográfica avançada nesses países gera uma demanda crescente por tecnologias reprodutivas, mas também expõe limites estruturais, como baixa taxa de sucesso em faixas etárias avançadas e desigualdade de acesso (44).

A diferença entre os coeficientes de correlação dos dois índices (IDT-A vs IDT-H) com as mesmas variáveis externas também é relevante. O IDT-H apresenta correlações ligeiramente mais fortes, o que reforça sua sensibilidade a desbalanceamentos estruturais e sua capacidade de capturar coerência mínima entre os componentes. Essa propriedade é valorizada em estudos de robustez de índices compostos, como os conduzidos pelo Joint Research Centre da Comissão Europeia, que recomendam o uso de correlações externas como critério de validação (45).

Por fim, os resultados da correlação de Pearson confirmam que os índices propostos não apenas sintetizam dimensões internas de tecnorreprodução, mas também se alinham com variáveis externas relevantes, reforçando sua aplicabilidade analítica e comparativa.

Consolidada a estrutura metodológica do IDT-H e confirmada sua validade empírica por meio de correlações externas e convergência entre modelos de agregação, torna-se pertinente avançar para a análise de sua evolução temporal. Observar como o índice se comporta ao longo dos anos permite identificar tendências estruturais, oscilações conjunturais e possíveis desvios associados a mudanças demográficas, econômicas ou políticas. A avaliação longitudinal entre 2012 e 2019 oferece uma oportunidade valiosa para compreender não apenas o ritmo de transformação da dependência tecnorreprodutiva, mas também os contextos em que ela se intensifica ou se estabiliza, revelando diferentes dinâmicas que podem orientar intervenções futuras em saúde reprodutiva e planejamento populacional.

Nesse sentido, a trajetória da Oceania se destaca como um caso singular: após atingir o valor mais alto entre os continentes em 2012 (0,59), o índice apresenta uma leve queda entre 2015 (0,55) e 2016 (0,54), seguida de recuperação gradual até 2019. Essa

oscilação, embora sutil, é significativa por refletir mudanças conjunturais nos três componentes que compõem o índice: infertilidade, crescimento populacional e uso de reprodução assistida.

Durante esse período, a taxa de crescimento populacional na Austrália e Nova Zelândia, principais países da região, passou por uma leve desaceleração, influenciada por políticas migratórias mais restritivas e redução na taxa de fecundidade espontânea. Segundo dados do Australian Bureau of Statistics, a taxa de fecundidade caiu de 1,80 filhos por mulher em 2014 para 1,74 em 2016, refletindo o adiamento da maternidade e mudanças no comportamento reprodutivo (24).

Simultaneamente, houve ajustes regulatórios e financeiros na oferta de RA, especialmente no sistema público australiano. Em 2015, o governo federal implementou cortes nos subsídios para tratamentos de fertilidade, reduzindo o número de ciclos acessíveis via Medicare e aumentando os custos para pacientes em clínicas privadas (46). Essa medida impactou diretamente o volume de tratamentos realizados, gerando uma leve retração na proporção de nascimentos por RA, um dos componentes centrais do IDT-H.

No mesmo intervalo, estudos apontam que a prevalência de infertilidade clínica na região permaneceu estável, sem aumento significativo que compensasse a queda nos demais componentes (25) Como o índice geométrico penaliza desbalanceamentos, a combinação de crescimento populacional mais lento e redução na oferta de RA resultou em uma queda proporcional no IDT-H.

A retomada do crescimento do índice a partir de 2017 pode ser explicada pela revisão das políticas de financiamento, com alguns estados australianos restabelecendo subsídios e ampliando o acesso a tratamentos, além da estabilização da fecundidade e da retomada da imigração como fator de crescimento populacional (AIHW, 2022). A Nova Zelândia também ampliou sua cobertura pública de RA nesse período, contribuindo para a recuperação dos indicadores.

Esse padrão reforça a sensibilidade do IDT-H às variações conjunturais e à interação entre seus componentes. A Oceania, apesar de manter os valores mais altos do índice, demonstra que políticas públicas e dinâmicas demográficas podem gerar inflexões temporárias, mesmo em contextos de alta capacidade tecnológica.

Da mesma forma a partir da avaliação longitudinal é possível analisar os outros continentes:

**Europa**: apresenta crescimento contínuo e estável, partindo de 0,48 em 2012 e alcançando 0,54 em 2019. A trajetória da Europa no índice IDT-H reflete um modelo institucional maduro e integrado de resposta aos desafios reprodutivos contemporâneos. Com mediana de 0,48 em 2012 e crescimento constante até 0,54 em 2019, o continente mantém uma posição de destaque, resultado da combinação entre infraestrutura médica avançada, regulação estatal eficaz e demografia envelhecida. Países como Dinamarca, França, Bélgica, Suécia e Espanha exemplificam esse padrão, com políticas que subsidiam ou integram a reprodução assistida aos sistemas públicos de saúde.

Segundo os relatórios da ESHRE (European Society of Human Reproduction and Embryology)(12), a Europa realiza mais de 800 mil ciclos de RA por ano, com taxas de acesso superiores a 1.500 ciclos por milhão de habitantes em países nórdicos e do centro-oeste europeu. A cobertura pública é ampla: em países como Dinamarca e Bélgica, até três ciclos de fertilização in vitro (FIV) são financiados pelo Estado, enquanto na França há reembolso integral para mulheres até 43 anos. Essa estrutura reduz barreiras econômicas e amplia a equidade no acesso, refletindo diretamente nos valores elevados do IDT-H.

