

INTEGRANDO NÍVEIS DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA (TRL) E METODOLOGIAS ÁGEIS PARA A GESTÃO DE INCERTEZAS EM PROJETOS DE P&D&I

*INTEGRATING TECHNOLOGY READINESS LEVELS (TRL) AND AGILE
METHODOLOGIES FOR UNCERTAINTY MANAGEMENT IN R&D&I PROJECTS*

EMILIANA MARGOTTI
FUNDAÇÃO CERTI

BIANCA COSTA AMORIM
FUNDAÇÃO CERTI

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

INTEGRANDO NÍVEIS DE PRONTIDÃO TECNOLÓGICA (TRL) E METODOLOGIAS ÁGEIS PARA A GESTÃO DE INCERTEZAS EM PROJETOS DE P&D&I

Objetivo do estudo

Propor um framework que integra TRL, como mapa de maturidade, e ciclos ágeis, permitindo avançar de forma estruturada em projetos de P&D&I, mas preservando flexibilidade e adaptação às incertezas inerentes ao processo de inovação tecnológica.

Relevância/originalidade

A originalidade reside em conciliar a abordagem prescritiva do TRL com a adaptabilidade ágil, criando um modelo robusto para a dinâmica não linear de projetos de P&D&I, capaz de reduzir riscos e ampliar a eficiência da gestão da inovação.

Metodologia/abordagem

Adotou-se uma abordagem qualitativa, baseada em revisão bibliográfica sobre TRL e gestão ágil. A análise fundamentou a proposta de um modelo conceitual integrado, voltado a orientar a gestão de projetos de P&D&I em ambientes incertos e dinâmicos.

Principais resultados

O estudo resultou em um modelo que define níveis TRL como metas de maturidade a serem validadas em ciclos ágeis, permitindo aprendizado contínuo, rastreabilidade de resultados e redução progressiva das incertezas técnicas, mercadológicas e organizacionais em projetos de P&D&I.

Contribuições teóricas/metodológicas

O trabalho expande a aplicação do TRL além da métrica avaliativa, posicionando-o como elemento central no planejamento de ciclos ágeis. Metodologicamente, propõe uma abordagem híbrida inovadora para estruturar e conduzir projetos de P&D&I com maior confiabilidade.

Contribuições sociais/para a gestão

O modelo oferece aos gestores ferramenta prática que pode ser utilizada para reduzir riscos da inovação. Com marcos claros de validação, facilita a travessia do “Vale da Morte” e amplia a atratividade de projetos de P&D&I perante investidores e agências de fomento.

Palavras-chave: Nível de Prontidão Tecnológica (TRL), Gestão de Projetos Ágil, Projetos de P&D&I

INTEGRATING TECHNOLOGY READINESS LEVELS (TRL) AND AGILE METHODOLOGIES FOR UNCERTAINTY MANAGEMENT IN R&D&I PROJECTS

Study purpose

To propose a framework that integrates TRL, as a maturity roadmap, with agile cycles, enabling structured advancement in R&D&I projects while preserving flexibility and adaptation to the inherent uncertainties of technological innovation processes.

Relevance / originality

Originality lies in reconciling TRL's prescriptive milestones with agile adaptability, creating a robust management model for the nonlinear dynamics of R&D&I projects, capable of reducing risks and enhancing innovation management efficiency.

Methodology / approach

A qualitative approach was adopted, based on a literature review of TRL, TRA/TQP, and agile management. The analysis supported the proposal of an integrated conceptual model aimed at guiding R&D&I projects in uncertain and dynamic environments.

Main results

The study resulted in a model that defines TRL levels as maturity targets validated in agile cycles, enabling continuous learning, traceability of results, and progressive reduction of technical, market, and organizational uncertainties in R&D&I projects.

Theoretical / methodological contributions

The work expands TRL's application beyond assessment metrics, positioning it as a central element in agile cycle planning. Methodologically, it proposes an innovative hybrid approach to structure and manage R&D&I projects with greater reliability.

Social / management contributions

The model offers managers a practical tool that can be used to reduce innovation risks. With clear validation milestones, it facilitates crossing the "Valley of Death" and increases the attractiveness of R&D&I projects to investors and funding agencies.