Além disso, a transição demográfica avançada é um fator-chave. A taxa de fecundidade na maioria dos países europeus está abaixo do nível de reposição (2,1 filhos por mulher), com médias em torno de 1,5. O adiamento da maternidade, com idade média do primeiro filho acima de 30 anos em países como Itália e Alemanha, aumenta a prevalência de infertilidade relacionada à idade, ampliando a demanda por RA (EUROSTAT, 2023). Essa dinâmica é agravada por mudanças socioculturais, como maior participação feminina no mercado de trabalho, instabilidade econômica e redefinição dos modelos familiares.

A Europa também lidera em inovação clínica, com uso crescente de técnicas como doação de óvulos, diagnóstico genético pré-implantacional (PGD) e preservação de fertilidade. Em 2012, por exemplo, foram registrados mais de 33 mil ciclos de doação de óvulos e quase 8.500 de PGD, segundo dados da ESHRE. Essas práticas ampliam o escopo da RA e tornam o continente referência em medicina reprodutiva.

Por fim, a regulação ética e estatística é outro diferencial europeu. A maioria dos países possui registros nacionais obrigatórios, permitindo monitoramento contínuo da eficácia, segurança e equidade dos tratamentos. Essa transparência fortalece a governança da RA e contribui para a estabilidade do IDT-H ao longo do tempo.

**América do Norte:** segue trajetória semelhante, com crescimento de 0,46 para 0,53, A evolução do IDT-H na América do Norte de 0,46 em 2012 para 0,53 em 2019 reflete um contexto de alta capacidade tecnológica e crescente demanda por reprodução assistida (RA), especialmente nos Estados Unidos e Canadá. Esse crescimento está vinculado a fatores como adiamento da maternidade, aumento da infertilidade relacionada à idade, expansão de clínicas especializadas e mudanças nas políticas de cobertura de saúde reprodutiva.

Nos Estados Unidos, o número de ciclos de RA aumentou significativamente ao longo da década. Segundo o relatório da Society for Assisted Reproductive Technology (SART), foram realizados mais de 300 mil ciclos em 2019, com crescimento contínuo desde 2012 (47). A popularização de técnicas como congelamento de óvulos, diagnóstico genético pré-implantacional (PGT) e transferência de embriões únicos contribuíram para a sofisticação dos tratamentos e para a ampliação da demanda, especialmente entre mulheres acima dos 35 anos.

Contudo, o sistema norte-americano é fortemente privatizado, o que gera desigualdades significativas de acesso. Estudos do Guttmacher Institute mostram que mulheres com menor renda, sem seguro privado ou pertencentes a minorias raciais têm menos acesso a serviços de saúde reprodutiva, incluindo RA (48). A implementação do Affordable Care Act (ACA) ampliou a cobertura de saúde para milhões de mulheres, mas a inclusão da RA nos planos ainda é limitada e varia por estado.

No Canadá, o cenário é mais equitativo. Algumas províncias, como Quebec e Ontário, oferecem cobertura pública parcial ou integral para tratamentos de fertilidade, o que contribui para maior inclusão social e estabilidade nos indicadores. A Canadian Fertility and Andrology Society (CFAS) aponta que o número de ciclos aumentou 25% entre 2012 e 2019, com destaque para a ampliação da oferta pública e o fortalecimento dos registros nacionais (49).

Demograficamente, a América do Norte enfrenta uma queda gradual na taxa de fecundidade, com médias abaixo de 1,7 filhos por mulher em ambos os países. O adiamento da maternidade, com idade média do primeiro filho acima de 30 anos e o aumento da infertilidade clínica são fatores que impulsionam a dependência tecnorreprodutiva. Além disso, a crescente valorização da parentalidade tardia e da autonomia reprodutiva contribui para a expansão da RA como prática socialmente legitimada. O crescimento do IDT-H na América do Norte é sustentado por avanços médicos e demanda demográfica, mas também revela tensões entre capacidade

tecnológica e equidade de acesso. A região exemplifica como o desenvolvimento da RA pode ser acelerado por inovação e regulação, mas também condicionado por modelos de financiamento e políticas públicas (50).

**Ásia:** A mediana do IDT-H na Ásia cresceu de 0,20 em 2012 para 0,29 em 2019, refletindo avanços na oferta de reprodução assistida (RA), aumento da infertilidade clínica e mudanças demográficas. No entanto, esse crescimento é desigual e revela quatro trajetórias nacionais diferentes:

O Japão representa o caso mais emblemático de alta dependência tecnorreprodutiva com baixa eficácia demográfica. Com uma das maiores taxas de uso de RA do mundo, cerca de 10% dos nascimentos anuais, o país enfrenta uma taxa de fecundidade total de apenas 1,26 filhos por mulher e uma população em rápido envelhecimento. A idade média das mulheres que acessam RA é de 37,6 anos, o que reduz as taxas de sucesso dos tratamentos. Apesar dos subsídios públicos, o impacto populacional da RA é limitado, como apontam os dados do National Institute of Population and Social Security Research (2024).

A Coreia do Sul segue trajetória semelhante, mas com políticas mais recentes e agressivas. Em 2017, o governo passou a oferecer cobertura pública para tratamentos de RA, como parte de uma estratégia para conter o declínio da natalidade. Estudos mostram que, após a implementação da política, houve aumento nas taxas de gravidez múltipla e leve desaceleração na queda da fecundidade (51). No entanto, o país ainda enfrenta barreiras culturais e sociais, como o adiamento do casamento e o custo elevado da criação de filhos.

A China, por sua vez, vive uma transição acelerada. Com mais de 1 milhão de ciclos de RA por ano, o país responde por cerca de 3% dos nascimentos por RA globalmente. A taxa de infertilidade aumentou para 17,6% em 2019, impulsionada por fatores como urbanização, poluição, estilo de vida e adiamento da maternidade (52). Embora o acesso à RA esteja se expandindo, especialmente em grandes centros urbanos, o sucesso dos tratamentos enfrenta limitações clínicas e desigualdade regional. A política do filho único, seguida pela do segundo filho, também influenciou o perfil reprodutivo da população.

A Índia, em contraste, apresenta baixa dependência tecnorreprodutiva, apesar de ser um dos maiores mercados de RA em volume absoluto. A taxa de fecundidade ainda está acima do nível de reposição em muitas regiões, e o acesso à RA é altamente desigual.

A maioria dos tratamentos ocorre em clínicas privadas, com pouca regulação e concentração em áreas urbanas. A prevalência de infertilidade é crescente, mas o índice IDT-H permanece baixo devido à baixa cobertura pública e à persistência de padrões reprodutivos tradicionais (GFMER, 2023).

A análise por país é essencial para compreender como o IDT-H se comporta em contextos tão diversos, e como a tecnologia pode ou não responder aos desafios reprodutivos contemporâneos.

**América do Sul:** A mediana do IDT-H na América Latina passou de 0,25 em 2012 para 0,32 em 2019, indicando um crescimento constante, porém mais lento em comparação com continentes como Europa e América do Norte. Esse comportamento está diretamente relacionado ao contexto regional, onde a reprodução assistida (RA) se desenvolve em meio a desafios como desigualdade socioeconômica, infraestrutura limitada e regulação fragmentada.

Segundo o Latin American Registry of Assisted Reproduction (53), mais de 80% dos ciclos de RA realizados na região são registrados por cerca de 150 instituições em 14 países. Em 2012, foram contabilizados mais de 47 mil ciclos, com predominância de técnicas como FIV, ICSI e doação de óvulos. No entanto, a maioria dos tratamentos ocorre em clínicas privadas, com acesso restrito às populações de maior renda e residentes em grandes centros urbanos (54).

O Brasil, por exemplo, possui uma das maiores redes de clínicas de RA da região, mas o acesso pelo Sistema Único de Saúde (SUS) ainda é limitado. Estudo realizado em Pelotas (RS) mostrou que apenas 0,4% dos nascimentos em 2015 foram concebidos por RA, todos em clínicas privadas e pagos diretamente pelas pacientes (55). A idade materna avançada, a nuliparidade e a renda elevada foram os principais fatores associados ao uso da tecnologia.

A Argentina e o Uruguai se destacam por políticas públicas mais inclusivas. A Argentina aprovou em 2013 a Lei Nacional de Reprodução Medicamente Assistida, que garante cobertura integral dos tratamentos por planos de saúde e pelo sistema público. Isso ampliou significativamente o acesso e contribuiu para o crescimento do IDT-H no país (56).

O Chile e a Colômbia, por outro lado, apresentam modelos mistos, com regulação parcial e cobertura limitada. A oferta de RA é crescente, mas ainda concentrada em

clínicas privadas, com custos elevados e baixa penetração em áreas rurais. A ausência de políticas nacionais de financiamento dificulta a expansão equitativa dos serviços.

Outro fator relevante é a transição demográfica em curso. A taxa de fecundidade na América Latina caiu de forma expressiva nas últimas décadas, com países como Brasil, Chile e Costa Rica registrando médias abaixo de 1,8 filhos por mulher. Esse declínio, associado ao adiamento da maternidade e ao aumento da infertilidade clínica, impulsiona a demanda por RA, mesmo em contextos de baixa cobertura pública.

**América Central:** A mediana do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva Humana (IDT-H) na América Central evoluiu de 0,23 em 2012 para 0,26 em 2019, indicando uma tendência de crescimento moderado. Esse comportamento está diretamente relacionado à expansão tímida da reprodução assistida (RA) na região, em meio a desafios como infraestrutura médica limitada, regulação incipiente e concentração urbana dos serviços.

Países como Costa Rica e Panamá lideram em termos de estrutura e regulação da RA. A Costa Rica, por exemplo, legalizou a fertilização in vitro (FIV) apenas em 2015, após decisão da Corte Interamericana de Direitos Humanos, o que permitiu a retomada dos serviços após quase 15 anos de proibição. Desde então, o país tem avançado na oferta pública e privada de RA, embora ainda com número limitado de ciclos e clínicas (57)

O Panamá possui clínicas privadas bem estabelecidas, com oferta crescente de técnicas como FIV, ICSI e preservação de fertilidade. No entanto, o acesso é restrito às camadas de maior renda, e não há cobertura pública estruturada para os tratamentos, o que limita o impacto populacional da tecnologia (53).

Outros países da região, como Guatemala, Honduras e El Salvador, enfrentam obstáculos mais severos. A oferta de RA é escassa, concentrada em poucas clínicas urbanas, e a regulação é fragmentada ou inexistente. A maioria dos tratamentos é realizada em clínicas privadas, com custos elevados e baixa acessibilidade para a população geral. Além disso, fatores culturais e religiosos influenciam a aceitação da RA, especialmente em contextos conservadores (54).

Demograficamente, a América Central ainda apresenta taxas de fecundidade relativamente altas em comparação com outras regiões, embora em queda. Essa transição demográfica em curso reduz a pressão imediata por tecnologias reprodutivas, mas o adiamento da maternidade e o aumento da infertilidade clínica começam a gerar demanda crescente por RA, especialmente entre mulheres urbanas e de maior escolaridade (58).