Keywords: Technology Readiness Level (TRL), Agile Project Management, R&D Projects

Integrando Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL) e Metodologias Ágeis para a Gestão de Incertezas em Projetos de P&D&I

1. Introdução

Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&D&I) são marcados por incertezas técnicas, financeiras e de mercado. A travessia do chamado “Vale da Morte” é uma das principais barreiras: muitas tecnologias promissoras não conseguem avançar para a fase de mercado por falta de validação técnica ou de atratividade comercial (Martins, Silva, & Ribeiro, 2020). Nesse contexto, instrumentos de avaliação e metodologias de gestão tornam-se essenciais para aumentar a previsibilidade e reduzir riscos.

De um lado temos o Technology Readiness Level (TRL) que foi desenvolvido pela NASA nos anos de 1970 (Mankins, 1995) e funciona como uma régua para mensurar a maturidade tecnológica em nove níveis. A escala foi adotada por diversas agências internacionais (ESA, DoD, UE) e, no Brasil, normatizada pela ABNT (2018). O TRL, entretanto, é criticado por seu caráter qualitativo e subjetivo, já que depende da interpretação dos avaliadores (Héder, 2017).

De outro lado temos as metodologias ágeis, que se originaram no setor de *software*, que priorizam adaptação contínua, entregas rápidas e aprendizado validado (Highsmith, 2009; Manifesto Ágil, 2001). Atualmente são aplicadas em inovação tecnológica e gestão de projetos, mas carecem de marcos técnicos formais. Isso dificulta sua aplicação em setores de alta complexidade regulatória. No Brasil, as Instituições Científicas e Tecnológicas (ICTs) têm papel relevante na redução dessas incertezas.

Este artigo busca responder: *como integrar TRL e metodologias ágeis para gerir incertezas em projetos de P&D&I?* Para isso, propõe-se um *framework* híbrido que combina marcos de maturidade tecnológica com ciclos iterativos de aprendizagem, com base em práticas aplicadas em ICTs brasileiras.

2. Referencial Teórico

Projetos de P&D têm especificidades que os diferenciam dos projetos tradicionais, pois exigem simultaneamente a geração de novos conhecimentos, a validação de hipóteses técnicas e a análise de viabilidade de mercado. Em geral, esses projetos apresentam ciclos mais longos, elevada incerteza e múltiplos stakeholders, incluindo universidades, ICTs, empresas e agências de fomento (OECD, 2015; Conforto et al., 2016). Por isso, a adoção de frameworks como TRL e metodologias ágeis se mostra cada vez mais necessária para guiar sua evolução e reduzir riscos.

Diversos autores vêm discutindo a relevância do TRL e de suas derivações. Mankins (1995, 2009) introduziu e refinou o conceito para a NASA, enquanto Héder (2017) analisou sua difusão no setor público europeu. Tomaschek et al. (2016) destacaram as limitações de subjetividade, e recentes trabalhos brasileiros (Martins et al., 2020) demonstram sua aplicação em políticas públicas e programas de fomento. Em paralelo, as metodologias ágeis têm sido estudadas por Highsmith (2009), Cooper (2014) e Sommer, Hedegaard, Dukovska-Popovska, e Steger-Jensen (2015), com ênfase em sua adaptação para contextos de inovação. Estudos mais recentes (Conforto et al., 2016; Moeuf et al., 2020) mostram sua penetração em setores industriais e de manufatura avançada.

A literatura também aponta para a necessidade de integração entre abordagens prescritivas e adaptativas. O PMI (2021) reforça que projetos de inovação exigem flexibilidade, enquanto *frameworks* tradicionais como TRL e *Stage-Gate* asseguram governança. Esse

tensionamento entre controle e adaptação justifica a busca por *frameworks* híbridos, como o que se propõe neste artigo.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, desenvolvida em duas etapas complementares. A primeira consistiu em uma ampla revisão bibliográfica sobre TRL e metodologias ágeis, com foco na literatura acadêmica e em normas técnicas reconhecidas. Essa etapa permitiu mapear conceitos, identificar lacunas e reunir fundamentos teóricos relevantes. A segunda etapa envolveu a análise de práticas aplicadas em ICTs, essa contribuiu para compreender como instrumentos de avaliação de maturidade tecnológica vêm sendo operacionalizados no ambiente de inovação. A integração dessas frentes possibilitou a proposição de um *framework* conceitual robusto, que combina a previsibilidade dos marcos de maturidade com a adaptabilidade dos ciclos ágeis.

4. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta e discute os resultados da pesquisa, articulando-os com a literatura revisada. A análise inclui a descrição do modelo proposto e uma reflexão crítica sobre benefícios e desafios observados.