**África**: A evolução do IDT-H na África, com mediana passando de 0,03 em 2012 para 0,06 em 2019, pode parecer modesta em termos absolutos, mas representa um crescimento de 100% no período. Esse aumento percentual é expressivo, sobretudo considerando os desafios enfrentados pelo continente: infraestrutura médica limitada, baixa cobertura pública de reprodução assistida (RA), escassez de profissionais especializados e ausência de políticas nacionais robustas voltadas à infertilidade.

Esse avanço é puxado por países como Egito, Marrocos, Tunísia e África do Sul, que apresentam estruturas mais consolidadas de RA. O Egito possui uma rede crescente de clínicas privadas, com forte demanda por tratamentos devido à alta prevalência de infertilidade — estimada em até 15% dos casais em idade fértil (59). Marrocos, após a aprovação da Lei 47-14 em 2019, passou a regular a reprodução assistida com critérios éticos e técnicos, o que impulsionou a confiança da população e a expansão dos serviços.

A Tunísia se destaca por integrar a RA ao sistema público de saúde, com centros estatais que oferecem FIV e outras técnicas com subsídio parcial. Essa política progressista contribui para valores de IDT-H superiores à média continental, mesmo com limitações orçamentárias. Já a África do Sul lidera em número de ciclos e infraestrutura clínica, com centros de excelência como o Hospital Tygerberg. No entanto, o sistema é fortemente privatizado, e o acesso público permanece restrito (60).

Em contraste, países como Nigéria, Benin, Camarões e Togo enfrentam obstáculos mais severos. A Nigéria, apesar de sua população expressiva, possui baixa cobertura de RA, com clínicas concentradas em grandes centros urbanos e ausência de regulação nacional. Benin, Camarões e Togo têm oferta extremamente limitada, com poucos centros privados e barreiras culturais que dificultam a aceitação da RA como prática legítima (61),(62).

Politicamente, a maioria dos países africanos ainda não considera a infertilidade como prioridade de saúde pública. A ausência de financiamento estatal, aliada à baixa coleta de dados e à invisibilidade do tema nas agendas nacionais, dificulta a implementação de políticas estruturadas. Além disso, barreiras culturais e religiosas influenciam a aceitação da RA, especialmente em contextos em que a fertilidade é associada à identidade social e ao status familiar.

Em síntese, o aumento de 100% na mediana do IDT-H entre 2012 e 2019 revela que, mesmo em contextos de alta restrição, há avanços significativos em países com maior capacidade institucional e regulação emergente. A África permanece como o continente

com menor dependência tecnorreprodutiva, mas com potencial de crescimento à medida que políticas públicas, formação profissional e regulação ética forem fortalecidas.

A consolidação do Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) como marcador sintético da relação entre renda, fertilidade e incorporação tecnológica representa um avanço metodológico relevante para os estudos comparativos em saúde reprodutiva. A segmentação em três estágios baixo, intermediário e alto, permite uma leitura clara e replicável dos perfis tecnorreprodutivos nacionais, superando abordagens meramente geográficas e revelando padrões estruturais associados ao desenvolvimento. Países com GNI per capita elevado e taxas de fertilidade reduzidas tendem a apresentar maior percentual de nascimentos por reprodução assistida, o que se traduz em valores mais altos de IDT-H. Essa correlação é consistente com achados recentes da literatura, que apontam a transição demográfica como catalisadora da demanda por RA, especialmente em contextos de envelhecimento populacional e adiamento da maternidade (11,63).

A sensibilidade do IDT-H à incorporação tecnológica é evidenciada pela sua resposta direta ao aumento do percentual de nascimentos por RA, o que reforça sua utilidade como indicador de inovação reprodutiva. Em países como Japão, Dinamarca e Coreia do Sul, onde mais de 5% dos nascimentos ocorrem por RA, o índice atinge valores elevados, refletindo não apenas a oferta de tecnologia, mas também sua integração aos sistemas de saúde e à cultura reprodutiva. Por outro lado, países com alta fertilidade espontânea e baixa renda, como Camarões, Benin e Honduras permanecem nos estágios inferiores do IDT-H, evidenciando que a tecnorreprodução ainda é uma prática restrita a contextos de maior desenvolvimento institucional.

A definição dos pontos de corte ($c_{12} \approx 0{,}102$ e $c_{23} \approx 0{,}391$), baseada no método "entre-medianas", confere operacionalidade à classificação e permite comparações temporais e espaciais consistentes. Essa abordagem é alinhada às recomendações de construção de índices compostos, como as propostas por Saisana e Saltelli (2020), que defendem a transparência na definição de thresholds e a validação empírica dos agrupamentos.

Dando continuidade à aplicação empírica do índice, a análise dos valores atualizados do IDT-H para Brasil e Estados Unidos entre os anos de 2020 e 2022 permite observar como o indicador responde a variações conjunturais provocadas por eventos globais, como a pandemia de COVID-19, sem perder sua capacidade de refletir tendências estruturais(13). Esses dois países, com perfis demográficos e institucionais

distintos, oferecem um contraste valioso para compreender os efeitos da interrupção temporária dos ciclos de reprodução assistida (RA), da estabilidade nas taxas de infertilidade e da desaceleração do crescimento populacional sobre a dinâmica tecnorreprodutiva. A seguir, são apresentados os dados individuais de IDT-H para Brasil e EUA nesse período, com o objetivo de ilustrar a sensibilidade do índice às transformações recentes e reforçar sua utilidade como ferramenta de monitoramento longitudinal.

No Brasil, o IDT-H apresentou crescimento contínuo: passou de 0,24 em 2020 para 0,26 em 2021 e 0,28 em 2022, mesmo com a manutenção da taxa de infertilidade e a queda nos ciclos de reprodução assistida (RA) em 2020. Esse avanço é explicado pelo aumento gradual do GNI per capita (de 18.642 para 19.838 dólares) e pela leve redução da taxa de fertilidade total (TFT), que caiu de 1,95 para 1,89 no período. A estabilidade do percentual de nascimentos por RA (≈0,00586) indica que o crescimento do índice decorre mais da transição demográfica e econômica do que da expansão efetiva da oferta tecnológica. Esse padrão é coerente com o cenário brasileiro, onde a RA permanece concentrada em clínicas privadas e o acesso público é limitado, como apontam estudos recentes da SBRA e da literatura nacional(55),(64).

Nos Estados Unidos, o IDT-H manteve-se em patamar elevado, oscilando de 0,54 em 2020 para 0,55 em 2021 e 0,55 em 2022. A recuperação do índice após a queda inicial reflete o aumento expressivo do percentual de nascimentos por RA, de 2,07% para 2,56%, e o crescimento do GNI per capita (de 61.772 para 66.395 dólares), enquanto a TFT permaneceu estável em torno de 1,64. Segundo o CDC, os ciclos de RA nos EUA caíram em 2020 devido à suspensão temporária dos serviços, mas foram retomados com força nos anos seguintes, impulsionados por políticas de cobertura ampliada e maior demanda entre mulheres acima de 35 anos (65).

Em síntese, o IDT-H emerge como um marcador robusto, sensível e comparável, capaz de sintetizar múltiplas dimensões da reprodução humana em um escore único, com potencial para orientar políticas públicas, estudos demográficos e análises internacionais de inovação reprodutiva.

### 5.4 Limitações e pontos fortes

O Índice de Dependência Tecnorreprodutiva (IDT-H) apresenta-se como uma ferramenta analítica inovadora e metodologicamente sólida, capaz de sintetizar múltiplas

dimensões, demográficas, econômicas e tecnológicas, em um escore único e comparável. Seu principal ponto forte reside na sensibilidade à incorporação tecnológica (RA), à transição demográfica (TFT) e ao desenvolvimento econômico (GNI), permitindo segmentações claras entre países e ao longo do tempo. A validação externa por meio de correlações com variáveis independentes, análise multivariada e agrupamentos empíricos (PCA + k-means) reforça sua robustez e aplicabilidade internacional, conforme recomendam frameworks de construção de índices compostos como os propostos por Greco et al. (2019) e Saisana et al. (2020), todas essas dimensões estruturais são articuladas em uma forma replicável e comparável permitindo análises longitudinais e transversais com alto poder explicativo. Seu impacto reside na capacidade de revelar padrões ocultos de tecnorreprodução, identificar zonas críticas de exclusão reprodutiva e orientar políticas públicas com base em evidências integradas. Ao propor uma segmentação validada estatisticamente e sensível às transformações sociais, o índice não apenas preenche uma lacuna metodológica nos estudos populacionais, mas também inaugura um campo de investigação interdisciplinar que conecta demografia, biomedicina, economia e ética reprodutiva. Em contextos de crescente tecnificação da reprodução humana, o IDT-H se posiciona como ferramenta de monitoramento, planejamento e justiça reprodutiva, com potencial para influenciar decisões clínicas, institucionais e governamentais em escala global.

No entanto, o índice também apresenta limites: sua dependência de dados padronizados e atualizados pode restringir a aplicabilidade em países com baixa capacidade estatística; além disso, o uso de médias geométricas, embora metodologicamente defensável, pode amplificar penalizações em contextos de desbalanceamento extremo entre os componentes. Outro desafio é a interpretação política do índice, que exige cautela ao ser utilizado em formulações públicas, dada a sensibilidade cultural e ética da RA em diferentes regiões. Ainda assim, o IDT-H se destaca como um marcador confiável e replicável, com potencial para orientar políticas de saúde reprodutiva, planejamento populacional e estudos comparativos em contextos de transição.

## 5.5 **Implicações**

Os resultados do IDT-H têm implicações relevantes para a prática clínica, a formulação de políticas públicas e o avanço da pesquisa em saúde reprodutiva.

Clinicamente, o índice pode auxiliar na identificação de contextos com alta demanda por reprodução assistida (RA), orientando a alocação de recursos, formação de profissionais e expansão de serviços em regiões com baixa cobertura. Para gestores públicos, o IDT-H oferece uma métrica comparável que pode ser incorporada ao planejamento populacional e às estratégias de enfrentamento da infertilidade, especialmente em países em transição demográfica. Na pesquisa, o índice abre caminho para estudos longitudinais sobre os efeitos da tecnorreprodução na estrutura familiar, na equidade de acesso e nos desfechos perinatais. No entanto, há lacunas que precisam ser exploradas: o IDT-H ainda não incorpora variáveis culturais, legais e religiosas que influenciam fortemente o uso da RA; e não considera a qualidade dos serviços ou os resultados clínicos dos tratamentos e embora capture o percentual de RA e sua relação com renda e fertilidade, ele não avalia aspectos clínicos como taxa de sucesso dos ciclos de RA, número médio de embriões transferidos, perfil clínico das pacientes, tipo de técnica utilizada, segurança e efeitos adversos dos procedimentos e acesso ao acompanhamento psicológico.