4.1 Framework Integrado TRL e Agilidade

O framework proposto resulta da convergência entre a literatura revisada e práticas observadas em projetos de P&D&I. A ideia central é organizar o avanço tecnológico de forma estruturada, sem renunciar à flexibilidade necessária em ambientes de incerteza. Assim, os níveis de TRL fornecem uma linha de progressão clara, enquanto os ciclos ágeis promovem aprendizado contínuo e validação incremental. A robustez desse modelo está em integrar evidências técnicas e mecanismos de governança (TRA/TQP) com a dinâmica iterativa das metodologias ágeis, criando uma abordagem híbrida capaz de reduzir riscos, aumentar a rastreabilidade e ampliar a confiabilidade dos resultados.

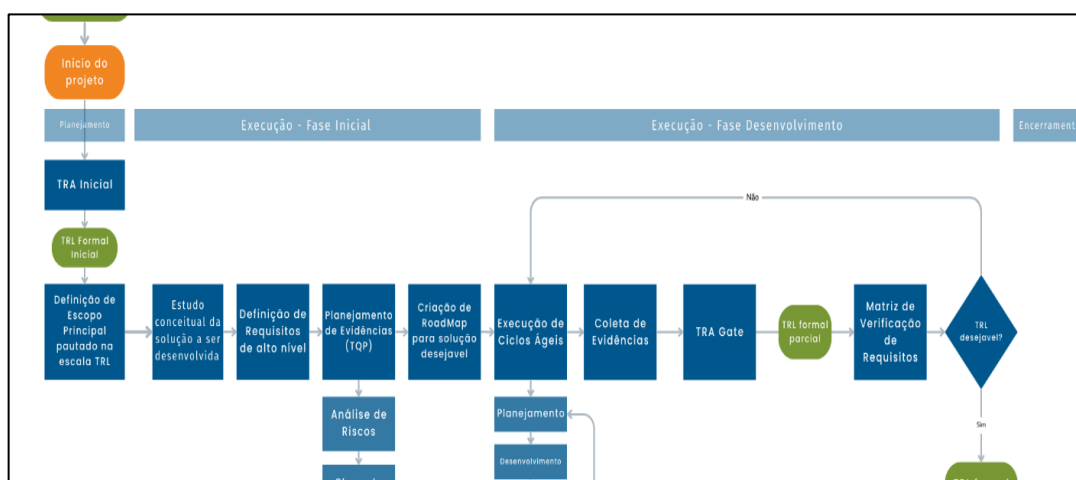


Figura 1.

Fluxo do processo de integração entre TRL, TRA/TQP e metodologias ágeis em projetos de P&D&I.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A Figura 1 apresenta de forma visual esse fluxo, ilustrando a passagem do planejamento até o alcance do TRL final. O diagrama reforça a integração proposta entre maturidade tecnológica e ciclos ágeis, demonstrando como as etapas se organizam em sequência lógica de planejamento, execução e validação. Cada ciclo ágil é concebido como um experimento de redução de incerteza, enquanto cada nível TRL representa um marco validado. Dessa forma, avanços técnicos são acompanhados por validação prática e de mercado.

4.2 Benefícios e Desafios

A adoção de um *framework* que integra TRL e metodologias ágeis traz uma série de benefícios, mas também enfrenta desafios que precisam ser considerados para sua efetiva implementação. Entre os aspectos positivos, destacam-se a redução de subjetividade e o aumento da rastreabilidade dos resultados (Tomaschek et al., 2016), o alinhamento mais claro entre maturidade tecnológica e validação de mercado (Héder, 2017), a ampliação da confiança de investidores, agências de fomento e parceiros (OECD, 2015), além da flexibilidade que permite a adaptação do modelo a diferentes setores (Highsmith, 2009).

Por outro lado, existem barreiras importantes. A necessidade de capacitação multidisciplinar pode representar custos adicionais e demandar tempo para a formação das equipes (Conforto et al., 2016). O esforço documental em fases iniciais, embora fundamental para garantir rastreabilidade, pode ser percebido como burocrático. Soma-se a isso a resistência cultural ou organizacional, especialmente em setores mais tradicionais, que tendem a adotar abordagens menos iterativas (Sommer et al., 2015).

Um ponto adicional refere-se às particularidades de projetos de P&D&I fomentados com recursos públicos, que em geral exigem escopos rígidos e cronogramas previamente definidos. Essa característica, embora necessária para fins de governança e prestação de contas, entra em conflito com a natureza iterativa e adaptativa das metodologias ágeis, dificultando sua adoção plena nesses contextos (Loch et al., 2006). Como alternativa, podem ser explorados mecanismos de mitigação, tais como, a definição de marcos intermediários de entrega, a inclusão de cláusulas contratuais de flexibilidade e o uso de relatórios evolutivos que conciliem exigências de prestação de contas com ajustes ágeis. Essas medidas permitem maior alinhamento entre requisitos de fomento público e práticas modernas de gestão da inovação.