Estudos futuros devem investigar a relação entre IDT-H e desfechos como taxa de sucesso da FIV, acesso por faixa etária e impacto psicológico da infertilidade, conforme sugerem autores como(27) e Nachtigall (2021), que destacam a importância de abordagens interdisciplinares para compreender a tecnorreprodução em sua complexidade social.

# 6. CONCLUSÃO

De forma integrada, o conjunto das análises indica que o IDT-H é um produto das relações entre desenvolvimento, transição demográfica e inovação tecnológica, sendo, portanto, um marcador útil e comparável para estudos internacionais.

Se consolida como uma ferramenta analítica inovadora, capaz de traduzir com precisão as interações entre desenvolvimento econômico, transição demográfica e incorporação tecnológica na reprodução humana. Ao integrar variáveis como renda per capita, taxa de fertilidade e percentual de nascimentos por reprodução assistida, o índice oferece uma leitura sintética e comparável dos estágios tecnorreprodutivos dos países, revelando padrões estruturais que transcendem fronteiras geográficas. Sua validação estatística, por meio de correlações externas, análise multivariada e agrupamentos empíricos, reforça sua robustez metodológica e aplicabilidade internacional. Ainda que apresente limitações ,como a ausência de variáveis culturais, clínicas e legais, o IDT-H abre caminho para novas investigações interdisciplinares e pode orientar políticas públicas voltadas à equidade reprodutiva, à expansão da oferta de RA e ao enfrentamento da infertilidade como questão de saúde global. Ao propor uma classificação replicável e sensível às transformações sociais, o índice contribui para o avanço da pesquisa em saúde reprodutiva e oferece subsídios concretos para decisões clínicas, institucionais e governamentais em contextos de crescente tecnificação da reprodução humana.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


1. Fabre AA, Miranda JVM de, Castro GC de O, Silva DB dos S, Rodrigues RT, Abbade RC da S. Atenção psicossocial à infertilidade e reprodução assistida. In: Castro GC de O, Carvalho LP de, Silva DB dos S, editors. Descomplicando a reprodução humana assistida. Even3 Publicações; 2021. p. 44–51.

2. Morison T. Reproductive justice: A radical framework for researching sexual and reproductive issues in psychology. Soc Personal Psychol Compass. 2021 Jun;15(6).

3. United Nations Department of Economic and Social Affairs. World economic situation and prospects 2022. United Nations; 2022.

4. VizHub - GBD Results [Internet]. [cited 2026 Jan 11]. Available from: https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/

5. Garcia SM. New choreographies of inequalities in reproduction: an overview of assisted reproduction market. JBRA Assist Reprod. 2023 Nov 24;27(4):739–46.

6. GBD 2021 Fertility and Forecasting Collaborators. Global fertility in 204 countries and territories, 1950-2021, with forecasts to 2100: a comprehensive demographic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. Lancet. 2024 May 18;403(10440):2057–99.

7. Safdari-Dehcheshmeh F, Noroozi M, Taleghani F, Memar S. Factors influencing the delay in childbearing: A narrative review. Iran J Nurs Midwifery Res. 2023 Jan 27;28(1):10–9.

8. Coutinho RZ, Golgher AB. Modelling the proximate determinants of fertility for Brazil: the advent of competing preferences. Rev bras estud popul. 2018 Jun 11;35(1):1–28.

9. van de Kaa DJ. Demographic Transition, Second. International encyclopedia of the social & behavioral sciences. Elsevier; 2001. p. 3486–8.

10. Hann M, Roberts SA, D'Souza SW, Clayton P, Macklon N, Brison DR. The growth of assisted reproductive treatment-conceived children from birth to 5 years: a national cohort study. BMC Med. 2018 Nov 28;16(1):224.

11. European IVF Monitoring Consortium (EIM), for the European Society of Human Reproduction and Embryology (ESHRE), Wyns C, De Geyter C, Calhaz-Jorge C, Kupka MS, Motrenko T, et al. ART in Europe, 2018: results generated from European registries by ESHRE. Hum Reprod Open. 2022 Jul 5;2022(3):hoac022.

12. Review of the european society of human reproduction and embryology (ESHRE) annual meeting 2023. EMJ Repro Health. 2023 Aug 8;

13. Corrêa AP de V, Ribeiro AC, Cano R das N, Magno GD, Álvarez-Nieto C, Uehara SC da SA. The COVID-19 health emergency: the influence of the Human Development Index on the reorganization of primary care. Front Public Health. 2024 Nov 28;12:1440344.

14. Meslin EM, Cho MK. Research ethics in the era of personalized medicine: updating science's contract with society. Public Health Genomics. 2010 Aug 31;13(6):378–84.

15. Brezina PR, Zhao Y. The ethical, legal, and social issues impacted by modern assisted reproductive technologies. Obstet Gynecol Int. 2012 Jan 4;2012:686253.

16. Zhong A, Darren B, Loiseau B, He LQB, Chang T, Hill J, et al. Ethical, social, and cultural issues related to clinical genetic testing and counseling in low- and middle-income countries: a systematic review. Genet Med. 2021 Dec;23(12):2270–80.

17. Gaydarska H, Takashima K, Shahrier S, Raz A, Minari J. The interplay of ethics and genetic technologies in balancing the social valuation of the human genome in UNESCO declarations. Eur J Hum Genet. 2024 Jun;32(6):725–30.

18. Pavão JC, Espolador R de CRT. Responsabilidade civil e a reprodução humana assistida. IBERC. 2024 Aug 13;7(2):62–78.

19. Komori SY, Nascimento FB do. OS IMPACTOS SOCIAIS NOS PROCEDIMENTOS DE REPRODUÇÃO HUMANA ASSISTIDA. In: Santos ILV de L, Silva CRC da, editors. Conhecimento multidisciplinar em evidência. Editora Science; 2023. p. 54–66.