Esses pontos reforçam que, embora o modelo integrado seja promissor, sua aplicação requer planejamento, treinamento e adaptação ao contexto específico de cada projeto. Uma agenda futura pode contemplar iniciativas de capacitação sistemática, desenvolvimento de guias práticos e estudos comparativos para validar o modelo em diferentes domínios tecnológicos.

5. Conclusões

A integração entre TRL e metodologias ágeis apresenta-se como uma abordagem mais robusta e coerente para a gestão de projetos de P&D&I, conciliando previsibilidade técnica com adaptabilidade prática. A aplicação destas, em ICTs brasileiras, tem contribuído significativamente para a objetividade da avaliação, ampliando a rastreabilidade e a confiança de *stakeholders*, além de aumentar a atratividade dos projetos perante investidores e órgãos de fomento.

Além disso, a experiência reforça que modelos híbridos podem ajudar a superar o “Vale da Morte” tecnológico, fornecendo tanto evidências estruturadas de maturidade quanto flexibilidade para ajustes iterativos. Essa combinação fortalece o papel das ICTs na liderança da inovação no Brasil.

Como perspectivas futuras, recomenda-se avançar na digitalização da calculadora TRL, evoluindo para uma plataforma integrada que ofereça dashboards interativos, vinculação a *roadmaps* tecnológicos e integração com métricas complementares como MRL e CRL. Sugere-se também explorar aplicações setoriais específicas (energia, manufatura avançada), realizar estudos comparativos internacionais e investigar indicadores de impacto econômico e social. Esses caminhos podem consolidar ainda mais a proposta como referência para a gestão de projetos de alta complexidade tecnológica.

Referências

- ABNT. (2018). *NBR ISO 16290: Sistemas espaciais — Definição dos níveis de maturidade da tecnologia (TRL) e de seus critérios de avaliação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Cooper, R. G. (2014). What's next? After stage-gate. *Research-Technology Management*, 57(1), 20–31. <https://doi.org/10.5437/08956308X5606963>
- Conforto, E. C., & Amaral, D. C. (2016). Agile project management and stage-gate model—A hybrid framework for technology-based companies. *Journal of Engineering and Technology Management*, 40, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2016.02.003>
- DNV. (2019). *DNVGL-RP-A203: Technology qualification*. Høvik, Norway: DNV GL.
- Highsmith, J. (2009). *Agile project management: Creating innovative products*. Addison-Wesley.
- Héder, M. (2017). From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in public sector innovation. *The Innovation Journal*, 22(2), 1–23.
- Loch, C., DeMeyer, A., & Pich, M. (2006). *Managing the unknown: A new approach to managing high uncertainty and risk in projects*. John Wiley & Sons.
- Mankins, J. C. (1995). Technology readiness levels. *NASA Office of Space Access and Technology*. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950022462>
- Mankins, J. C. (2009). Technology readiness and risk assessments: A new approach. *Acta Astronautica*, 65(9–10), 1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.059>
- Manifesto Ágil. (2001). *Manifesto for Agile Software Development*. Disponível em: <https://agilemanifesto.org/>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- Martins, A. R., Silva, T. F., & Ribeiro, P. C. (2020). Classificação dos instrumentos de captação de recursos para apoio à inovação do governo federal na escala de TRL. *Cadernos de Prospecção*, 13(1), 78–91. <https://doi.org/10.9771/cp.v13i1.31441>
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., & Eburdy, R. (2020). Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1384–1400. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1636323>
- PMI. (2021). *Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK®)* (7ª ed.). Project Management Institute.
- OECD. (2015). *Frascati Manual 2015: Guidelines for collecting and reporting data on research and experimental development* (The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities). Paris: OECD Publishing.
- Sommer, A. F., Hedegaard, C., Dukovska-Popovska, I., & Steger-Jensen, K. (2015). Improved product development performance through agile/stage-gate hybrids. *Research-Technology Management*, 58(1), 34–45. <https://doi.org/10.5437/08956308X5801236>
- Tomaschek, K., Olechowski, A., Eppinger, S. D., & Joglekar, N. (2016). A survey of technology readiness level users. *INCOSE International Symposium*, 26(1), 2101–2117. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2016.00283.x>