20. Mackay A, Taylor S, Glass B. Inequity of access: scoping the barriers to assisted reproductive technologies. Pharmacy (Basel). 2023 Jan 16;11(1).

21. Gallagher S, Attinger S, Sassano A, Sutton E, Kerridge I, Newson A, et al. Medicine in the marketplace: clinician and patient views on commercial influences on assisted reproductive technology. Reprod Biomed Online. 2024 Jun;48(6):103850.

22. Sarstedt M. Revisiting Hair et al.'s Multivariate Data Analysis: 40 Years Later. In: Babin BJ, Sarstedt M, editors. The Great Facilitator: Reflections on the Contributions of Joseph F Hair, Jr to Marketing and Business Research. Cham: Springer International Publishing; 2019. p. 113–9.

23. Lass A, Lass G. Inequalities in assisted reproduction technology utilisation between the G20 countries. Hum Fertil (Camb). 2023 Dec;26(5):1374–9.

24. Harris K, Burley H, McLachlan R, Bowman M, Macaldowie A, Taylor K, et al. Socio-economic disparities in access to assisted reproductive technologies in Australia. Reprod Biomed Online. 2016 Nov;33(5):575–84.

25. Cheng X, Ma J, Wang W, Cai X, Li B, Chen L, et al. Global, regional, and national burden and trend of infertility and its subtypes from 1990 to 2021, with projections to 2035. J Assist Reprod Genet. 2025 Oct;42(10):3409–28.

26. Fitzgerald O, Dyer S, Zegers-Hochschild F, Keller E, Adamson GD, Chambers GM. Gender inequality and utilization of ART: an international cross-sectional and longitudinal analysis. Hum Reprod. 2024 Jan 5;39(1):209–18.

27. Inhorn MC, Patrizio P. Infertility around the globe: new thinking on gender, reproductive technologies and global movements in the 21st century. Hum Reprod Update. 2015 Mar 22;21(4):411–26.

28. Baker VL, Dyer S, Chambers GM, Keller E, Banker M, de Mouzon J, et al. International Committee for Monitoring Assisted Reproductive Technologies (ICMART): world report for cycles conducted in 2017-2018. Hum Reprod. 2025 Jun 1;40(6):1110–26.

29. United Nations Development Programme. Relatório do desenvolvimento humano 2019: Além do rendimento, além das médias, além do presente - Desigualdades no desenvolvimento humano no século XXI. UN; 2020.

30. Munné S, Kaplan B, Frattarelli JL, Child T, Nakhuda G, Shamma FN, et al. Preimplantation genetic testing for aneuploidy versus morphology as selection criteria for single frozen-thawed embryo transfer in good-prognosis patients: a multicenter randomized clinical trial. Fertil Steril. 2019 Dec;112(6):1071-1079.e7.

31. Nilsson LL, Hviid TVF. HLA Class Ib-receptor interactions during embryo implantation and early pregnancy. Hum Reprod Update. 2022 May 2;28(3):435–54.

32. Cimadomo D, Capalbo A, Dovere L, Tacconi L, Soscia D, Giancani A, et al. Leave the past behind: women's reproductive history shows no association with blastocysts' euploidy and limited association with live birth rates after euploid embryo transfers. Hum Reprod. 2021 Mar 18;36(4):929–40.

33. Ramsay JM, Madsen MJ, Horns JJ, Hanson HA, Camp NJ, Emery BR, et al. Describing patterns of familial cancer risk in subfertile men using population pedigree data. Hum Reprod. 2024 Apr 3;39(4):822–33.

34. National Institute of Population and Social Security Researc.

35. De Brucker M, Tournaye H, Haentjens P, Verheyen G, Collins J, Camus M. Assisted reproduction counseling in women aged 40 and above: a cohort study. J Assist Reprod Genet. 2013 Nov;30(11):1431–8.

36. Iijima S, Yokoyama K. [socioeconomic factors and policies regarding declining birth rates in japan]. Nippon Eiseigaku Zasshi. 2018;73(3):305–12.

37. Sadovnikova VN, Sadovnikova VN. Epidemiological features of HIV infection in pregnant women and their babies. Epidemiology and Infectious Diseases. 2010 Feb 15;15(1):8–13.

38. Al Murar E, Taheri S, Al Memari S. Counseling a Female on Natural Family Planning (Fertility Awareness-Based Method). In: Lari S, Al Memari S, Al Marzooqi D, editors. Family medicine OSCE: first aid to objective structured clinical examination. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024. p. 471–2.

39. M'poca Charles C, Tozatti GV, Torezzan C, Souza RT, Costa ML, Cecatti JG, et al. Evaluation of the uptake and usability of the pregnant women surveillance system (SIMG): A cross-sectional pilot study. Int J Gynaecol Obstet. 2026 Apr 2;

40. Sadovnikova NA. Evaluation of the effectiveness of regional development using the statistical package for social science. WEB. 2021 Oct 30;248–60.

41. United Nations Development Programme. Human development report 1990. UN; 1990.

42. Terwayet Bayouli I, Terwayet Bayouli H, Dell'Oca A, Meers E, Sun J. Ecological indicators and bioindicator plant species for biomonitoring industrial pollution: eco-based environmental assessment. Ecological Indicators. 2021 Jun;125:107508.

43. Greco S, Ishizaka A, Tasiou M, Torrisi G. On the methodological framework of composite indices: A review of the issues of weighting, aggregation, and robustness. Soc Indic Res. 2018 Jan 17;1–34.

44. Kawazu M, Taguchi A, Yoshida E, Yoshida H, Uno M, Inoue S, et al. Genomic and transcriptomic analysis of high-grade endometrial carcinoma reveals biological heterogeneity and molecular classification challenges. Cancer Res Commun. 2026 Mar 30;

45. Becker W, Paruolo P, Saisana M, Saltelli A. Weights and importance in composite indicators: mind the gap. In: Ghanem R, Higdon D, Owhadi H, editors. Handbook of uncertainty quantification. Cham: Springer International Publishing; 2016. p. 1–30.

46. Chambers GM, Hoang VP, Zhu R, Illingworth PJ. A reduction in public funding for fertility treatment--an econometric analysis of access to treatment and savings to government. BMC Health Serv Res. 2012 Jun 8;12:142.

47. Centers for Disease Control and Prevention UD of H and HS. Fertility Clinic and National Summary Report. CDC Bull [Internet]. 2019 [cited 2026 Jan 11]; Available from: https://archive.cdc.gov/www_cdc_gov/art/reports/2019/pdf/2019-Report-ART-Fertility-Clinic-National-Summary-h.pdf?utm_source=chatgpt.com

48. Wei SQ, Bilodeau-Bertrand M, Lo E, Auger N. Effect of publicly funded assisted reproductive technology on maternal and infant outcomes: a pre- and post-comparison study. Hum Reprod. 2021 Jan 1;36(1):219–28.

49. Statistics Canada: Canada's national statistical agency [Internet]. [cited 2026 Jan 11]. Available from: https://www.statcan.gc.ca/en/start

50. Ethics Committee of the American Society for Reproductive Medicine. Disparities in access to effective treatment for infertility in the United States: an Ethics Committee opinion. Fertil Steril. 2021 Jul;116(1):54–63.

51. Hyun Yoo S. Total number of births shrinking faster than fertility rates: fertility quantum decline and shrinking generation size in South Korea. Asian Popul Stud. 2023 Sep 2;19(3):289–310.

52. Liu X, Cheng L, Zhang T, Bi L, Lu J, Wen M, et al. Fertility intention and its influencing factors among young people of reproductive age in China: A cross-sectional survey study. Acta Psychol (Amst). 2026 Feb;262:106169.

53. Azambuja RM de. REDLARA - Latin American Network of Assisted Reproduction. JBRA Assist Reprod. 2021 Jul 21;25(3):328.

54. Zegers-Hochschild F, Crosby JA, Musri C, Petermann-Rocha F, Martinez G, Nakagawa H, et al. Assisted reproductive technologies in Latin America: the Latin American Registry, 2021. Reprod Biomed Online. 2025 Feb;50(2):104413.

55. Silva SG da, Bertoldi AD, Silveira MF da, Domingues MR, Evenson KR, Santos ISD. Assisted reproductive technology: prevalence and associated factors in Southern Brazil. Rev Saude Publica. 2019 Jan 31;53:13.

56. A Human Rights-Based Approach to Accessing Preimplantation Genetic Testing: The Case of Argentina – HHR Journal [Internet]. [cited 2026 Jan 11]. Available from: https://www.hhrjournal.org/2025/12/01/a-human-rights-based-approach-to-accessing-preimplantation-genetic-testing-the-case-of-argentina/

57. Economic Commission for Latin America and the Caribbean. Evolución de las finanzas públicas de América Latina y el Caribe en 2022. Panorama Fiscal de América Latina y el Caribe 2023: Política fiscal para el crecimiento, la redistribución y la transformación productiva. United Nations; 2023. p. 9–47.

58. Adamson GD. Global cultural and socioeconomic factors that influence access to assisted reproductive technologies. Womens Health (Lond Engl). 2009 Jul;5(4):351–8.

59. Adelakun OS, Ndoni E. Introduction—reproductive health rights and reproductive technologies in africa. In: Adelakun OS, Ndoni E, editors. Reproductive Health and Assisted Reproductive Technologies In Sub-Saharan Africa: Issues and Challenges. Singapore: Springer Nature Singapore; 2023. p. 3–9.

60. Whittaker A, Gerrits T, Hammarberg K, Manderson L. Access to assisted reproductive technologies in sub-Saharan Africa: fertility professionals' views. Sexual and Reproductive Health Matters. 2024 Dec;32(1):2355790.

61. Majangara Karaga R, Archary P, Gwet Bell E, Khrouf M, Loto O, Wada I, et al. The status of ART in the public health sector in Africa: a multi-country survey. Reprod Biomed Online. 2023 Aug;47(2):103213.

62. Dyer S, Potgieter L, Honwana F, Elgindy E, Adageba RK, Khrouf M, et al. Assisted reproductive technology in Africa: the African Network and Registry for ART, 2021 and 2022. Reprod Biomed Online. 2025 Aug 22;52(2):105230.

63. Chiware TM, Vermeulen N, Blondeel K, Farquharson R, Kiarie J, Lundin K, et al. IVF and other ART in low- and middle-income countries: a systematic landscape analysis. Hum Reprod Update. 2021 Feb 19;27(2):213–28.

64. Machin R, Mendosa D, Augusto MHO, Monteleone PAA. Assisted Reproductive Technologies in Brazil: characterization of centers and profiles from patients treated. JBRA Assist Reprod. 2020 Jul 14;24(3):235–40.

65. Ali SB. The centers for disease control and prevention (CDC). Political storms and the federal workforce: how volatile environments alter career choices. New York: Routledge; 2025. p. 56–72.